

ÉTUDES ÉCONOMIQUES

PROSPECTIVE

Futur de la fabrication additive

Rapport final

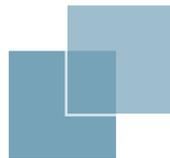
Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M)
Aluminium France
Fédération forge fonderie (FFF)
Observatoire de la plasturgie
Syndicat français de l'industrie cimentière (SFIC)



Date de parution : janvier 2017
Couverture : Hélène Alias-Denis, Brigitte Baroin
Édition : Martine Automme, Nicole Merle-Lamoot

ISBN : 978-2-11-151552-9

Futur de la fabrication additive



Rapport final

Le Pôle interministériel de Prospective et d'Anticipation des Mutations économiques (Pipame) a pour objectif d'apporter, en coordonnant l'action des départements ministériels, un éclairage de l'évolution des principaux acteurs et secteurs économiques en mutation, en s'attachant à faire ressortir les menaces et les opportunités pour les entreprises, l'emploi et les territoires.

Des changements majeurs, issus de la mondialisation de l'économie et des préoccupations montantes comme celles liées au développement durable, déterminent pour le long terme la compétitivité et l'emploi, et affectent en profondeur le comportement des entreprises. Face à ces changements, dont certains sont porteurs d'inflexions fortes ou de ruptures, il est nécessaire de renforcer les capacités de veille et d'anticipation des différents acteurs de ces changements : l'État, notamment au niveau interministériel, les acteurs socio-économiques et le tissu d'entreprises, notamment les PME. Dans ce contexte, le Pipame favorise les convergences entre les éléments microéconomiques et les modalités d'action de l'État. C'est exactement là que se situe en premier l'action du Pipame : offrir des diagnostics, des outils d'animation et de création de valeur aux acteurs économiques, grandes entreprises et réseaux de PME/PMI, avec pour objectif principal le développement d'emplois à haute valeur ajoutée sur le territoire national.

Le secrétariat général du Pipame est assuré par la sous-direction de la Prospective, des Études et de l'Évaluation Économiques (P3E) de la direction générale des Entreprises (DGE).

Les départements ministériels participant au Pipame sont :

- le ministère de l'Économie et des Finances/Direction générale des Entreprises ;
- le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer ;
- le ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt ;
- le ministère de la Défense/Direction générale de l'Armement ;
- le ministère du Travail, de l'Emploi, de la Formation professionnelle et du Dialogue social/Délégation générale à l'Emploi et à la Formation professionnelle ;
- le ministère des Affaires sociales, de la Santé et des Droits des femmes/Direction générale de la Santé ;
- le ministère de la Culture et de la Communication/Département des Études, de la Prospective et des Statistiques ;
- le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche ;
- le ministère de la Ville, de la Jeunesse et des Sports ;
- le Commissariat général à l'Égalité des territoires (CGET), rattaché au Premier ministre ;
- le Commissariat général à la stratégie et à la prospective (CGSP), rattaché au Premier ministre.

MEMBRES DU COMITÉ DE PILOTAGE

Ange MUCCHIELLI	Direction générale des entreprises (DGE)
Alice MÉTAYER-MATHIEU	Direction générale des entreprises (DGE)
Hoang BUI	Direction générale des entreprises (DGE)
Philippe MICHENOT	Direction générale des entreprises (DGE)
Claude MARCHAND	Direction générale des entreprises (DGE)
Jean-Louis GERSTENMAYER	Direction générale des entreprises (DGE)
Aurélien GARCIA	Direction générale des entreprises (DGE)
Angélique MONNERAYE	Direction générale des entreprises (DGE)
Florian MUZARD	Commissariat général à l'égalité des territoires (CGET)
Anne FAURE	Commissariat général à l'égalité des territoires (CGET)
Caroline COLOMBIER	Aluminium France
Cyrille MOUNIER	Aluminium France
Claire DE LANGERON	Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M)
Nadia MANDRET	Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M)
Stéphanie GANIER	ERAMET Alliages
Pascale LEPRETRE	Fédération forge fonderie
Jean-Luc BRILLANCEAU	Fédération forge fonderie
Olivier VASSEUR	Fédération forge fonderie
Simon PHILIBERT	Fédération de la plasturgie et des composites
Arnaud PERIGORD	Syndicat français de l'industrie cimentière
Anne BERNARD-GELY	Syndicat français de l'industrie cimentière
Audrey CHERRIERE	OPMQ Plasturgie/OPCA pour le développement de l'emploi et de la formation dans l'industrie
Nicolas FIQUET	Observatoire de la Plasturgie

La conduite des entretiens et la rédaction du présent rapport ont été réalisées par les organismes :

TECH2MARKET

74, rue de Bonnel
69423 Lyon
Tél. : +33 (0)4 78 82 84 33
www.tech2market.fr

Représenté par :

Benoit RIVOLLET, dirigeant
Avec les contributions de Blaise CAVALLI, Nicolas LOUEE et Claude-Emmanuel SERRE

Cetim : CENTRE TECHNIQUE DES INDUSTRIES MECANIQUES

52, Avenue Félix Louax
60300 Senlis
Tél. : +33 (0)3 44 67 36 82
www.cetim.fr

Représenté par :

Laurent COUVÉ, responsable Veille Technologique et Stratégique
Avec les contributions de Jean-Paul CANDORET, Benoit VERQUIN, Arnold MAUDUIT, Pierre AUGUSTE

**CTI-PC : CENTRE TECHNIQUE INDUSTRIEL DE LA
PLASTURGIE ET DES COMPOSITES**

2, rue Pierre et Marie Curie
BP 1204 Bellignat 01117 Oyonnax Cedex
Tél. : +33 (0)4 74 81 92 60
www.poleplasturgie.net

Représenté par :

Julien BAJOLET, responsable Ligne Programme
R & D fabrication additive

**CTTC : CENTRE DE TRANSFERT DE
TECHNOLOGIES CERAMIQUES**

Parc d'ester 7, rue Soyouz
87068 Limoges Cedex
Tél. : +33 (0)5 55 42 61 50
www.cttc.fr

Représenté par :

Grégory ETCHEGOYEN, directeur du CTTC

**CTIF : CENTRE TECHNIQUE INDUSTRIEL
FONDERIE**

44, avenue de la Division Leclerc
92318 Sèvres Cedex
Tél. : +33 (0)5 55 42 61 50
www.ctif.fr

Représenté par :

Didier LINXE, responsable Études & Méthodes
Avec la contribution de Camille OLIVIER

YOUFACTORY

50, rue Antoine Primat
69100 Villeurbanne
Tél. : +33 (0)4 26 68 71 19
www.youfactory.co

Représenté par :

Jean NELSON, cofondateur

REMERCIEMENTS

Le groupement composé de Tech2Market, du Centre technique des industries mécaniques (Cetim), du Pôle européen de la plasturgie : Centre technique industriel de la plasturgie et des composites (CTI-PC), du Centre de transfert de technologies céramiques (CTTC), du Centre technique des industries de la fonderie (CTIF) et de YouFactory, tient à adresser tous ses remerciements aux interlocuteurs rencontrés au cours de cette mission.

Nous tenons également à remercier spécifiquement les personnes ayant mis leur temps à disposition pour nous faire partager leur vision et leur expérience ainsi que les experts rencontrés lors des ateliers de travail dont l'aide précieuse a permis de mener à bien cette mission.

TABLE DES MATIÈRES

SIGLES	11
GLOSSAIRE	12
CADRAGE DE LA MISSION	15
Introduction	15
Contexte et objectifs de l'étude	15
INTRODUCTION	19
Du prototypage rapide à la fabrication directe.....	19
Organisation du marché de la fabrication additive.....	21
<i>Un marché mondial d'environ 19 milliards de dollars en 2020</i>	22
<i>Les machines de fabrication métal : une expertise européenne</i>	23
<i>Les matériaux : un segment stratégique de 650 millions de dollars</i>	24
ANALYSE DE LA DEMANDE	27
Introduction	27
Applications de la fabrication additive dans l'industrie	29
<i>Aéronautique, spatial et militaire</i>	29
<i>Automobile et transports</i>	33
<i>Médical</i>	35
<i>Bâtiment</i>	38
<i>Énergie</i>	39
<i>Emballage</i>	41
<i>Fonderie – Moules – Outillage</i>	42
Analyse de la demande dans les technologies professionnelles.....	44
<i>Une technologie en phase d'industrialisation</i>	44
<i>Une réduction du coût du cycle de vie plutôt que du coût de production dans la majeure partie des cas</i>	45
<i>Un cap à franchir : synthèse des principaux besoins</i>	46
<i>Quels modèles économiques pour la fabrication additive ?</i>	58
<i>Impacts de l'hybridation et des machines de nouvelles générations</i>	59
La fabrication additive dans les services, le commerce et son adoption par le grand public	60
<i>La personnalisation du retail grâce à la fabrication additive</i>	60
<i>Des services en ligne à l'impression 3D en magasin</i>	61
<i>Analyse de la demande dans les lieux d'innovation</i>	63
<i>Analyse de la demande dans les technologies grand public</i>	69
ANALYSE DE L'OFFRE	73
Introduction	73
Cartographie de l'offre française : des compétences à tous les niveaux de la chaîne de valeur	74
<i>Les fabricants de machine</i>	76
<i>La fabrication de matériaux</i>	79

<i>Le développement de solutions logicielles</i>	84
<i>L'écosystème de la recherche</i>	81
<i>Une structuration déséquilibrée entre donneurs d'ordres et sous-traitants</i>	83
UNE DYNAMIQUE INTERNATIONALE	87
Feuille de route de la normalisation internationale.....	87
Analyse internationale des brevets.....	95
<i>Analyse statistique des brevets en fabrication additive à travers le monde</i>	95
<i>Acteurs français et place de la France comme terrain de jeu en fabrication additive</i>	95
Principaux écosystèmes internationaux de la fabrication additive.....	100
<i>La fabrication additive à travers le monde</i>	100
<i>La fabrication additive en Europe</i>	103
<i>Positionnement paradoxal français dans l'écosystème international</i>	105
FACTEURS DE DÉVELOPPEMENT DE LA FABRICATION ADDITIVE	106
Introduction.....	107
Analyse des freins et opportunités à l'adoption des technologies de la fabrication additive.....	107
<i>Point méthodologique</i>	107
<i>Principaux enjeux d'adoption de la fabrication additive</i>	108
<i>Freins et leviers de développement de la fabrication additive</i>	110
IMPACT DU DÉVELOPPEMENT DE LA FABRICATION ADDITIVE SUR LES TERRITOIRES ET SUR LA CHAÎNE LOGISTIQUE	123
Introduction.....	123
L'évolution macroéconomique de l'organisation industrielle.....	125
Cartographie des dynamiques d'écosystèmes économiques français.....	132
<i>De nombreux pôles de compétences pour l'émergence de différentes zones de spécialisation</i>	132
<i>Analyse des dynamiques régionales d'intérêt</i>	133
Identification des dynamiques d'écosystèmes favorables au développement de la fabrication additive.....	141
<i>L'émergence d'une économie territorialisée</i>	141
<i>Évolution des modèles économiques</i>	143
IMPACTS SUR LES RESSOURCES HUMAINES ET ÉVOLUTION DES COMPÉTENCES	151
De nombreuses évolutions à venir.....	151
Un besoin soutenu de formation à combler.....	152
<i>Une question d'éducation et de sensibilisation</i>	152
<i>La formation initiale en cours de structuration</i>	153
<i>La formation professionnelle dans l'attente d'un référentiel de qualification</i>	154
La fabrication additive : une compétence recherchée.....	155
<i>Principales tendances sur le marché de l'emploi en France</i>	156
<i>Un impact limité en termes d'emploi</i>	157

SCÉNARIOS PROSPECTIFS DE LA FABRICATION ADDITIVE	161
De l'identification de cas d'usage à la caractérisation de scénarios prospectifs	161
<i>Scénario 1 – Prototypage et expérimentation.....</i>	<i>163</i>
<i>Scénario 2 – Industrialisation de la personnalisation.....</i>	<i>165</i>
<i>Scénario 3 – Vers la production série directe et indirecte pour le gain de performance.....</i>	<i>170</i>
<i>Scénario 4 – Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande.....</i>	<i>175</i>
<i>Impact des scénarios prospectifs sur les différents marchés d'intérêt.....</i>	<i>181</i>
<i>Conclusion : des scénarios mixtes, de l'intégration des compétences à une réorganisation productive d'envergure.....</i>	<i>182</i>
RECOMMANDATIONS ET FICHES ACTIONS	187
ANNEXES	201
Annexe 1 : retour sur les travaux effectués	201
Annexe 2 : technologies de fabrication additive et matériaux associés	205
Annexe 3 : une dynamique internationale	221
Annexe 4 : outils d'analyse utilisés pour l'étude	229
Annexe 5 : analyse de pièces (versions complètes)	233
<i>Analyse de la fabrication d'un boîtier de clé.....</i>	<i>233</i>
<i>Analyse de la fabrication d'un tableau de bord.....</i>	<i>235</i>
<i>Analyse de la fabrication de mobilier de jardin.....</i>	<i>237</i>
<i>Analyse de la fabrication d'implant crânien.....</i>	<i>239</i>
<i>Analyse de la fabrication de pièces en céramiques (art de la table ou sanitaire)...</i>	<i>241</i>
INDEX DES ILLUSTRATIONS	243

SIGLES

A3M	Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene - Thermoplastique
AIF	Alliance pour l'industrie du futur
AMF	Format de fichier – Additive Manufacturing File
AFPR	Association française de prototypage rapide
CAGR	Taux de croissance annuel moyen
CAO	Conception assistée par ordinateur
Cetim	Centre technique des industries mécaniques
CGET	Commissariat général à l'égalité des territoires
CTIF	Centre technique des industries de la fonderie
CTTC	Centre de transfert de technologies céramiques
DED	Dépôt de matière sous flux dirigé
DMD	Dépôt direct de métal
DGE	Direction générale des entreprises
DIRECCTE	Direction régionale des entreprises, de la concurrence, de la consommation, du travail et de l'emploi
EBM	Fusion par faisceau d'électrons – <i>Electron Beam Melting</i>
FabLab	Fabrication Laboratory – Lieu collaboratif de fabrication numérique
FDM®	Dépôt de filament fondu
OPCA DEFI	OPCA pour le développement de l'emploi et de la formation dans l'industrie
OPCA	Organisme paritaire collecteur agréé
PEP	Pôle européen de la plasturgie – désormais Centre technique industriel innovation plasturgie composites
PET	Polyethylene terephalate - Thermoplastique
Pipame	Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques
PLA	Acide polylactique
SFIC	Syndicat français de l'industrie cimentière
SLA®	Stéréolithographie
SLM	Fusion sélective par laser – <i>Selective laser melting</i>
SLS®	Frittage sélectif par laser – <i>Selective laser sintering</i>
SPS	Frittage flash – <i>Spark plasma sintering</i>
STL	Format de fichier – <i>Standard tessellation language</i>

GLOSSAIRE

Chaîne de production : la chaîne de production est l'ensemble des opérations de fabrication nécessaires, à la réalisation d'un produit manufacturé, des matières premières jusqu'à la mise sur le marché.

Chaîne de valeur : la chaîne de valeur est une approche systématique visant à examiner le développement d'un avantage concurrentiel. Michaël Porter l'a créé dans son livre « l'avantage concurrentiel ». La chaîne se compose d'une série d'activités ajoutant de la valeur. Elles aboutissent à la valeur totale fournie par une entreprise.

Chaîne logistique : la chaîne logistique vise à garantir l'organisation et la qualité du service logistique en conformité avec les dispositions figurant au cahier des charges logistique.

Coût : un coût est la mesure, de la dépense ou de l'appauvrissement d'un agent économique, associé à un événement ou une action de nature économique, et exprimé généralement sous forme d'un prix ou d'une valeur monétaire.

Design : le terme « design » est utilisé dans ce document dans le sens de « conception du schéma et/ou modèle d'une pièce », impliquant des notions de formes, de structure, de matériaux, et de fonctionnalités.

Économie d'échelle : une économie d'échelle correspond à la baisse du coût unitaire d'un produit qu'obtient une entreprise en accroissant la quantité de sa production.

Fabrication additive : la fabrication additive, plus connue sous le nom d'impression 3D, est un processus de fabrication qui transforme un modèle 3D en un objet physique, en assemblant des couches successives d'un même matériau.

Fabrication numérique : il s'agit de l'ensemble des technologies de fabrication (additive ou soustractive) qui intègrent des technologies numériques (technologies de contrôle, solutions de modélisation ou de simulation, automatisation...). Ce terme est en opposition aux méthodes de fabrication traditionnelles, qui n'impliquent pas de technologies du numérique (perceuse à colonne par exemple).

Flexibilité du travail : la flexibilité du travail est l'un des moyens permettant à une entreprise de s'adapter aux évolutions de sa demande et de son environnement. Cette flexibilité est une des composantes de sa réactivité industrielle.

Iso-design : le terme iso-design signifie dans l'ensemble de ce document « à conception identique », excluant ainsi toute reconception et modification de la forme, de la structure, ou des matériaux utilisés.

Management de l'innovation : le management de l'innovation est la mise en œuvre des techniques et dispositifs de gestion destinés à créer les conditions les plus favorables au développement d'innovations concrètes.

Maturité : la maturité est l'étape dans laquelle se trouve un organisme qui a atteint son plein développement.

Optimisation topologique : l'optimisation topologique consiste à trouver la répartition de matière idéale dans un volume donné soumis à des contraintes. Elle se distingue de l'optimisation de forme qui ne fait varier que la frontière de la pièce.

Production en série : la production en série est un mode de production caractérisé par une organisation telle que les produits passent linéairement de poste à poste jusqu'à prendre leur forme finale.

Productivité : en économie, la productivité entend mesurer le degré de contribution d'un ou de plusieurs facteurs de production (facteurs matériels consommés ou facteurs immatériels mis en œuvre) à la variation du résultat final dégagé par un processus de transformation. La productivité est en lien avec les notions de rendement, d'efficacité, et d'efficience.

Rentabilité : la rentabilité est le rapport entre un revenu obtenu ou prévu et les ressources employées pour l'obtenir. La notion s'applique notamment aux entreprises mais aussi à tout autre investissement.

Structure lattice : une structure lattice est un maillage de la matière impliquant une inhomogénéité de la matière. Ces structures permettent notamment d'optimiser la répartition de la matière en fonction du cahier des charges de la pièce.

TRL : l'échelle TRL (*technology readiness level* ou niveau de maturité technologique) est un système de mesure employé pour évaluer le niveau de maturité d'une technologie, en vue de financer la recherche et son développement ou dans la perspective d'intégrer cette technologie dans un système ou un sous-système opérationnel.

Valeur ajoutée : en comptabilité, la valeur ajoutée (VA) est une notion qui s'efforce de mesurer la valeur économique ajoutée par l'activité d'une entreprise. L'Insee la définit comme le « solde du compte de production. Elle est égale à la valeur de la production diminuée de la consommation intermédiaire. Pour chaque agent économique, c'est un des soldes intermédiaires de gestion qui correspond à la différence entre la valeur des produits (le chiffre d'affaires) et la valeur des achats faits pour exercer l'activité (marchandises, consommations intermédiaires : matières premières, services...).

CADRAGE DE LA MISSION

Introduction

La Direction générale des entreprises (DGE) et le Commissariat général à l'égalité des territoires (CGET), en collaboration avec l'Observatoire de la plasturgie, le Syndicat français de l'Industrie cimentière, Aluminium France, l'Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux, et la Fédération forge fonderie, ont lancé une **étude prospective sur le futur de la fabrication additive**.

La réalisation de cette mission a été confiée au cabinet Tech2Market et son consortium composé du Centre technique des industries mécaniques (Cetim), du Pôle européen de la plasturgie (PEP), du Centre de transfert de technologies céramiques (CTTC), du Centre technique des industries de la fonderie (CTIF) et de la société YouFactory.

Conduite dans le cadre du Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (Pipame), **cette étude a pour objectif d'analyser le positionnement et les conditions de développement de la fabrication additive en France et dans ses territoires, à la fois sur le marché grand public et au sein des filières industrielles et de leurs processus productifs**. Elle vise notamment à dégager des pistes d'actions visant à structurer l'offre française et accompagner la diffusion de ces nouvelles technologies dans les entreprises et à l'échelle des territoires.

Contexte et objectifs de l'étude

Avec un premier brevet sur la stéréolithographie déposé en 1984, la fabrication additive n'est pas une innovation récente. Notion désignant un ensemble de procédés capable de fabriquer une pièce par ajout de matière couche par couche et à partir d'un fichier numérique 3D, la fabrication additive fait aujourd'hui partie des axes majeurs du plan industriel « Usine du futur¹ ». Si on entend également parler d'impression 3D, un terme qui s'est généralisé de par le succès médiatique et les utilisateurs « grand public » de ces technologies, les experts techniques et les industriels privilégient le terme de fabrication additive, plus précis et plus global.

Cette distinction est importante aux yeux des représentants de l'écosystème car il existe en réalité deux segments de marché bien distincts : d'un côté des applications dites « grand public » où le consommateur peut aujourd'hui avoir accès à des machines abordables mais relativement limitées en termes de qualité et de capacité, de l'autre côté des usages industriels beaucoup plus variés et qui promettent de nombreux développements à venir. Si le marché grand public semble déjà présenter des signes de ralentissement² et que le véritable enjeu semble lié au développement de la fabrication additive dans l'industrie, il est nécessaire de prendre en compte cette dimension dans l'appréciation de l'adoption actuelle et future des différentes technologies associées.

Qualifiée récemment de révolution discrète³, la fabrication additive redéfinit entièrement la façon avec laquelle les industriels conçoivent et développent leurs produits : là où il fallait enlever de la matière à une pièce brute pour obtenir un produit fini, il est aujourd'hui possible d'ajouter de la matière juste où cela est nécessaire, ouvrant ainsi des possibilités en termes de design⁴ et de réduction des coûts. Si la technologie est plutôt bien assimilée pour produire des pièces non fonctionnelles et des dispositifs d'aide à la production tels que des prototypes, des

¹ « Emmanuel Macron place l'impression 3D au cœur de l'Usine du futur » Le Parisien, Avril 2015

² Impression 3D : Sculpteo fait le deuil de la révolution grand public, La Tribune, Mai 2014

³ « Impression 3D, la discrète révolution » Usine Nouvelle n°3453, p30-31

⁴ Le terme « design » est utilisé dans ce document dans le sens de « conception du schéma et/ou modèle d'une pièce », impliquant des notions de formes, de structure, de matériaux, et de fonctionnalités.

moules ou des outillages, l'enjeu porte aujourd'hui sur la fabrication en série⁵ de pièces fonctionnelles qui implique des problématiques nouvelles en termes de cadence et de finitions.

Utilisée dans un premier temps par le médical, le spatial et le sport automobile puis progressivement dans l'automobile et l'aéronautique, la fabrication additive représente bien plus qu'un ensemble de procédés. En effet, les répercussions de cette révolution technologique se font ressentir à tous les niveaux de la chaîne de valeur⁶ : fabricants de machines, sous-traitants, donneurs d'ordres, transporteurs, développeurs de logiciels, fournisseurs de matériaux et laboratoires de recherches. À chaque niveau, les acteurs devront encore faire face à de nombreux défis et verrous technologiques, qui sont autant d'opportunités pour augmenter l'adoption et la diffusion de la fabrication additive dans les entreprises et à l'échelle des territoires.

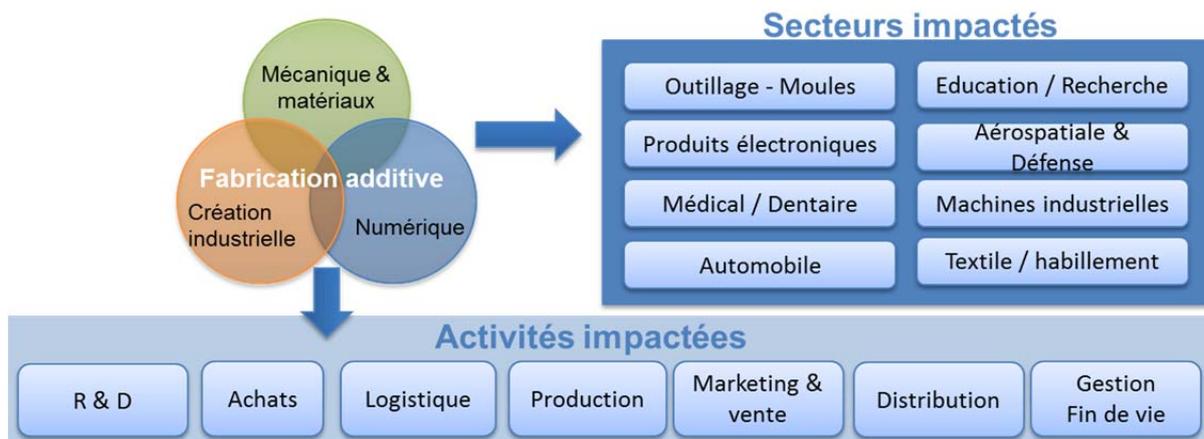


Figure 1: Activités et secteurs impactés par la fabrication additive

À l'image du discours de Barack Obama sur l'État de l'Union en 2013⁷, du réseau allemand très structuré de l'Alliance Fraunhofer pour la Fabrication additive⁸ ou encore de la décision du gouvernement britannique d'introduire l'impression 3D dans les cursus scolaires primaires et secondaires^{9 10}, de nombreux pays ont redoublé d'efforts dans cette course technologique et industrielle mondiale. Si l'écosystème industriel et scientifique français présente des atouts évidents, les premières analyses font état d'un sentiment d'un manque d'une stratégie française claire et coordonnée dans le domaine de la fabrication additive. Positionnée légèrement en retrait sur la scène internationale avec seulement 3,2 % du parc mondial de machines et une offre peu structurée et coordonnée, la France se doit de rattraper son retard aussi bien du côté privé que du côté public et d'adopter une stratégie claire pour faciliter la diffusion de la fabrication additive.

Dans ce cadre, l'objectif de la présente étude sera, dans un premier temps de réaliser un état des lieux et un panorama élargi de la filière de la fabrication additive et des activités associées afin de caractériser la demande et l'offre françaises actuelles. Après avoir identifié les leviers de développement permettant de faciliter la diffusion de ces technologies, l'étude cherchera à anticiper les différentes mutations économiques à venir et leurs impacts à l'échelle des

⁵ La production en série est un mode de production caractérisé par une organisation telle que les produits passent linéairement de poste à poste jusqu'à prendre leur forme finale.

⁶ La chaîne de valeur est une approche systématique visant à examiner le développement d'un avantage concurrentiel. Michaël Porter l'a créé dans son livre « L'avantage concurrentiel ». La chaîne se compose d'une série d'activités ajoutant de la valeur. Elles aboutissent à la valeur totale fournie par une entreprise.

⁷ Obama traite de l'impression 3D lors de son discours sur l'État de l'Union, Stratasy, Février 2013

⁸ Fraunhofer Additive Manufacturing Alliance <http://www.generativ.fraunhofer.de/en.html>

⁹ Le ministre de l'éducation britannique débloque £500,000 pour aider les écoles à s'équiper en imprimantes 3D, 3Dnatives, Octobre 2013

¹⁰ La décision d'équiper 60 écoles a été annoncée après une évaluation positive de l'impact de l'impression 3D sur un projet pilote impliquant 21 écoles effectué entre 2012 et 2013. Voir notamment ¹⁹⁹

territoires. Cette analyse croisée permettra enfin de construire une vision prospective de ce que sera la fabrication additive de demain et d'apporter des recommandations stratégiques aux pouvoirs publics afin d'accompagner la structuration de la filière française au niveau national et territorial.

Ces objectifs globaux peuvent alors être décomposés en plusieurs points :

- Élaborer une vision des technologies actuelles et de leurs impacts au niveau international : état de l'art des usages de l'impression 3D et des matériaux disponibles au niveau international, panorama des acteurs impliqués dans la filière, intérêt des technologies face à l'existant ;
- Réaliser une analyse des acteurs de la filière française et parangonnage international ;
- Élaborer une vision prospective sur les changements apportés par ces nouvelles technologies au niveau des filières industrielles, des territoires et des filières connexes ;
- Définir le positionnement de la France et sa capacité à devenir un acteur mondial ;
- Émettre des recommandations opérationnelles afin de favoriser la structuration de la filière et la diffusion de l'impression 3D sur l'ensemble des territoires.

Précisions méthodologiques

La mission est réalisée en huit phases distinctes (ou volets), portant sur une période de 10 mois, de janvier 2016 à octobre 2016. Chaque volet correspond à une étape de la réflexion menant à la détermination des leviers sur lesquels les pouvoirs publics peuvent agir pour faciliter la structuration de la filière française et généraliser l'adoption des technologies de fabrication additive dans les entreprises et à l'échelle des territoires.

1. **Le volet 1 porte sur l'analyse de la demande française en matière de fabrication additive** et a pour objectif de dresser un état des lieux en France et dans le monde de l'usage en 2015 de l'impression 3D et de la fabrication additive dans les principaux secteurs des services et de la consommation, de l'innovation et dans les filières industrielles de production.
2. **Le volet 2 a pour objet la caractérisation de l'offre française**, tant au niveau des industriels que des écosystèmes d'innovation et de production et vise à apporter une vision de la dynamique du secteur afin de dégager un éclairage sur le positionnement concurrentiel des acteurs français sur la scène internationale.
3. **Le volet 3 consiste à analyser les facteurs de développement de la fabrication additive** afin d'évaluer la capacité des entreprises et acteurs de l'économie territoriale français à s'approprier l'impression 3D tant du côté de l'offre que de la demande. Il s'agit en parallèle d'identifier les freins capables de ralentir l'adoption de ces technologies et de démontrer les bénéfices des technologies additives par rapport à l'existant.
4. **Le volet 4 a pour objectif d'identifier les conséquences et interactions du développement de la fabrication additive sur les territoires**, à savoir les opportunités en termes de relocalisation ou de décentralisation de la production manufacturière ou encore les mutations économiques à anticiper dans le cadre des stratégies de développement économique et d'innovation des collectivités territoriales.
5. **Le volet 5 apporte une réflexion prospective à court et moyen terme** sur les perspectives de développement de la fabrication additive de manière globale, au sein de chaque branche industrielle et pour les applications grand public.
6. **Le volet 6 propose des recommandations opérationnelles et prioritaires** aux industriels et aux pouvoirs publics afin de favoriser l'émergence de pépites française et à renforcer la structuration de la filière pour mieux la développer.
7. **Les volets 7 & 8 font l'objet d'un focus sur la fabrication additive métallique** en particulier aluminium, titane, superalliages et aciers et de son potentiel à venir par marché en se basant sur quatre axes de réflexions : technique, marché, compétitivité et économique.

INTRODUCTION

Popularisée par la presse économique et l'actualité technologique sous le terme « Impression 3D », la fabrication additive séduit les industriels dans de nombreux secteurs d'applications à des fins de prototypages ou pour réaliser les étapes de production. Cependant, face aux 82 milliards de dollars du marché mondial de la machine-outil¹¹, la fabrication additive reste aujourd'hui un phénomène d'ampleur limitée malgré une croissance soutenue depuis quelques années. En effet, même si la technologie est connue depuis plusieurs décennies, le niveau d'adoption et la maturité¹² des acteurs restent très variables selon les domaines d'utilisation et laissent entrevoir une multiplication des usages au fur et à mesure de l'évolution des machines, des matériaux ou des logiciels et de façon plus générale, de l'écosystème. Ce chapitre vise ainsi à dresser un état de l'art international de la fabrication additive, des différents procédés aux matériaux utilisés en passant par les derniers exemples d'applications. Cela permet à un lecteur non-expert de comprendre les notions clés et le marché actuel de la fabrication additive et de percevoir le niveau d'adoption des technologies associées sur le plan international.

Du prototypage rapide à la fabrication directe

Si la fabrication additive remet en cause la manière dont les industriels imaginent et fabriquent les pièces et est souvent présentée comme une révolution, elle est connue des acteurs de la filière depuis plusieurs décennies. À l'heure de l'avènement de la fabrication additive en production en petites et moyennes séries, il paraît judicieux de préciser ici les différentes étapes et enjeux qui ont guidé le développement de ces technologies afin de mieux comprendre leurs utilisations d'aujourd'hui et de demain.

Dans les années 1980, le besoin grandissant de personnalisation et de renouvellement a en effet poussé les bureaux d'études à réfléchir à de nouvelles solutions de conception et de validation de projets à moindre coût et dans des délais de plus en plus courts. C'est dans ce contexte de recherche de compétitivité industrielle que sont apparus les premiers procédés de prototypage rapide, une émergence d'ailleurs favorisée par les gros progrès réalisés à cette époque en modélisation 3D et en développement informatique. Le prototypage rapide permet alors de valider rapidement des concepts en fabricant un produit présentant les mêmes caractéristiques et fonctionnalités que la pièce ou l'outillage final et ainsi de confronter au plus tôt son esthétique, son fonctionnement ou encore son encombrement dans l'assemblage final.

À partir des années 1990, les industriels ne souhaitent plus valider seulement la forme ou l'esthétique et cherchent à obtenir une représentativité plus poussée au sein de laquelle les procédés conventionnels et les outillages associés gardent tout leur sens, celle du trio « produit/procédé/matériau ». Afin de réduire les coûts et les délais de livraison des pièces d'outillages tout en augmentant leurs performances, la fabrication additive est rapidement considérée : le concept d'outillage rapide apparaît. L'enjeu qui découle de ce nouveau concept est double. Le premier enjeu consiste à avoir une meilleure représentativité du prototype en termes de matériau, de mise en forme et de finition grâce à des outillages complexes disponibles en quelques dizaines d'heures plutôt que quelques mois. Le deuxième enjeu est encore bien plus important puisqu'il concerne les outillages dédiés à la production en grande série et où les procédés de stratoconception, de fusion ou de frittage de poudres métalliques apportent des solutions innovantes de régulation thermique et de modularité de l'outillage. Cette avancée est rendue possible grâce aux formes complexes et aux nouvelles fonctionnalités apportées à la pièce par ce biais.

¹¹ World Machine-Tool Output & Consumption Survey, Gardner Research 2015

¹² La maturité est l'étape dans laquelle se trouve un organisme qui a atteint son plein développement.

Enfin, une autre approche se dessine depuis une petite quinzaine d'années, celle de la fabrication rapide qui offre la possibilité de réaliser une pièce en petite série directement, c'est-à-dire sans aucun moule ou modèle intermédiaire. Ce concept, apparu notamment grâce au gain de maturité des technologies de fabrication additive, présente désormais la capacité de mettre en œuvre des pièces fonctionnelles, souvent de taille modeste et en petite série. Il offre également un degré de complexité et de personnalisation bien supérieur. Plus récemment, les industriels réfléchissent à développer des processus industriels alternatifs autour de la fabrication additive, pour des pièces de grande taille, des assemblages complexes ou des séries plus importantes. Il est important de comprendre ici que les pièces produites par fabrication additive présentent un aspect brut et que de nombreuses étapes de finition comme un traitement thermique, une opération de sablage, un réusinage ou encore un dépôt de revêtement sont nécessaires. Les principaux bénéfices de la fabrication directe sont les suivants ¹³ :

- Au niveau de la conception, il est désormais possible de fabriquer des pièces très complexes sans problématique de coût ou de mise en forme (moulabilité, usinabilité) et d'ajouter des fonctions aux pièces pour réduire les étapes d'assemblage. Une véritable flexibilité¹⁴ de conception est apportée pour générer plusieurs variantes d'une même pièce ou un produit non homogène ;
- Au niveau de la fabrication, cette flexibilité se traduit par une possibilité de fabriquer des pièces très différentes sans outillage et sans réellement dégrader les performances de production. Cela permet d'envisager une production plus réactive et plus proche du lieu d'utilisation des pièces.

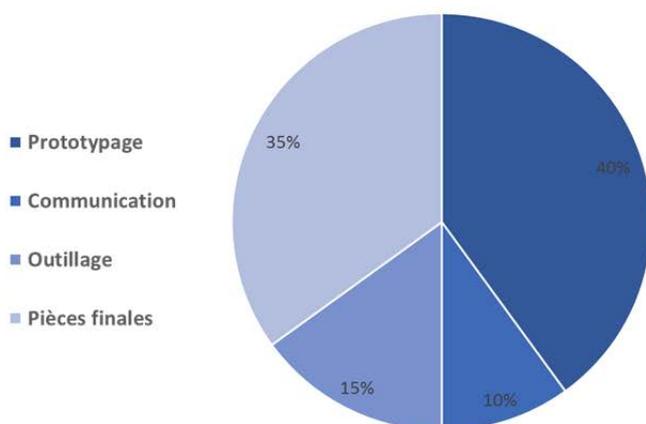
Encouragés par la baisse régulière du prix des machines, les petits et grands industriels ont pu se familiariser avec la fabrication additive dans le prototypage rapide notamment. Ce segment, qui consiste à fabriquer des pièces non fonctionnelles pour valider un concept ou un design lors des premières phases de développement d'un nouveau produit ou comme outil d'aide à la vente, est jugé mature aujourd'hui par les acteurs de la filière. Si les applications en prototypage rapide affichent une progression de l'ordre de 5 à 10 % par an, l'enjeu porte désormais sur la production de pièces fonctionnelles de qualité uniforme et sur de plus gros volumes. Avec une croissance de près de 50 % par an, le volume des pièces de production a aujourd'hui rattrapé celui des prototypes et des maquettes de démonstration sur le marché français. « Le prototypage représente aujourd'hui 40% des projets, les objets destinés à la communication 10 %, les pièces finales comptent pour 35 % et les outillages 15 % » complétait Sébastien Vercryse, le PDG de Creatix3D dans l'Usine Nouvelle¹⁵.

¹³ Fabrication additive : du prototypage rapide à l'impression 3D, C.Barlier, A.Bernard, Dunod, p4.

¹⁴ La flexibilité du travail est l'un des moyens permettant à une entreprise de s'adapter aux évolutions de sa demande et de son environnement. Cette flexibilité est une des composantes de sa réactivité industrielle.

¹⁵ Impression 3D, la discrète révolution, Usine Nouvelle n°3453, p31.

Répartition des projets par type d'application



Évolution de la part (%) de la production directe de pièces

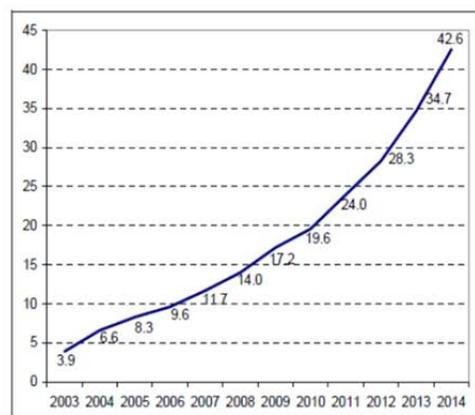


Figure 2 : Répartition en volume des applications de la fabrication additive (gauche) et évolution de la part en valeur de la production directe de pièce (droite)¹⁶

Une tendance confirmée dans le rapport Wohlers 2015 qui observe que l'utilisation de la fabrication additive directe comme outil de production continue à croître et représente 42,6 % du total des revenus des produits et services de fabrication additive en 2014. Le principal moteur de cette croissance est l'arrivée à maturité des technologies qui permet de passer de la R & D à la production de composants. Les obstacles pour les entreprises qui se lancent sont encore nombreux dans la mesure où il reste d'importants efforts à fournir en termes d'optimisation du design, du matériau en adéquation avec le procédé et l'application ciblées.

Malgré une maturité grandissante des acteurs, beaucoup de pièces sont encore fabriquées sans changement de design ou de matière première et restent la plupart du temps invisibles aux yeux des utilisateurs. En effet, la plupart des industriels ne sont pas prêts à fabriquer des pièces dites critiques, par exemple, en aéronautique. Aujourd'hui, les technologies de fabrication additive ne permettent pas de répondre à tous les besoins et doivent faire l'objet d'une étude de faisabilité technico-économique au cas par cas par rapport aux procédés conventionnels. Certains acteurs ont bien conscience de cette situation et mettent en garde contre le risque d'explosion d'une « bulle impression 3D » lié à une volonté de tout produire par fabrication additive ou une surestimation de la qualité des pièces produites par ce biais. Si la technologie n'est pas prête pour de la production en grande série, elle est de plus en plus considérée comme un maillon de l'écosystème productif en complément des autres méthodes de fabrication dans un objectif d'augmentation de la productivité¹⁷ et des marges.

Organisation du marché de la fabrication additive

Désignée comme terme officiel normalisé de l'industrie (ASTM F2792¹⁸), la fabrication additive définit le processus d'assemblage de matériaux, généralement couche par couche, en vue de fabriquer des objets à partir de modèles 3D, par opposition aux méthodes de fabrication soustractives. Cette notion couvre un ensemble de technologies et de procédés qui s'appliquent à différents matériaux tels que les polymères, les métaux ou les céramiques et dont la maturité a permis de développer un certain nombre d'applications commerciales à valeur ajoutée. Les termes « impression 3D » ou « impression tridimensionnelle » sont fréquemment utilisés comme synonyme, notamment par les médias, le grand public ou les pouvoirs publics.

¹⁶ Impression 3D, la discrète révolution, Usine Nouvelle n°3453, p31.

¹⁷ En économie, la productivité entend mesurer le degré de contribution d'un ou de plusieurs facteurs de production (facteurs matériels consommés ou facteurs immatériels mis en œuvre) à la variation du résultat final dégagé par un processus de transformation. La productivité est en lien avec les notions de rendement, d'efficacité, et d'efficience.

¹⁸ ASTM International Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies ASTM F2792-12a.

Un marché mondial d'environ 19 milliards de dollars en 2020

Poussé par une maturité grandissante des utilisateurs et une multiplication des usages, le marché de la fabrication additive connaît une croissance rapide qui a tendance à s'accélérer au cours des dernières années. En effet, les ventes de machines, de consommables et de services associés ont connu une croissance annuelle moyenne de près de 27 % au cours des dernières années. Véritable indicateur de cette accélération, ce même taux a atteint 33,8 % sur la période 2012-2014¹⁹ et démontre l'engouement des industriels et des organisations pour ce marché porteur rendu plus accessible du fait de la péremption de certains brevets majeurs. Fin 2014, le marché mondial de la fabrication additive était évalué à plus de 4 milliards de dollars en valeur par les cabinets Wohlers Associates et AT Kearney²⁰, un montant qui ne prend pas en compte les investissements réalisés par les industriels, probablement cachés ou en cours.

Les prévisions en ce qui concerne la croissance de la fabrication additive à l'horizon 2020 varient grandement selon les sources et oscillent entre 11,7 et 21,2 milliards de dollars. En parallèle, le cabinet d'études Canalys et la société américaine International Data Corporation envisagent des accélérations beaucoup plus marquées avec un marché en valeur estimé à 16 et 21 milliards de dollars respectivement dès 2018. Ces chiffres sont sans doute optimistes et intègrent vraisemblablement les retombées secondaires telles que les moules, matrices et outillages divers ou les pièces produites grâce à ces outillages.

Source	2014	2018	2020	CAGR(%)
AT Kearney	4,5Md\$	11Md\$	17,2Md\$	25 % (2014-2020)
Canalys	3,8Md\$	16,2Md\$		43,7 % (2013-2018)
Crédit Suisse	3,6Mds\$	8Mds\$	11,7Md\$	21,7 % (2014-2020)
IDC	8,66Md\$	21,02Md\$		27 % (2014-2018)
Wohlers	4,1Md\$	12,7Md\$	21,2Md\$	31,5 % (2014-2020)

Tableau 1 : Analyse des différentes prévisions concernant le marché mondial de la fabrication additive en 2020²¹
^{22 23} (CAGR : taux de croissance annuel cumulé)

La fragmentation actuelle du marché mondial de la fabrication additive se traduit par une multitude d'acteurs de taille relativement modeste tout au long de la chaîne de valeur qui comporte les activités suivantes :

- Fabrication de matières premières telles que les filaments thermoplastiques, les poudres métalliques ou encore les formulations céramiques ;
- Développement de sous-systèmes tels que des sources lasers, plasma ou à faisceau d'électrons, des logiciels de pilotage et de contrôle du processus de fabrication ou des gaz qui seront souvent intégrés dans les machines de fabrication ;
- Fabrication, commercialisation et maintenance de machine de fabrication additive. Ces acteurs sont souvent positionnés à plusieurs niveaux de la chaîne avec une offre large ;
- Développement de logiciels destinés à la modélisation 3D des pièces, conversion dans un format de fichier compatible, simulation, génération de supports ou encore optimisation topologique²⁴, qui sont utilisés lors des phases de conception. On peut également citer ici les applications métiers proposées par certains éditeurs, offreurs de services ou fabricants de machines par exemple pour la segmentation d'images médicales 3D (tomographie, IRM, échographie, microscopie) ;

¹⁹ Wohlers Report 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry 2015.

²⁰ 3D Printing: A Manufacturing Revolution, AT Kearney 2015.

²¹ Worldwide Semiannual 3D Printing Spending Guide, International Data Corporation 2016.

²² 3D printing market to grow to US\$16.2 billions in 2018, Canalys.

²³ CRÉDIT SUISSE: 3D Printing Is Going To Be Way Bigger Than What The 3D Printing Companies Are Saying, Business Insider 2014.

²⁴ L'optimisation topologique consiste à trouver la répartition de matière idéale dans un volume donné soumis à des contraintes. Elle se distingue de l'optimisation de forme qui ne fait varier que la frontière de la pièce.

- Fabrication de pièces : cette étape peut être réalisée par un gros équipementier en interne, un sous-traitant industriel qui fabrique les pièces sous contrat ou encore par des fournisseurs de services *via* des boutiques en ligne ;
- Prestations de services associées : cette catégorie regroupe un grand nombre d'offres telles que la formation, le conseil sur l'intérêt ou non d'utiliser la fabrication additive par rapport aux procédés conventionnels ou les services d'ingénierie pour mieux concevoir la pièce ;
- Utilisation finale de la pièce ou d'un équipement comportant des pièces fabriquées de façon additive par un professionnel ou un particulier.

Il convient de préciser que de nombreux acteurs ont fait le choix d'élargir leur offre afin de générer des ventes plus ou moins régulières en complément de leur cœur de métier. On peut ici prendre l'exemple des fabricants de machines qui commercialisent en parallèle de la matière première, des logiciels ou encore des prestations de services associées. À noter également que l'activité de recyclage de la matière première présente également un rôle fort dans la chaîne de valeur mais est jugée comme quasiment inexistante aujourd'hui. En effet, la filière de recyclage sur les matières spécifiques à la fabrication additive n'est pas structurée, ce qui entraîne des pertes d'importance, avec un impact direct sur le coût de la matière.

Une étude récente du cabinet Roland Berger²⁵ estime que la vente de logiciels, de pièces et de services associés (formation, ingénierie, conseil) représente aujourd'hui plus de 50 % du marché mondial de la fabrication additive. À cela s'ajoutent les 30 % issus des machines de fabrication et 20 % de la matière.

Les machines de fabrication métal : une expertise européenne

À l'occasion de la conférence Inside 3D Printing organisée à Séoul en juin 2015, le consultant spécialisé Terry Wohlers a pu livrer une analyse intéressante sur les répartitions en volume et en valeur des ventes de machines grand public et professionnelles. Sur les 152 400 systèmes commercialisés dans le monde en 2014, les imprimantes de bureau de moins de 5 000\$ représentaient plus de 91 % du marché en volume, soit 139 500 unités²⁶. Une segmentation qui se trouve inversée lorsque l'on analyse les ventes en valeur puisque ce sont les machines industrielles de fabrication additive qui dominent le marché avec 86.6 %, soit près d'1,1 milliard de dollars, contre 173,3 millions pour les imprimantes de bureau. Favorisée par l'expiration du brevet sur le dépôt de fil en 2012, la technique d'extrusion de filament (FDM) est aujourd'hui la plus répandue dans le monde dans la mesure où elle est également l'une des plus accessible.

Si les machines dites industrielles englobent de nombreux procédés tels que la photopolymérisation, la projection de matière ou de liant, la fusion ou le frittage laser sur lit de poudres, il convient de noter que de nombreuses imprimantes de bureau sont achetées par des utilisateurs professionnels dans les domaines de l'aérospatial, de la médecine, des biens de consommation. Terry Wohlers estime par ailleurs que le marché des imprimantes de bureau sera poussé par une demande grandissante au niveau des usages professionnels et académiques, bien plus que des usages grand public.

²⁵ Additive Manufacturing (AM) – Opportunities in a digitalized production, Additive Manufacturing European Conference Roland Berger 2015.

²⁶ Terry Wohlers Reports on the State of Additive Manufacturing at Inside 3D Printing Seoul, 3DPrint.com, 2015.

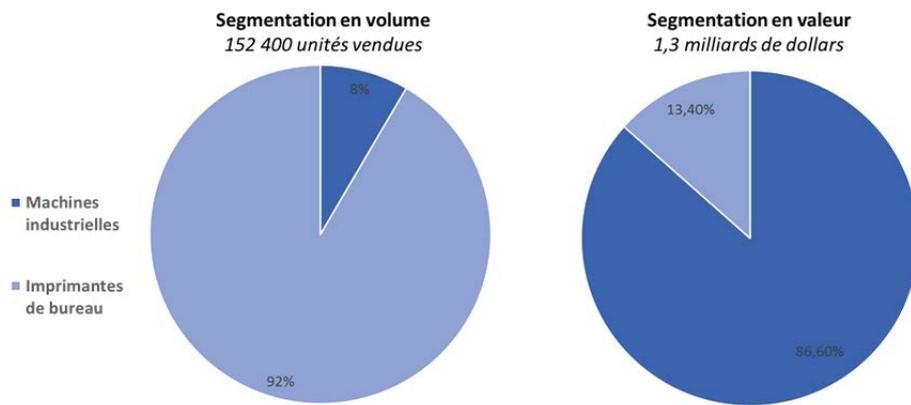


Figure 3 : Répartition en volume et en valeur des ventes de machines en 2014²⁷

Aujourd'hui, 40 % des machines de fabrication additive à usage professionnel sont installées en Amérique du Nord, 28 % en Europe et 27 % en Asie/Pacifique. Les États-Unis continuent à dominer le marché, le Japon, la Chine et l'Allemagne venant ensuite. Il convient de noter la position de la France qui ne représente que 3,2 % du parc mondial de machines. Selon Smithers Pira cependant, en 2025, la part de l'Amérique du Nord tombera à 34 %, l'Europe restera stable à 32 %, enfin l'Asie augmentera à 33 %²⁸.

L'étude menée pour le Conseil général de l'armement en 2015²⁹ a pu souligner l'orientation stratégique des États-Unis sur les équipements permettant la transformation de thermoplastiques, tandis que l'Europe, et plus particulièrement l'Allemagne, semble s'être positionnée sur les machines destinées à la fabrication métallique à l'image d'EOS, SLM Solutions, Concept Laser, Trumpf, Renishaw ou encore Arcam (Suède). Cependant, sous la pression insistante des grands donneurs d'ordres tels que la NASA ou Boeing pour les machines métal, la situation devrait rapidement évoluer aux États-Unis dans les prochaines années. Il convient par ailleurs de souligner la croissance rapide du marché des machines de fabrication additive métal, dont les ventes ont triplé depuis deux ans³⁰.

Les matériaux : un segment stratégique de 650 millions de dollars

« Les experts en matériaux sont les alchimistes du 21^e siècle³¹. Ils créent des composés miraculeux qui permettent de réaliser des choses qui semblent impossibles au premier abord ». Cette citation de Neil Glover, directeur de la division matériaux de Rolls-Royce, en 2015, démontre bien l'importance des matériaux dans l'évolution et le développement des technologies de fabrication additive. Depuis 2009, le chiffre d'affaires annuel généré par les ventes de matériaux de fabrication additive a été multiplié par trois pour atteindre près de 640 millions de dollars à la fin de l'année 2014. Actuellement, le marché est dominé par les photopolymères et les matériaux métalliques qui représentent respectivement 300 millions de dollars et 50 millions de dollars³². À noter l'augmentation vertigineuse des ventes de matériaux métalliques qui affichent un taux de croissance annuel moyen de près de 50 %, contre 30 % pour les photopolymères.

²⁷ Terry Wohlers Reports on the State of Additive Manufacturing at Inside 3D Printing Seoul, 3DPrint.com, 2015.

²⁸ The Future of 3D Printing to 2025, Smithers Pira, 2015.

²⁹ L'impression 3D : porte d'entrée dans l'industrie du 21^e siècle, Joël Rosenberg, Conseil général de l'Armement, Pascal Morand, CCI Paris Île-de-France, Dominique Turcq, Institut Boostzone, pour le CGARM, 2015.

³⁰ Enjeux et Perspectives de la Fabrication Additive, Association Française du Prototypage Rapide, Octobre 2015.

³¹ Materials scientists are the alchemists of the 21st century, The Telegraph, 2015.

³² Les matériaux : chiffres, descriptif et standardisation, A3DM Magazine, n°1 p27.

Le cabinet IDTechEx pousse l'analyse un peu plus loin en estimant qu'une multiplication des usages des techniques de prototypage rapide et le passage à la production de pièces finies devraient favoriser la croissance des poudres thermoplastiques et métalliques qui atteindront près de 50 % du marché mondial des matériaux en 2025. Selon les estimations, les photopolymères³³ et les filaments thermoplastiques³⁴ devraient afficher un léger recul en termes de part de marché sur la période 2015-2025.³⁵

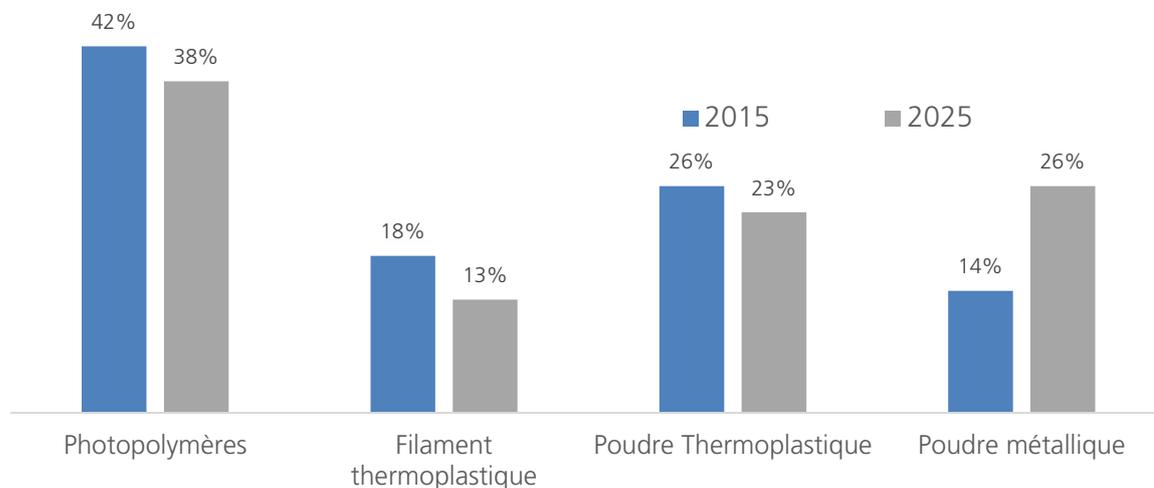


Figure 4 : Estimation des parts de marché en % des principaux matériaux en 2015 et en 2025³⁶

Les faibles volumes actuels et les adaptations nécessaires à apporter aux procédés de fabrication de matière première pour être compatible avec la fabrication additive font que les prix des matériaux au kilogramme sont bien plus élevés que ceux utilisés pour les méthodes de fabrication conventionnelles. Cette observation est indépendante du matériau ciblé à l'image de la poudre de titane vendue par Arcam 185 \$ par kg ou du prix de la matière plastique compris entre 175 et 250 \$ par kg contre 2 à 3 \$ par kg pour les thermoplastiques standards destinés au moulage par injection (sous forme de granulés).

Afin de compléter cette première analyse du marché international de la fabrication additive, le chiffre d'affaires généré par les ventes de logiciels, de pièces et de prestations associées a atteint en 2014 près de 2,1 milliards de dollars, ce qui représente plus de 50 % du marché global en valeur. Des segmentations plus fines estiment la part des ventes de logiciels et des services d'ingénierie, de conseils et de formation à 20 % en valeur du marché mondial, soit près de 820 millions de dollars. Après déduction, celle de la production de pièces par les équipementiers ou les différents sous-traitants industriels est d'environ 30 % en valeur, soit près de 1,23 milliard de dollars.

³³ Un photopolymère est une substance synthétique qui subit une transformation moléculaire sous l'action de la lumière.

³⁴ Une matière thermoplastique désigne une matière qui se ramollit d'une façon répétée lorsqu'elle est chauffée au-dessus d'une certaine température, mais qui, au-dessous, redevient dure.

³⁵ 3D Printing Materials 2015-2025: Status, Opportunities, Market Forecasts, IDTechEx 2015.

³⁶ 3D Printing Materials 2015-2025: Status, Opportunities, Market Forecasts, IDTechEx 2015.

ANALYSE DE LA DEMANDE

Ce chapitre dresse un état des lieux en France et à l'échelle internationale de l'usage des technologies de la fabrication additive dans les principaux secteurs des filières industrielles de production, des services et de la consommation. L'analyse effectuée met notamment en avant les difficultés associées à l'émergence de normes et de standards, ainsi que le degré d'acceptation de la technologie au sein des différents marchés.

Après avoir présenté l'usage et le potentiel envisageable de ces technologies au sein des principaux marchés d'intérêt, l'analyse a été segmentée en deux grands axes que sont la demande dans les technologies professionnelles et celle au sein des services et du commerce à travers son adoption par le grand public.

Introduction

De nombreux secteurs industriels se penchent sur les nouvelles technologies de fabrication additive, dont notamment l'aérospatial, le médical, l'industrie, le bâtiment ou encore l'automobile. Ces secteurs représentent plus de 60 % du marché de la fabrication additive, avec des taux de croissances de 15 à 25 % pour les cinq prochaines années, selon le cabinet Wohlers. En dehors de ces principaux secteurs industriels, d'autres domaines sont émergents avec un potentiel de croissance d'intérêt, à l'image de la joaillerie et de l'énergie, avec moins de 20 % de parts de marché cumulés actuellement, mais près de 30 % de potentiel de croissance sur les années à venir.

Secteur	Volumes et parts de marché (2014)	Taux de croissance annuel moyen à 5 ans
Aérospatial	0,8 \$Md – 18 %	15-20 %
Production et outillage industriel	0,8 \$Md – 18 %	15-20 %
Santé	0,7 \$Md – 15/17 %	20-25 %
Automobile	0,5 \$Md – 12 %	15-20 %
Joaillerie	0,5 \$Md – 12 %	25-30 %
Energie	Moins de 5 %	30-35 %
Autres	Moins de 20 %	20-25 %
TOTAL	4-5 \$Md	25 %

Tableau 2 : Quelques chiffres clés sur les marchés à l'échelle mondiale³⁷

³⁷ Sources : Wohlers Report, SmartTech Markets, Crédit Suisse. A.T. Kearney analysis.

Au niveau des principaux secteurs industriels d'application des technologies de fabrication additive, les applications futures et émergentes sont différentes selon les besoins et contraintes spécifiques à chaque secteur :

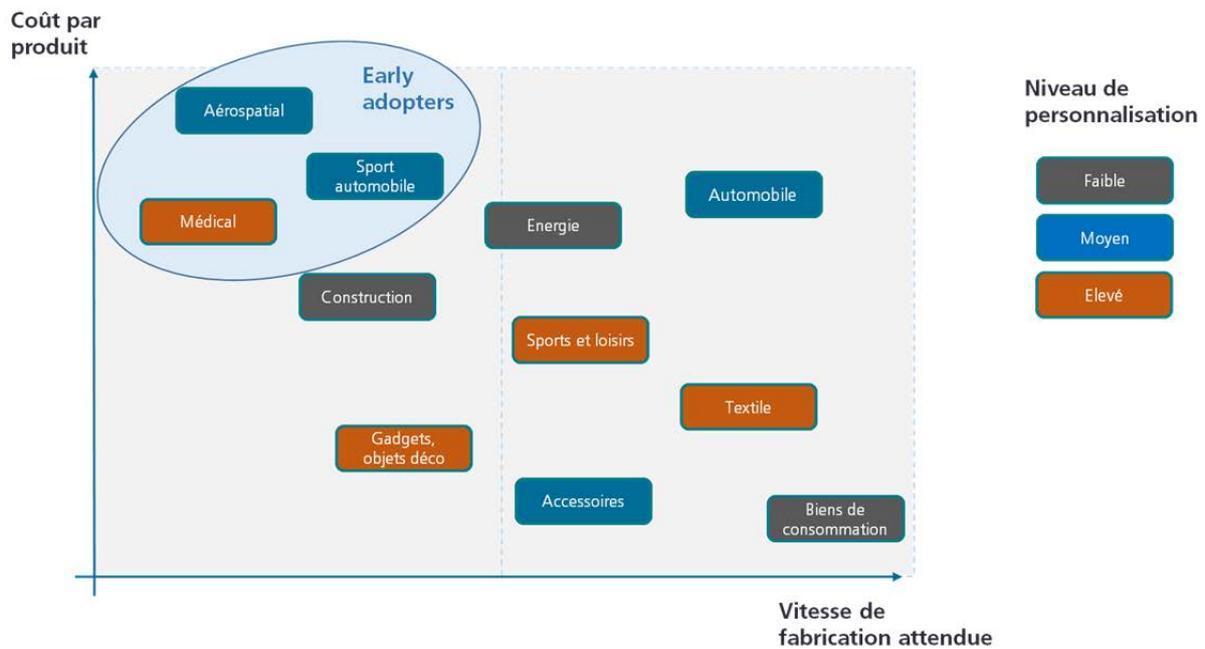
- Automobile et industrie manufacturière :
 - o Consolider plusieurs composants au sein d'une seule et même pièce complexe ;
 - o Créer de l'outillage de production ;
 - o Produire des pièces de rechange et des composants ;
 - o Accélérer le cycle de développement produit grâce au prototypage rapide, et aux tests de forme et d'ajustement.
- Aérospatial :
 - o Créer des pièces à géométrie complexe non réalisables avec les méthodes traditionnelles ;
 - o Contrôler la densité, la rigidité et la propriété des matériaux de certaines pièces ; mais aussi appliquer ces propriétés sur l'ensemble d'une pièce ;
 - o Créer des pièces plus légères.
- Pharmacie/Santé :
 - o Planifier des chirurgies grâce à des modèles anatomiques précis réalisés à partir de scanners ou IRM ;
 - o Développer des implants ou prothèses orthopédiques sur-mesure ;
 - o Utiliser des modèles imprimés en 3D pour la formation médicale ;
 - o Bio-imprimer des tissus vivants pour le test de médicaments.

Selon les secteurs d'applications, les technologies de fabrication additive peuvent ainsi avoir des impacts très différents, et les usages d'aujourd'hui et de demain sont bien spécifiques à chaque secteur.

Ainsi, l'adoption et l'intégration de ces nouvelles technologies seront sensiblement différentes selon les secteurs, avec de nombreux facteurs à prendre en compte comme le coût³⁸ de fabrication par produit, la vitesse de fabrication nécessaire à une adoption massive, ou le niveau de personnalisation exigé. Cet exercice a été réalisé par Frost and Sullivan (voir Figure 5 : Premier niveau d'analyse de la capacité d'adoption des technologies de la fabrication additive par secteur). Bien qu'il faille le prendre avec du recul, il a le mérite de positionner les différents secteurs vis-à-vis de leur potentiel d'adoption de la technologie.

Ces facteurs sont cependant loin d'être exhaustifs, et l'analyse de la capacité d'adoption et d'intégration d'un secteur déterminé pour les technologies de la fabrication additive est un exercice à part entière, qui ne peut être réduit à l'évaluation de quelques facteurs. La fabrication additive implique en effet de nombreux enjeux autour des procédés de fabrication. La phase actuelle d'intégration sera révélatrice d'applications insoupçonnées à l'heure actuelle. Les développements étendent ainsi progressivement le champ d'application de ces technologies.

³⁸ Un coût est la mesure, de la dépense ou de l'appauvrissement d'un agent économique, associé à un événement ou une action de nature économique, et exprimé généralement sous forme d'un prix ou d'une valeur monétaire.



Source: Frost and Sullivan The Rise of 3D Printing

Figure 5 : Premier niveau d'analyse de la capacité d'adoption des technologies de la fabrication additive par secteur

Applications de la fabrication additive dans l'industrie

Aéronautique, spatial et militaire

Taille du marché

Les technologies de fabrication additive conviennent assez naturellement au secteur de l'aéronautique, connu pour être *leader* sur le développement de technologies de pointe en matière de fabrication et de matériaux. Les applications d'impression 3D dans le secteur de l'aéronautique étaient ainsi estimées à 800 M\$ en 2014 selon le cabinet Wohlers. Cela représentait notamment 14,8 % du marché de la fabrication additive en 2014. Le cabinet Wohlers prévoit un taux de croissance de ce segment de marché entre 15 et 20 % sur les cinq prochaines années, lui permettant ainsi d'atteindre un volume de 2,6 Md\$ en 2020.

C'est donc sans surprise que les secteurs de pointe que sont l'aéronautique et le spatial ont fait partie des premiers à expérimenter les technologies de fabrication additive. Ces secteurs, ainsi que celui de la défense, demandent des productions de petites séries, proches de la pièce unitaire et la fabrication additive permet de s'affranchir de la conception et fabrication d'outillage spécifique. Au-delà de la petite série, certaines pièces du domaine de l'aéronautique sont produites en plus grandes séries, comme les supports de sièges par exemple. C'est ici un gain de masse qui peut être recherché dans l'objectif de réduire la consommation en kérosène des avions. L'industrie aéronautique reconnaît en effet aux technologies d'impression 3D la capacité de réduire le poids, le coût et la complexité de production de pièces, sans pour autant sacrifier la sécurité et la durabilité des matériaux. Bien que certaines applications soient déjà à l'état de production, nombreuses sont cependant encore au stade de démonstration. Ainsi, des composants comme les ailes ou le fuselage n'ont pas vocation à être imprimés en 3D pour le moment, mais des pièces telles que les charnières, les attaches ou des éléments de cabine

pourraient permettre de réduire de près de 7 % le poids d'un avion, avec un gain possible de plus de 6 % sur la consommation énergétique³⁹.

Tandis que les matériaux thermoplastiques s'affirment comme une solution de choix pour la production de certaines pièces de cette industrie, l'impression de métaux émerge progressivement en tant que véritable option pour les applications sensibles et critiques. Actuellement, l'un des principaux freins au développement dans ce domaine concerne la diversité des matériaux disponibles. Les fabricants de machines et les vendeurs de matière première ne proposent que quelques nuances (voire une seule) pour les différentes matières disponibles. Par exemple, les seules nuances d'aluminium disponibles sans développement spécifique sont des aluminiums AlSi10 et AlSi7. Les autres nuances d'aluminium utilisées couramment en aéronautique (Au4G, série 5 000, série 7 000...) ne sont pas proposées par les fabricants de machine.

Synthèse de la tendance globale et de l'intégration des technologies de FA

De par les enjeux associés, le secteur de l'aéronautique n'utilise que des technologies ayant fait leurs preuves et répondant aux normes de sécurité les plus drastiques. Le déploiement des technologies additives en lien avec la maîtrise des matériaux et de la chaîne d'approvisionnement est ainsi un processus progressif dans ce domaine. La chaîne d'approvisionnement française est en dessous des exigences de ces marchés, et manque encore actuellement de structuration.

Que ce soit pour les entreprises de maquettage-prototypage ou les entreprises de production mécanique, même si ces sociétés travaillent en lien étroit avec des donneurs d'ordres en phase de développement produit, peu sont intégrées dans la chaîne logistique⁴⁰ de l'aéronautique. Elles ne sont pas considérées comme assez robustes financièrement et assez fiables techniquement notamment parce qu'elles ne maîtrisent pas la métallurgie des poudres et n'ont pas les compétences requises.

AIRBUS considère que la production additive n'est pas envisageable en l'état sur des composants d'aérostructure en aluminium et ce, pour des raisons dimensionnelles, économiques et de qualification FAR 21⁴¹. Seules des productions en SAV de pièces non critiques sont envisagées.

Il semble nécessaire que la filière de fabrication additive s'appuie sur la chaîne d'usinage qui répond actuellement aux qualifications aéronautiques. Cependant, les donneurs d'ordres comme AIRBUS considèrent encore cet embryon de la filière française comme trop faible : ils consolident et utilisent des filières anglo-saxonnes et américaines.

Freins à lever notamment par la mise place de projets R & D

- Élaboration des matériaux :
 - o Développement de nouvelles nuances de poudres répondant aux caractéristiques aéronautiques pour l'aluminium,
 - o Amélioration de la « recyclabilité » des poudres polymères ;
- Amélioration des procédés :
 - o Instrumentation du procédé SLM⁴² pour garantir une répétabilité,
 - o Technologies de type CLAD⁴³ pour des pièces de grandes dimensions,
 - o Développement de traitements et de revêtements de surface sur cahier des charges aéronautique,
 - o Tribofinition⁴⁴ et état de surface de pièces métalliques.

³⁹ La fabrication additive, source d'économie pour l'aéronautique. 3D natives, 10 juin 2015.

⁴⁰ La chaîne logistique vise à garantir l'organisation et la qualité du service logistique en conformité avec les dispositions figurant au cahier des charges logistique.

⁴¹ Federal Aviation Regulations

⁴² *Selective Laser Melting*, voir Figure 77 : Solidification de poudre sous l'action d'une source d'énergie de moyenne à forte puissance.

⁴³ Construction laser additive directe, voir Figure 78 : Projection de poudre (ou fusion de fil) dans un flux d'énergie (laser ou plasma).

⁴⁴ Procédé qui permet de modifier l'état de surface et les arêtes de pièces.

Focus sur les développements actuels dans ce secteur de pointe :

Pour cette filière, il est important de faire une distinction forte entre les constructeurs/fabricants d'aérostructures et les équipementiers/motoristes :

- Constructeurs/fabricants d'aérostructures

Pour les constructeurs aéronautiques et leurs fabricants d'aérostructures, la fabrication additive possède un TRL⁴⁵ de l'ordre de trois à cinq. Les technologies les plus citées sont les procédés SLM, EBM, CLAD, et FDM.

- En l'absence de nouveau programme de développement d'aéronef avant 2017-2019 (ex. AIRBUS), l'ensemble des acteurs veut en profiter pour :
 - o Se recentrer pour « faire mûrir » les technologies, faire émerger de nouvelles nuances matières et les applications possibles ;
 - o Dynamiser et mettre en synergie des acteurs pour rattraper le retard français (laboratoires, IRT, etc.) ;
 - o Engranger de la connaissance.

- Équipementiers/motoristes

Pour les équipementiers/motoristes, la fabrication additive possède un TRL de l'ordre de sept à neuf. Les technologies les plus citées sont les procédés SLM, CLAD, EBM.

Les choix d'équipements et de motorisation sont du ressort exclusif des compagnies aériennes. Les équipementiers et motoristes ont donc tout loisir de proposer de nouvelles gammes de produits.

Compte tenu de leur maîtrise interne de la qualification de leurs produits, les motoristes auront plutôt tendance à aller de l'avant et vouloir utiliser au mieux ces technologies additives (ex. SAFRAN/LEAP)

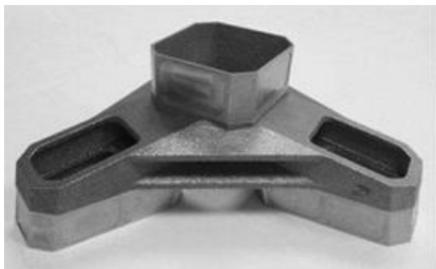
Différentes initiatives de recherches et expérimentations en cours ont été identifiées chez les grands donneurs d'ordres du secteur :

- o Airbus Group

Airbus teste depuis juin 2014 sur un de ses cinq appareils A350 d'essais des équerres de fixation en titane, ce qui attesterait d'un niveau de maturité de l'ordre de TRL 7. Ces pièces complexes qui ont connu une optimisation topologique ont été développées et produites en collaboration avec le Laser Zentrum Nord GmbH (LZN).

Airbus s'apprêterait à lancer une initiative pour la fabrication de pièces métalliques réalisées en alliage de nickel par ALM dès 2016. Les pièces en titane, sur lesquelles il reste de la recherche à faire dans le domaine des matériaux, devraient probablement être industrialisées à leur tour à partir de 2017.

En outre, maîtrisant ce procédé de fabrication avec l'acier et le titane Ti 6-4⁴⁶, le constructeur estime que d'ici à 2016 il pourra aussi fabriquer des pièces en aluminium par impression 3D. La figure suivante représente un injecteur d'air demandé par le bureau d'études d'Airbus Helicopters. Cette pièce a été réalisée en aluminium AS7G06, dans une machine XLine de Polyshape.



Airbus Defense and Space est parmi les premiers fabricants de satellites à avoir mis en orbite géostationnaire une pièce de fixation en alliage de titane sur le satellite de télécommunication ATLANTIC BIRD 7 en 2011. Le lanceur ARIANE 6 bénéficiera bientôt de ces optimisations de conception et le futur lanceur verra leur introduction systématisée autant que possible à tous les étages. La fabrication additive peut être utilisée dans la phase de prototypage, et éventuellement en phase de production dans une phase d'évolution du programme.

Airbus prévoit ainsi de fabriquer d'importants volumes de pièces par impression 3D à l'horizon 2018. La société travaille notamment avec le fabricant d'imprimantes 3D Stratasys⁴⁷.

⁴⁵ Technology Readiness Level

⁴⁶ Par ailleurs, Airbus a lancé un AOF en 2015 pour des pièces TA6V, AOF remporté par Prismadd et RTI (US).

⁴⁷ Airbus s'associe à Stratasys pour imprimer en 3D les composants de l'A350, 3D Natives, 11 mai 2015.

- Boeing

Boeing utilise le procédé de frittage laser depuis plusieurs années pour fabriquer plus de 100 000 conduits de conditionnement d'air pour des appareils militaires et civils. La société américaine a commencé à travailler sur le procédé, en recherche et développement, à partir de 1997, et les projets de recherche actuels concernent la réalisation de pièces en titane par EBM et EBF. Pour l'instant, il n'y a pas encore de pièces métalliques réalisées par fabrication additive sur les programmes Boeing en production. Il s'agit encore de pièces prototypes en cours de tests.

HRL le laboratoire de R & D commun à Boeing et GE a démontré récemment⁴⁸ la possibilité de réaliser des pièces tridimensionnelles par SLA à partir de monomères précéramiques de faible viscosité qui, après impression, sont convertis en céramiques (oxycarbure de silicium) par un traitement de pyrolyse. Cette amélioration ouvre la voie à la fabrication de pièces structurales alvéolaires complexes pour des systèmes de propulsion, ainsi que des applications dans les microsystèmes électromécaniques (MEMS) et *packaging* électronique.

- General Electric

GE a débuté fin 2015 la production de masse par ALM d'un injecteur de carburant destiné au réacteur LEAP développé par CFM International, le *joint-venture* entre GE Aviation et Snecma. Le nouvel injecteur réalisé par impression 3D est 25 % plus léger et cinq fois plus résistant que l'injecteur actuel qui est constitué de 21 pièces forgées. Par ailleurs ce nouvel injecteur offre une réduction de 15 % de la consommation de carburant et des émissions de CO₂ par rapport aux moteurs actuels.



La société espère ainsi produire plus de 100 000 pièces imprimées en 3D à l'horizon 2020⁴⁹. La société a par ailleurs investi 50 millions de dollars dans un centre d'impression 3D dédié à l'aéronautique basé à Auburn, dans l'état d'Alabama. L'installation permettra d'accueillir près de 300 salariés supplémentaires⁵⁰.

- Turbomeca

Début 2015, cette filiale de Safran a mis en place un équipement d'impression 3D dans son usine de Bordes, après plusieurs années de R & D. Cette unité de production permet de fabriquer les injecteurs de carburant du moteur Arrano des hélicoptères de 4 à 6 tonnes, ainsi que les tourbillonneurs de la chambre de combustion de l'Ardiden 3 conçu pour les hélicoptères lourds de 6 à 8 tonnes, par fusion sélective laser (SLM) d'un lit de poudres de superalliages à base de nickel⁵¹.

- Thales

Le français Thales a annoncé l'ouverture prochaine d'une usine spécialisée en fabrication additive métallique au Maroc. Cette initiative s'inscrit dans le Plan d'accélération industrielle 2014-2020 lancé par le gouvernement marocain qui vise à créer un large écosystème dédié à l'innovation en partenariat avec de grands groupes industriels et des acteurs locaux. L'utilisation de cette technologie permettra d'engendrer une réduction des délais de développement et de fabrication de pièces à haute valeur ajoutée en alliages métalliques complexes pour les domaines de l'aéronautique et du spatial. La construction de l'usine, implantée à Casablanca, démarrera dès 2016 avec une ouverture officielle prévue pour 2018. La création de cette usine viendra compléter des premières actions lancées par Thales et visant à maîtriser cette technologie au sein du groupe, notamment en France.

- United Launch Alliance (ULA)

La société ULA fabrique des lanceurs de fusées pour le compte de la NASA, de l'Air Force et de nombreux satellites commerciaux depuis plus de 50 ans. En collaboration avec le fabricant Strataysys, la société développe des procédés innovants pour la fabrication de pièces complexes intégrées dans les lanceurs de fusées. Pour un système de conditionnement d'air (ECS), la société a notamment réduit le nombre de composants de 140 à 16. La société envisage de porter à 100 la quantité de pièces imprimées en 3D embarquées dans les fusées de prochaine génération⁵².

⁴⁸ Additive manufacturing of polymer-derived ceramics - BY ZAK C. ECKEL, CHAOYIN ZHOU, JOHN H. MARTIN, ALAN J. JACOBSEN, WILLIAM B. CARTER, TOBIAS A. SCHAEGLER - SCIENCE01 JAN 2016 : 58-62.

⁴⁹ Additive Manufacturing Boost Aerospace Applications, IHS Engineering 360, 5 janvier 2016.

⁵⁰ General Electric investit \$50M dans un centre d'impression 3D dédié à l'aéronautique, 3D Natives, 16 juillet 2014.

⁵¹ L'impression 3D en série intègre les usines du français Turboméca, 3D Natives, 15 janvier 2015.

⁵² L'impression 3D fait décoller les fusées, 3D Natives, 28 avril 2015.

○ Pratt & Whitney

Le motoriste aéronautique canadien utilise la fabrication additive pour des applications de prototypage depuis plus de 25 ans. Récemment, la production en série est également concernée, pour une douzaine de pièces.

Pratt & Whitney s'est ainsi associé à l'université du Connecticut afin de créer le Pratt & Whitney Additive Manufacturing Innovation Center, doté d'un investissement de 4,5 millions de dollars pour faire progresser la recherche et le développement sur la fabrication additive⁵³.

Conclusions et enseignements :

- Le segment de l'aérospatial représente 14,8 % du marché de la fabrication additive en 2014 et est précurseur de l'expérimentation des technologies avec le médical ;
- Une croissance de marché évaluée à 15-20 % sur les cinq prochaines années, lui permettant ainsi d'atteindre un volume de 2,6Md\$ en 2020 ;
- Pour les équipementiers/motoristes, la fabrication additive possède un TRL de l'ordre de 7 à 9. Les technologies les plus citées sont les procédés SLM, CLAD, EBM. À l'inverse, la fabrication d'aérostructures de façon additive possède un TRL de l'ordre de 3 à 5 et est actuellement peu considérée pour des raisons dimensionnelles, économiques et de qualification. Les technologies les plus citées sont les procédés SLM, EBM, CLAD, et FDM ;
- Un potentiel de marché considérable mais qui devra attendre encore quelques années avant de voir voler des pièces reconçues par optimisation topologique du fait des phases longues et coûteuses de certifications. En attendant, la plupart des acteurs du secteur se sont positionnés sur ces sujets.

Automobile et transports

Selon une étude du cabinet SmarTech, l'impression 3D devrait représenter un marché de 1,1 milliard de dollars dans l'industrie automobile à l'horizon 2019⁵⁴, avec une croissance annuelle de l'ordre de 20 % sur les cinq prochaines années. L'industrie automobile a représenté 16,1 % du marché de la fabrication additive en 2014. Le secteur de l'automobile représente notamment 80 % du marché d'impression 3D sable. On y retrouve du développement de culasse et turbo avec des séries allant de 1 à 100 pièces. L'impression 3D s'applique également à la conception de pièces (pivots de roue) de fonderie innovante avec un design optimisé.⁵⁵ Les grands constructeurs automobiles ont investi dans des machines de fabrication additive peu après leurs mises sur le marché pour du prototypage ou du développement rapide de produits. Ces constructeurs continuent dans le domaine du développement de produits bien que les séries automobiles soient trop grandes pour leur appliquer la fabrication additive. En effet, les pièces imprimées en 3D à faible risque et haut rendement ont un impact massif, en particulier sur les outils de fabrication, avec des conséquences directes sur l'efficacité de la production. La capacité de produire des outils sur demande à un coût réduit permet ainsi d'accélérer de manière significative les temps de production, tout en offrant une capacité de personnalisation des outils, afin de créer des géométries complexes.

D'un point de vue général, le domaine des transports demande des cadences de production élevées : c'est notamment le cas pour l'automobile⁵⁶. Ces cadences de production freinent l'emploi de la fabrication additive pour la réalisation de pièces directes. Cependant, à l'image de

⁵³ Pratt & Whitney utilise la fabrication additive pour produire en série des pièces moteur, 3D Natives, 4 avril 2015.

⁵⁴ Le secteur de l'automobile, futur eldorado de l'impression 3D, 3D Natives, 2 janvier 2015.

⁵⁵ Wheel Mounts, Voxeljet. URL: <http://www.voxeljet.de/en/case-studies/case-studies/wheel-mounts/>

⁵⁶ La fabrication additive est appréciée des clients, notamment des constructeurs automobiles, non seulement pour l'allègement mais aussi pour la réduction de l'encombrement des pièces.

société comme Alstom dans le domaine des transports ferroviaires, les acteurs s'équipent progressivement afin de développer de nouvelles compétences dans le domaine de la fabrication additive (métal et polymère). La réalisation d'outillages incluant des canaux de régulation complexes pour l'injection plastique ou la fonderie est ainsi en train de s'installer dans ces domaines demandant des hauts taux de production. En effet, les outillages réalisés en fabrication additive permettent d'avoir une plus grande liberté dans la conception des canaux de régulation thermique dans les outillages et donc de réduire les temps de cycle tout en améliorant l'homogénéité thermique et donc la qualité des pièces fabriquées. Les polymères sont les matériaux les plus utilisés, par exemple pour des garnitures intérieures pour automobiles. La fabrication additive de pièces métalliques concerne essentiellement la compétition automobile ou la Formule 1 où les séries sont petites. La réalisation d'empreintes de moules « à bas coûts » en fabrication additive polymère est également envisagée par de nombreux industriels. Ces empreintes en polymère ne permettront pas d'obtenir des cadences élevées du fait du besoin de gestion thermique des outillages⁵⁷. Mais ces empreintes auront l'avantage d'être fabriquées en peu de temps, d'être bon marché et de pouvoir produire de petites séries de pièces (entre 50 et 100) en utilisant les bons matériaux.

Conclusions et enseignements :

- L'impression 3D devrait représenter un marché de 1,1 milliard de dollars dans l'industrie automobile à l'horizon 2019 avec une croissance annuelle de l'ordre de 20 % sur les cinq prochaines années ;
- En l'état, la fabrication additive directe ne peut pas répondre aux cadences et aux volumes de la filière et reste concentrée sur le sport automobile et le haut de gamme ;
- Pour cela, la pénétration de ces technologies sur ce marché est plus axée sur le prototypage de présérie, les outillages ou les dispositifs d'aide à la production (petit outillage interne) :
 - Le secteur de l'automobile représente notamment 80 % du marché d'impression 3D sable ;
 - La réalisation d'outillages incluant des canaux de régulation complexes pour l'injection plastique ou la fonderie est ainsi en train de s'installer dans ces domaines demandant des hauts taux de production.

⁵⁷ À savoir, liée à l'introduction de canaux de refroidissement pour empêcher les déformations et accélérer les cycles de production.

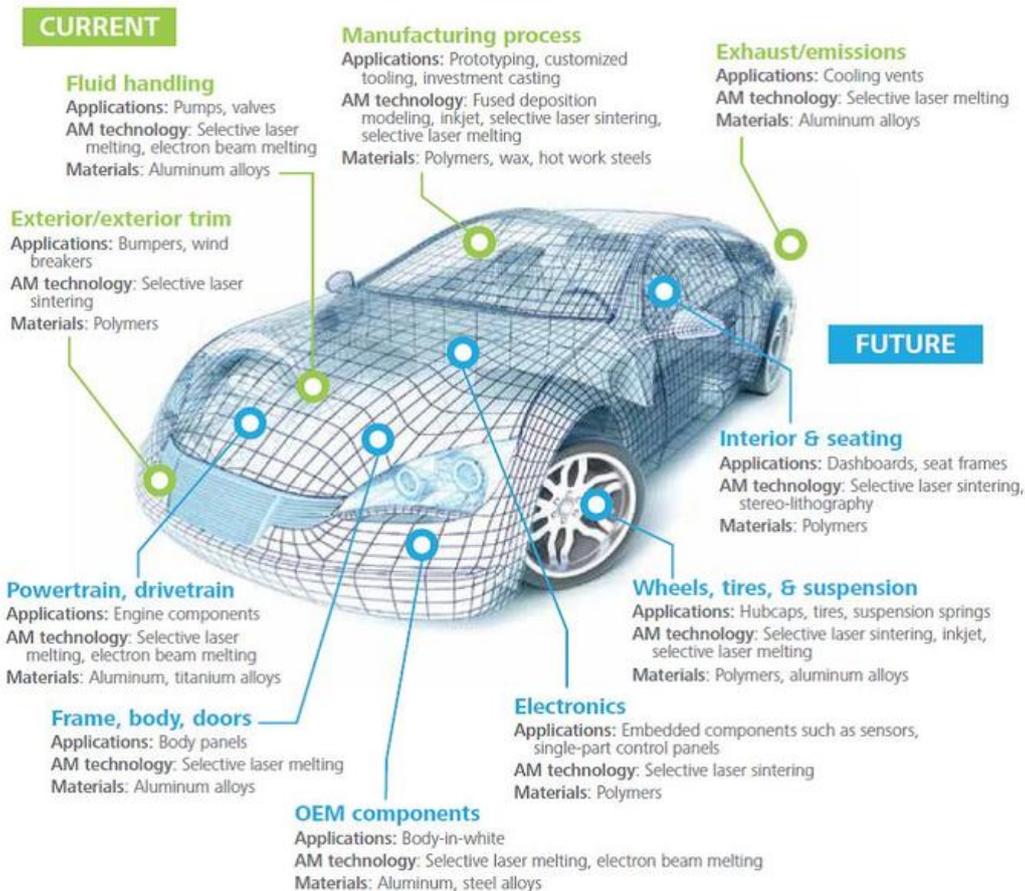


Figure 6 : Visualisation des applications actuelles et futures et la FA dans la filière automobile⁵⁸

Médical

Qu'il s'agisse d'hôpitaux, d'universités ou de laboratoires de recherche, nombreux sont les établissements médicaux à s'intéresser aux technologies d'impression 3D. Avec des utilisations toujours plus larges comme la fabrication d'implants ou d'orthèses sur mesure, la préparation d'interventions chirurgicales sensibles ou la recherche sur la création d'organes vivants, les exemples d'applications ne manquent pas. Le secteur médical et dentaire a ainsi représenté 13,1 % du marché de la fabrication additive en 2014. La taille du marché est estimée à près de 900 M\$ à l'horizon 2025⁵⁹. Le médical devrait représenter 25 % du marché de l'impression 3D d'ici 2020. Le nombre d'imprimantes 3D vendues chaque année à des professionnels de la santé devrait croître de 100 % pour atteindre le nombre de 2 200 unités en 2020⁶⁰. De son côté, le marché des matériaux d'impression à vocation médicale passera de 50 millions de dollars à 345 millions d'ici cinq ans.

La fabrication additive métal répond notamment bien aux critères des applications médicales : fabrication personnalisée, unitaire ou en petite série de produits à haute valeur ajoutée. La fabrication additive concerne ainsi plusieurs applications médicales :

- Implants médicaux ;
- Dispositifs médicaux implantables ;
- Dentaire ;
- Instruments chirurgicaux.

⁵⁸ 3D opportunity for the automotive industry, Deloitte University Press, 19 mai 2014.

⁵⁹ Infographie : L'impression 3D au service de la médecine, 3D Natives, 15 juillet 2015.

⁶⁰ Le médical, un secteur d'avenir pour l'impression 3D, 3D Natives, 19 février 2015.

Les capacités de la fabrication additive s'alignent avec les besoins du segment des dispositifs médicaux : augmentation de la personnalisation des produits, production et livraison plus efficaces et moins coûteuses notamment. Ces besoins servent en produit de faible dimension une population largement distribuée géographiquement de fournisseurs de services. La fabrication additive des dispositifs médicaux devrait ainsi impacter le secteur, en offrant la possibilité de lancer beaucoup plus vite des petites séries et en modifiant la *supply chain* et la distribution des produits. La satisfaction par la fabrication additive de contrôles qualité rigoureux et constants constitue un défi dans le secteur médical.

Focus sur les dispositifs médicaux :

Concernant les dispositifs médicaux (DM) fabriqués par fabrication additive, le marché des États-Unis était en avance de phase pour des ancillaires en 2010 et pour les implants en 2011. Aux États-Unis, les dispositifs issus de la fabrication additive sont régis par les mêmes voies que les dispositifs classiques. Les entreprises envisageant d'introduire un dispositif médical sur le marché américain ont besoin de faire une demande à la FDA, appelée 510(k). La FDA réglemente les dispositifs médicaux selon l'usage prévu, les indications d'utilisation et les caractéristiques technologiques dans un cadre fondé sur le risque, indépendamment du procédé de fabrication spécifique. Plus de 70 dispositifs médicaux par fabrication additive sont autorisés par la voie 510(k) aux États-Unis.

Ces informations sont à mettre en perspective avec le marché français où, à la connaissance du Cetim fin 2015, aucun implant fabriqué en série (hors sur-mesure) ne dispose d'un agrément d'organisme. Les applications détectées concernent principalement (pour les DM polymères) des ancillaires personnalisés et des implants métalliques. Les procédés de fabrication additive métalliques (LBM et EBM) sont utilisés pour l'instant pour la fabrication des structures type lattices qui permettent de favoriser la repousse de l'os. Les implants métalliques détectés dans la recherche concernent toutes les articulations principales : hanche, genou, épaule, rachis et pied. Dans le médical, ces technologies de fabrication additive se développent pour d'autres applications comme les médicaments et le tissu *engineering* pour essayer de reproduire le vivant (cellules ou organes) qui seront de nouveaux enjeux de développement et de qualification pour demain en France.

Les enjeux de la fabrication additive pour ce secteur sont :

- La personnalisation des ancillaires et des implants. La FA permet d'exploiter la chaîne numérique du scanner du patient pour la réalisation d'une pièce personnalisée ;
- La réduction des stocks : à terme, si ces procédés permettent de diminuer les temps de cycles de fabrication, les fabricants d'implants peuvent espérer réduire leurs stocks qui représentent une part importante de l'immobilisation de leur trésorerie ;
- La fonctionnalisation de surfaces : les structures trabéculaires⁶¹ permettent de fonctionnaliser la surface des implants pour favoriser la repousse osseuse ;
- Les matériaux : actuellement les technologies de fabrication additive permettent de produire des pièces dans des matériaux dont la nature chimique est similaire à des procédés traditionnels (Ti6Al4V, Co-Cr, PEKK, etc.), de nombreux chercheurs travaillent aujourd'hui au développement de matériaux se rapprochant des matériaux vivants (tissu *engineering*).

Concernant les DM on retrouve principalement des matériaux :

- Métalliques : alliages de titane et Co-Cr
- Polymère : polyamides, PEKK, ABS, PC et résines photopolymères
- Céramiques : HAP, Zircon.

Les procédés sur lit de poudres : fusion laser (*Laser Beam Melting*) et EBM (*Electron Beam Melting*) sont les plus utilisés pour la fabrication de DM.

⁶¹ Qui concerne les trabécules : fin prolongement qui se détache d'une paroi d'un tissu anatomique et fait saillie dans une cavité.

Material	Technology	Manufacturer	Tensile strength	Flexural strength	Heat Deflection	Sterilization	Medical Compliance
Duraform Polyamide	SLS	3D Systems	43 MPa	48 MPa	180°C	Autoclavable	USP Class 6 certified
Primepart	SLS	EOS	47 MPa	58 MPa	172°C		USP class 6 and EU 2002/72/EC
Polyphenylsulfone (PPSF)	FDM	Stratasys	55 MPa	110 MPa	189°C	1. Steam autoclave 2. EtO Sterilization 3. Plasma 4. Chemical 5. Radiation	USP Class 6 compliant
PolyCarbonate ISO (PC-ISO)	FDM	Stratasys	57 MPa	90 MPa	133°C	1. Gamma radiation 2. Ethylene oxide 3. Autoclave	certified ISO 10993 and USP class 6
ABS-M30i	FDM	Stratasys	36 MPa	61 MPa	96°C	1. Gamma radiation 2. Ethylene oxide 3. Low temp. steam	ISO 10993 certified
Renshape SL 7800	SLA	Huntsman	44 MPa	75 MPa	62°C (postcured)	- 75°C steam - 80°C Formaldehyde - gamma radiation - 55°C ethylene oxide	FDA approved
Somos Nanotool	SLA	DSM	61-78 MPa	100 MPa	225°C		FDA approved
Perfactory E-Shell 200/300	DLP	Envisiontec	57/51 MPa	103/88 MPa	109/ (86-160)°C		ISO 10993 certified

Tableau 3 : Exemple de matériaux polymères disposant d'un agrément pour applications médicales.
Source : Patient Specific Instruments : Past, Present and Future, Mahmoud A Hafez-2013

Focus sur les applications en orthopédie :

Le marché mondial de l'orthopédie représentait 34,6 milliards USD\$ en 2012, avec différentes applications selon la répartition suivante : rachis (23 %), genou (22 %), hanche (18 %), trauma et CMF (chirurgie maxillo-faciale, 18 %), orthobiologie (substituts de greffe, os de synthèse, facteurs de croissance, etc., 13 %), extrémités (4 %), autres (2 %). En 2014, il représentait 37 milliards USD\$ et les estimations annoncent 45 milliards USD\$ en 2020.

Les chiffres pour 2012 en Europe étaient les suivants :

- Environ 900 000 prothèses de hanches (~150 000 en France) ;
- Environ 700 000 prothèses de genoux (~77 000 en France) ;
- Environ 68 000 prothèses d'épaules (~14 000 en France).

Le premier secteur est celui des prothèses de genoux en raison du coût élevé des métaux utilisés (chrome-cobalt). Le principal moteur de croissance est l'augmentation de la population des plus de 65 ans. Le secteur de l'orthopédie est dominé par une dizaine de fabricants d'équipements originaux qui fabriquent des implants et des instruments pour 3,6 milliards USD\$ en interne et sous-traitent pour 4,1 milliards USD\$ à de nombreuses PME de taille moyenne.

La fabrication additive a pénétré le secteur de l'orthopédie depuis 15 ans et est maintenant mature : la société Zimmer a été la première en 1997 à utiliser cliniquement le métal trabéculaire dont la structure favorise la croissance des tissus biologiques sur la base du procédé de dépôt en phase vapeur pour le cotyle de hanche. La taille des pores (400 – 600 µm) permettait la croissance de l'os et la vascularisation. La fabrication additive a l'avantage de pouvoir réaliser des pièces complexes, de façon simultanée, en différentes tailles, formes et conceptions.

En termes de moyens de production, l'entreprise suédoise Arcam est le *leader* des machines de fabrication additive (procédé EBM de fusion de métal par faisceau d'électrons) utilisées pour ces applications avec 60 machines installées. Le marché italien est actuellement le plus avancé. La société Lima est en forte progression avec quelque 10 000 cotyles de hanche/an produits par plus de 10 machines EBM installées. Le secteur dentaire est aussi un secteur d'application des structures trabéculaires.

Conclusions et enseignements :

- Avec l'aérospatiale, le médical est l'un des secteurs précurseurs pour l'application des technologies de fabrication additive et représente 13,1 % du marché en 2014. La taille du marché est estimée à près de 900 M\$ à l'horizon 2025 ;
- La fabrication additive concerne ainsi plusieurs applications médicales : dispositifs médicaux implantables, secteur dentaire, instruments chirurgicaux... ;
- Intérêts exprimés pour la fabrication additive dans le médical (hors *bioprinting*) : personnalisation de masse, intégration de porosité ou de structures complexes, fabrication sur demande et réduction des stocks de certaines références de prothèses (hanches) ;
- Les matériaux les plus utilisés sont les matériaux métalliques implantables et biocompatibles (comme le chrome-cobalt, le titane pur, l'alliage Ti6Al4V, le 316L), les polymères (PEEK et PEKK principalement) et les céramiques.

Bâtiment

Réputé très conservateur, le segment du bâtiment et de l'architecture se positionne de façon secondaire avec 3,2 % du marché mondial de la fabrication additive, malgré un potentiel intéressant. Aujourd'hui, les rares initiatives en ce sens concernent de façon quasi exclusive l'utilisation du béton et visent à réduire les délais de réalisation d'un ouvrage ou d'un habitat. Des réflexions pourraient être menées auprès des acteurs de la filière granulat pour proposer des mélanges résines/sables mais cela reste relativement éloigné de ces applications. Les besoins exprimés dans le BTP sont multiples : réparation, fabrication d'un élément complexe en petite série pour un ouvrage d'art, construction rapide d'habitats d'urgences. La construction 3D permet ainsi de bâtir des maisons directement sur site, dans des délais très rapides, avec la capacité de s'affranchir des contraintes géométriques et de proposer des formes architecturales innovantes. L'essor de l'impression 3D dans le secteur du BTP ne fait que commencer, mais présente un potentiel disruptif sur les outils et les méthodes de construction actuelles, ainsi que sur les durées de réalisation des chantiers. Les barrières réglementaires à lever pour valider l'utilisation de ces technologies sont cependant très fortes.

En effet, il existe dans un premier temps un gros effort à fournir pour développer une formulation adaptée aux conditions de mise en œuvre par couche : à chaque nouvelle couche, il faut s'assurer que la couche inférieure ne s'affaisse pas grâce à une prise du béton plus rapide (accélérateurs de prise et adjuvants). Par ailleurs, la mauvaise connaissance de l'évolution du béton selon les conditions climatiques ou le lieu du chantier limite les usages à la fabrication d'éléments préfabriqués dans des entrepôts où l'atmosphère est contrôlée. Si la filière adopte une attitude prospective, les premiers usages concrets envisagés consistent à se servir de la fabrication additive pour réaliser rapidement des moules en résine et à moindre coût, pour couler un élément complexe en béton (le moule étant généralement détruit) ou encore à utiliser ce procédé pour fabriquer des peaux de coffrage qui seront ensuite utilisées comme isolants. Ce développement à court terme ressemble aux projets d'outillages rapides et permet de profiter rapidement des avantages de la technologie. À moyen terme, l'accélération du procédé et le développement de nouvelles formulations devrait permettre d'industrialiser la fabrication directe de sous-ensemble par fabrication additive, mais dans une atmosphère connue et maîtrisée. Enfin, une meilleure connaissance du comportement du béton pourra permettre de prédire les ajustements à apporter en fonction des conditions et du lieu de coulée et offrira une opportunité intéressante pour les utilisateurs de pompe à béton pour construire l'habitat ou l'élément directement sur site.

Conclusions et enseignements :

- Le segment du bâtiment et de l'architecture se positionne de façon secondaire avec 3,2 % du marché mondial de la fabrication additive, malgré un potentiel intéressant ;
- La pénétration sur ce secteur à moyen terme peut être évaluée de la façon suivante :
 - Court terme (2-5ans) : moules et peaux de coffrage en fabrication additive
 - Fabrication des moules en résine par fabrication additive pour couler des pièces complexes, réalisation de peaux de coffrages qui font ensuite office d'isolants et qui peuvent être enduites,
 - Possibilité de conserver une armature métallique pour renforcer la structure ;
 - Moyen terme (5-8 ans) : fabrication d'éléments préfabriqués en usine
 - Besoin de maîtriser davantage les propriétés du béton,
 - Accélération du processus de fabrication en atelier et d'assemblage,
 - Applications : corniches complexes dans les ouvrages d'art ;
 - Long terme (8-12 ans) : construction d'habitat directement sur site
 - Développement de plusieurs formulations pour s'adapter aux conditions climatiques,
 - Méthodologie pour affiner la paramétrie de production et la livraison du béton,
 - Problématique de certification et atténuation des effets « escaliers ».

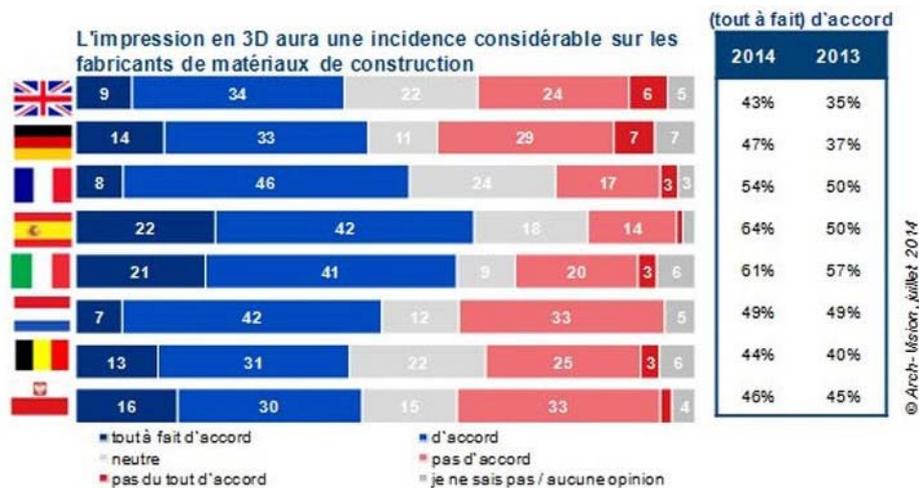


Figure 7 : Incidence de l'impression 3D sur les fabricants de matériaux de construction. Sources : « Tendances en design architectural et en technologie »

Énergie

Dans le domaine de l'énergie, la fabrication additive présente plusieurs freins. Pour les énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque...), la dimension des pièces à réaliser est souvent trop importante (plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres) pour les procédés de fabrication additive.

Dans le cas des énergies utilisant des matériaux fossiles, la fabrication additive a sa place dans la réalisation de pièces optimisées avec des géométries complexes internes (canaux de régulation

thermique intégrés directement dans les pièces) ou externes (optimisation de la forme globale de la pièce). ENGIE est en train de développer des compétences dans le domaine de la fabrication additive métallique. L'objectif sera à terme de réaliser des pales en aluminium ainsi qu'en superalliage pour les turbines terrestres. Pour les applications nucléaires, il est nécessaire d'atteindre un niveau de qualification et de certification important pour envisager l'emploi de pièces en fabrication additive pour des applications critiques. Le CEA travaille activement dans le domaine de la fabrication additive allant de la réalisation des matières premières jusqu'à l'optimisation des paramètres de fabrication.

Le secteur Oil & Gas a représenté moins de 3,9 % du marché de la fabrication additive en 2014. La liberté de création de formes géométriques et de structures creuses permises par la FA est favorable au développement de systèmes fluidiques (filtration, pompes, turbines, etc.) plus efficace du point de vue hydrodynamique. Cet avantage est exploité dans le secteur de l'Oil & Gas, et dans celui de l'énergie en général. Les technologies de fabrication additive s'adressant au marché de l'Oil & Gas sont la matérialisation numérique de pièces métalliques (ex. : ExOne) et le dépôt de métal par laser (ex. : Trumpf).

Le cabinet Lux Research⁶² envisage un potentiel limité pour l'impression 3D dans l'industrie du pétrole et du gaz au-delà de la phase de prototypage avec de fortes préoccupations quant à la responsabilité et la fiabilité des pièces réalisées par impression 3D.

Conclusions et enseignements :

- Pour le secteur de l'énergie au sens large, les principaux facteurs d'acceptation de la fabrication additive sont les suivants :
 - La possibilité de fabriquer des formes creuses et complexes (exemple : brûleur de turbine à gaz) ;
 - La fabrication rapide de prototypes ;
 - L'économie de matériaux coûteux (superalliages, aciers réfractaires) et difficiles à usiner ;
 - L'utilisation dans un lieu éloigné ou difficilement accessible ;
 - La possibilité de mettre en œuvre des moyens de réparation sur site ;
 - La possibilité de produire sur place des pièces à haute valeur ajoutée en remplacement de pièces d'usure importées à bas coût de production mais aux coûts de transport et de logistique élevés (pièces d'usure de forage fabriquées en Chine par exemple) ;
 - L'apport de nouvelles fonctions aux pièces (capteurs intégrés par exemple).
- En parallèle les freins majeurs sont les suivants :
 - Manque de directives en matière de certification ;
 - Bien que la fabrication additive métallique ressemble au soudage, absence de transférabilité des moyens de contrôle appliqués aux assemblages soudés, traditionnels aux pièces de fabrication additive ;
 - Malgré la résistance mécanique des pièces de fabrication additive, leur manque de ductilité et leur moindre résistance en fatigue ne permettent pas leur emploi dans les environnements sévères ;
 - Inaptitude de la fabrication additive à produire les pièces de grandes dimensions exigées par le secteur tant que n'auront pas été résolus les problèmes posés par l'augmentation de la vitesse du laser sans générer de défauts et le recyclage de la poudre.

⁶² What Kind of Potential Does 3D Printing Hold for Oil, Gas ? Rigzone, 27 octobre 2015.

Emballage

La fabrication additive génère de nombreuses opportunités d'utilisation dans l'industrie de l'emballage. L'utilisation en tant qu'outil de prototypage rapide reste cependant prépondérante⁶³. Par l'utilisation de solutions multiples d'emballage individuel, la conception d'emballage peut désormais être réalisée spécifiquement aux besoins du consommateur et aux caractéristiques du produit à emballer. De ce fait, l'approche est plus appropriée aux problématiques de *packaging* unitaires, et non à la production de masse, pour laquelle les techniques restent trop longues et coûteuses. Les techniques de fabrication additive conviennent ainsi bien pour satisfaire des requêtes individuelles, pour produire des emballages épousant au mieux les formes des objets⁶⁴.

Dans le domaine de l'emballage, le Cirtes a développé en partenariat avec La Poste un concept pour réaliser des colis sur-mesure de façon très rapide et directe à l'aide de la stratoconception. Le concept Pack&Strat® présente un vrai potentiel de marché, notamment pour les musées, les industriels qui souhaitent transporter des pièces fragiles ou à haute valeur ajoutée ou les grands noms du luxe. Il se déroule en plusieurs étapes :

- Importation du modèle CAO de la pièce à transporter ;
- Définition du volume d'emballage ainsi que du positionnement de la pièce
- Choix des zones de calage : possibilité d'éviter certaines zones fragiles de la pièce ;
- Choix du matériau d'emballage : carton, nid d'abeille...
- Choix du système de découpe des plaques : usinage, fil chaud...
- Empilement des strates et préparation du colis.

Plusieurs sociétés reconnues utilisent d'ores et déjà la fabrication additive dans le secteur de l'emballage :

- The Dial Corp utilise la fabrication additive afin de développer des emballages améliorant l'efficacité de la communication autour du produit ;
- Xerox Corp applique les principes de l'impression 3D afin de réduire les coûts des emballages thermoformés. La technologie utilisée permet ainsi de réduire considérablement le temps de production de certaines séries (1 à 2 jours contre 3 à 6 semaines auparavant).

Si l'impression 3D n'est pas aujourd'hui satisfaisante pour produire des prototypes fonctionnels de packaging de façon directe (technologies non adaptées, rendus peu réalistes), elle est utilisée depuis longtemps pour faire de la production indirecte par moulage cire perdue par exemple. Stratasys souhaite aujourd'hui développer une autre technique intéressante pour le marché de l'emballage grâce à sa technologie Polyjet d'Objet. Les moules produits sont suffisamment résistants pour soutenir une production de petite série selon le procédé de moulage soufflage et ainsi particulièrement adapté pour le prototypage rapide de bouteilles plastiques par exemple.

Conclusions et enseignements :

- Le segment du *packaging* fait partie des marchés jugés secondaires de la fabrication additive. L'utilisation de l'impression 3D directe reste cantonnée au prototypage rapide (accélération des cycles de développement et de validation) et aux acteurs du luxe ;
- Le procédé Pack&Strat® permet de réaliser un emballage de façon directe et très rapide en mousse polymère ou en carton ;
- Étant donné que la fabrication directe est rarement satisfaisante, on peut envisager l'utilisation de l'impression 3D pour produire des moules cire perdue ou polymères pour résister aux cadences de production de bouteilles plastiques par exemple.

⁶³ 3D printing adding a new dimension to cosmetic packaging, *Cosmetics Design*, 14 avril 2015.

⁶⁴ 3D printing in the packaging industry, *Interpack*, juillet 2015.

Fonderie – Moules – Outillage

Apparue au milieu des années 1990, la réalisation d'outillages par fabrication additive s'est largement répandue dans les domaines de la plasturgie et de la fonderie. En effet, la fabrication additive permet d'assurer une gestion thermique optimisée des outillages sans dégrader la résistance mécanique des empreintes. Les temps de production pour un outillage réalisé en fabrication additive ne sont pas beaucoup plus longs qu'en utilisant des méthodes de fabrication standard. La fabrication additive entraîne malgré tout un surcoût (évalué de 20 % à 30 % pour une empreinte de moule pour l'injection plastique) par rapport à des procédés de fabrication classique.

Les avantages de la fabrication additive restent cependant nombreux :

- Régulation thermique des outillages au plus proche des surfaces moulantes pour diminuer au maximum les temps de refroidissement ;
- Placement de canaux de régulation sur l'ensemble des surfaces moulantes pour garantir une homogénéité thermique lors du refroidissement des pièces de façon à limiter les distorsions différentielles dues à des refroidissements différentiels ;
- Utilisation de différents systèmes de canaux pour des systèmes chaud & froid par exemple.

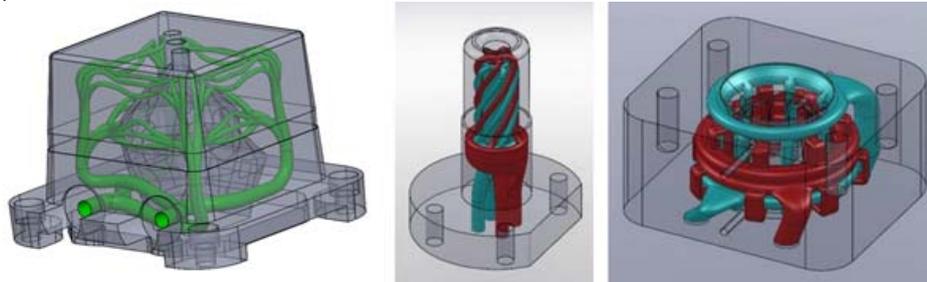


Figure 8 : À gauche : Empreinte OSOTO PEP, à droite Empreinte chaud et froid NEWPIN PEP

Pour que la fabrication additive puisse toucher des marchés demandant des qualifications et certifications, il est nécessaire de travailler avec l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement : matière première, *monitoring* en cours de fabrication, *postprocess*. La difficulté de la fabrication additive réside dans le fait que le matériau est créé en même temps que la pièce.

En ce qui concerne la fabrication des outillages de fonderie (plaques modèles, modèles permanents, boîtes à noyau, coquilles métalliques), il s'agit bien souvent d'un travail unitaire sur des formes complexes qui nécessite beaucoup de temps et d'argent. Les mises au point ou retouches peuvent être très pénalisantes en termes de productivité. La fabrication par couche d'un outillage prototype permet de valider très rapidement les techniques de conception. Les pièces coulées présentent alors tous les aspects fonctionnels du prototype technologique. De plus, la demande accrue pour les préséries de pièces « bonne matière » et « bon procédé » explique l'apparition de nouvelles techniques de production d'outillages rapides aptes à produire un moule prototype dans un délai de quelques semaines et à un coût nettement inférieur à l'outillage de production. L'outillage rapide par stratoconception est utilisé pour la fonderie : fonderie sable, fonderie *Lost Foam* et fonderie sous pression. Plusieurs aspects sont à prendre en compte aussi bien concernant les différentes phases de conception et réalisation des outillages que pour les gains et les apports obtenus par la réalisation des couches. Cette stratification permet, en particulier, l'intégration directe de canaux de refroidissement complexes, la gestion des gaz dans les outillages d'injection de polystyrène pour la réalisation de modèles perdus et le contrôle des outillages par capteurs embarqués.

L'impression 3D est d'un grand secours pour la fonderie lorsque des pièces doivent être reproduites et que le fondeur n'a plus ou pas de modèles (pièce trop vieille). Aujourd'hui les fondeurs et en particulier les fonderies au sable prennent le virage de la 3D (ALM sable).

Focus sur les applications de la fabrication additive en fonderie⁶⁵ :

- Fonderie cire perdue :
 - La technologie de projection de matière est particulièrement adaptée pour les applications en fonderie cire perdue ou modèle perdu,
 - Les machines Projet de 3D Systems et de Solidscape proposent des machines complètement dédiées à la réalisation de modèle selon ce procédé et peuvent notamment surfacer les couches déposées pour garantir une bonne précision dimensionnelle ;
- Fonderie sable :
 - Le frittage par laser (SLS, DMLS) de poudres à base de sable est arrivé il y a peu de temps sur le marché avec la particularité de réaliser directement le moule et le noyau en sable, sans passer par la réalisation de modèles ou de boîte à noyau,
 - Plus récemment, Voxeljet et Exone se sont positionnés sur ce segment porteur grâce au procédé de projection de liant. Cette technologie permet de réaliser rapidement des moules en sable de grandes dimensions (par opposition au frittage) ;
- Fonderie par gravité et sous pression :
 - La fabrication additive présente l'intérêt de mieux maîtriser les échanges thermiques à l'intérieur des outillages. Cela a pour conséquence d'améliorer la qualité des pièces et de diminuer les temps de cycles,
 - Le procédé de Stratoconception de Cirtes est utilisé majoritairement pour des applications en outillage rapide de ce type. Par ailleurs, les procédés de fusion sur lit de poudres (SLM, EBM) et par dépôt de matière sous flux d'énergie (DED) sont également en cours de développement sur ces applications afin de répondre aux fortes contraintes des outillages sous pression tout en laissant la possibilité de réaliser des formes complexes à l'intérieur du moule.

Focus sur les applications de la fabrication additive indirecte en plasturgie :

- Thermoformage :
 - À l'heure actuelle, le domaine est peu exploité par les procédés de fabrication additive,
 - Les moules sont soumis à des contraintes mécaniques et thermiques relativement faibles à l'instar des modèles en fonderie sable et sont réalisés en aluminium, résine ou mousse PU ;
- Injection soufflage :
 - Ce procédé génère également de faibles contraintes dans l'outillage et a déjà été utilisé pour produire des moules aluminium pour la fabrication de bouteilles d'eau minérale,
 - Enjeux : optimiser les cellules de refroidissement dans le moule pour plus de productivité,
- Moulage par injection :
 - L'intérêt de la fabrication additive pour ce segment a été renforcé par le développement de logiciels de simulation des échanges thermiques qui se produisent lors de l'injection,
 - À titre d'exemple, les projets FASTHER et OSOTO auxquels participe l'IPC démontrent l'intérêt d'une telle filière pour une production de série plus compétitive grâce à la fabrication additive.

⁶⁵ Dunod « Fabrication additive : du prototypage à l'impression 3D » C.Barlier, A.Bernard.

Conclusions et enseignements :

- La fabrication additive est particulièrement adaptée à la plasturgie et à la fonderie pour la réalisation d'outillages. Ces applications sont aujourd'hui parfaitement qualifiées industriellement et connaissent un véritable essor, ce qui laisse penser que le segment de l'outillage rapide est un segment porteur à court terme ;
- Intérêts principaux : réalisation de formes complexes dans les outillages de façon plus rapide et moins onéreuse que les procédés classiques d'usinage et de modelage, réalisation d'outillages « bon marché » lorsque le procédé génère des contraintes mécaniques et thermiques modérées, amélioration ou création de fonctionnalités internes pour augmenter la productivité et la qualité des pièces.

Analyse de la demande dans les technologies professionnelles

Une technologie en phase d'industrialisation

Afin de mesurer le niveau de maturité d'une technologie, la NASA et le Département de la défense des États-Unis ont développé un outil appelé *Technology Readiness Level* (TRL), en considérant que le niveau 1 correspond à un principe de base observé et rapporté, et le niveau 9 à un système réel éprouvé prêt pour la commercialisation. Par exemple, la production d'aubes de turbine monocristallines (arrangement cristallographique du métal identique dans toute la pièce et sans discontinuité pour plus de résistance au fluage) par fabrication additive se trouve à un niveau de maturité très faible situé entre 2 et 4 aujourd'hui. Inversement, l'utilisation de la technologie pour réaliser des pièces plastiques non fonctionnelles pour valider un design ou pour une application grand public est bien maîtrisée et présente un niveau de maturité proche de 9. Si le TRL de la fabrication additive varie sensiblement d'un marché à l'autre et d'une application à l'autre, le taux de maturité moyen des technologies associées se situe entre 4 et 7 et doivent aujourd'hui être validées pour une exploitation commerciale. Comme le rappelle un rapport du parlement britannique en 2012⁶⁶, les technologies entre 4 et 7 en termes de TRL se trouvent dans une zone critique appelée « vallée de la mort » et représentative de la difficulté à transformer un prototype en une technologie utilisable en production.

Une fabrication par ajout de matière par rapport aux autres procédés de fabrication offre de nouvelles opportunités non seulement technologiques mais également commerciales en transformant le modèle économique des utilisateurs. Si les avantages de la technologie sont nombreux et dépendent naturellement du contexte associé au produit à fabriquer, on peut retenir d'ores et déjà quatre critères relativement transverses à l'ensemble des applications et souvent cités comme les plus attirants :

- La liberté de conception : tant en termes de complexité géométrique, d'intégration de fonction au sein d'une pièce ou encore de matériaux, le fait de ne pas être contraint par un outillage ou par un brut⁶⁷ initial permet de repenser la conception des produits mécaniques existants et envisager de nouveaux usages pour de futures pièces ;
- La flexibilité : en l'absence d'outillages spécifiques et onéreux, la fabrication additive semble bien adaptée à la production directe de pièces en petites séries pour une réponse de type juste à temps ou pour réduire le niveau de stock ;

⁶⁶ Bridging the valley of death: improving the commercialisation of research, Science and Technology Committee 2012-2013.

⁶⁷ Bloc de matière avant usinage.

- L'efficacité énergétique : en ne déposant de la matière que là où c'est nécessaire (si on ne considère pas les supports), la fabrication additive offre la possibilité de réaliser d'importantes économies de matière et d'énergie ;⁶⁸
- La personnalisation : la flexibilité offerte par ce procédé présente l'avantage de pouvoir développer et fabriquer des produits parfaitement adaptés à la demande du client sans surcoût par rapport à une fabrication en série.

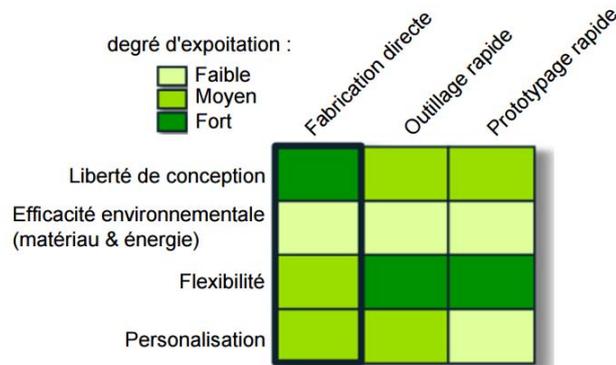


Figure 9 : Degré d'exploitation des opportunités pour les cas d'usages : fabrication directe, outillage rapide, prototypage rapide

En analysant l'état de l'art des pièces produites jusqu'à présent en fabrication additive, la liberté de conception semble être déterminante pour les applications en production directe de pièces tandis que ce sont surtout les opportunités offertes par la flexibilité du procédé qui dynamisent les usages en outillage rapide et en prototypage rapide. L'impact de la fabrication additive sur l'efficacité énergétique de la production semble être un critère secondaire en termes d'attractivité.

Une réduction du coût du cycle de vie plutôt que du coût de production dans la majeure partie des cas

Il est important de souligner qu'aucun industriel aujourd'hui n'implémente systématiquement la fabrication additive sans une analyse de faisabilité technico-économique détaillée par rapport aux procédés de fabrication traditionnels. Ces analyses ont pour objectif d'identifier les gains éventuels non seulement en termes de coûts de production mais aussi en termes de coûts du cycle de vie d'une pièce. Tandis que très peu d'acteurs reconnaissent un gain significatif en termes de coûts de production, le véritable avantage économique actuel de la fabrication additive se trouve sur la réduction des coûts tout au long du cycle de vie de la pièce.

- Dans le cas où l'objet à réaliser consiste en un assemblage complexe de plusieurs parties, demande un niveau important de personnalisation ou encore un volume de production très faible, l'utilisation de la fabrication additive permet de baisser significativement le coût de production comme c'est le cas pour la fabrication d'implants et de prothèses⁶⁹, de produits design personnalisés ou les applications dans le dentaire. Des contraintes élevées en termes d'outillage ou une part importante du coût de main-d'œuvre dans le prix unitaire peuvent également pousser les industriels à se pencher sur la fabrication additive pour profiter de la flexibilité apportée par la modélisation 3D ou éliminer le coût de l'outillage ;
- Inversement, de nombreux marchés d'application ne trouvent pas d'intérêt économique à la fabrication si on ne considère que l'aspect coût de fabrication du fait des économies

⁶⁸ Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres, R.Ponche, 2013.

⁶⁹ L'accès au marché de la prothèse chirurgicale semble être conditionné par le versement d'un droit d'entrée important et la fourniture d'une centaine d'exemplaires gratuits, qui peuvent décourager les entreprises candidates de petite taille.

d'échelles⁷⁰ apportées par les méthodes de fabrication traditionnelle. Cependant, dans les cas où le coût de maintenance⁷¹ et de réparation paraît élevé par rapport au coût de production ou que des pièces particulières impactent significativement les performances du produit final, c'est l'opportunité de réduire les coûts du cycle de vie *via* la fabrication additive qui attire les industriels. C'est ainsi le cas dans le domaine des moules et matrices ou de l'aéronautique.

Un cap à franchir : synthèse des principaux besoins

Malgré une croissance soutenue du marché, les acteurs et les utilisateurs de la fabrication additive s'accordent sur le fait que la maturité des technologies n'a pas été atteinte pour développer des modèles commerciaux rentables. De ce fait, la plupart des feuilles de route en faveur de la fabrication additive démontrent qu'il est nécessaire de réaliser de nombreuses avancées, tant techniques qu'au niveau des écosystèmes, afin de promouvoir sa valeur ajoutée pour la production de série et assurer par la même occasion sa diffusion dans l'industrie. En effet, si les principaux besoins exprimés concernent l'augmentation de la productivité des systèmes, la percée à grande échelle de la fabrication additive passera également par de nombreux autres facteurs.

L'augmentation de la productivité des machines, un besoin majeur et transverse :

- **Augmenter la vitesse de fabrication afin de réduire le coût de l'amortissement des machines** : Randy Reeves (directeur des opérations au sein de General Electric Appliances) expliquait en 2013 que « le principal enjeu économique de la fabrication additive repose sur le développement de machines plus rapides. Même si le prix de vente des systèmes de fabrication venait à diminuer, les cadences actuelles impliqueraient d'avoir une usine remplie de machines dès lors qu'on cherche à se rapprocher d'un volume de production significatif. Le marché n'a pas besoin de machines capables de transformer 40 g de titane en une heure, mais 40 kg en une heure tout en maintenant une certaine qualité et répétabilité du procédé ». En effet, avec une vitesse allant jusqu'à 48 mm/h pour du SLS, 14 mm/h pour du SLA ou 150 mm/h pour du FDM, l'impression de pièces reste un procédé lent qui peut prendre de plusieurs heures à plusieurs jours, faisant ainsi de l'amortissement des machines un poste de dépenses très important. Pour mieux comprendre comment augmenter la vitesse, il est fondamental de bien comprendre quels sont les différents facteurs qui l'impactent, à savoir la puissance du laser, l'épaisseur de la couche ou encore l'orientation de la pièce qui permet de minimiser la hauteur et donc réduire le temps d'impression. **Réduire le prix des machines n'est donc pas la priorité**, en revanche, atteindre une cadence de 80 cm³ par heure tout en améliorant la stabilité du procédé permettrait aux industriels qui produisent de forts volumes de franchir un cap dans l'implémentation de la fabrication additive⁷². Ces améliorations passeront alors par une multiplication du nombre de lasers et le développement de techniques de production quasi continue en réduisant les temps de chargement de matière, de démarrage de la production.
- **Fabriquer une structure complète d'un seul coup grâce à des chambres de fabrication plus volumineuses** : par exemple, la fusion laser sur lit de poudres reste aujourd'hui limitée à un volume de 600 par 400 par 500 mm pour la fabrication additive métallique, ce qui bloque le développement de structure complète en un seul passage.

⁷⁰ Une économie d'échelle correspond à la baisse du coût unitaire d'un produit qu'obtient une entreprise en accroissant la quantité de sa production.

⁷¹ Le coût annuel de la maintenance, de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'euros pour moins de 10 machines, est élevé et incontournable afin de conserver la garantie du constructeur de machines. Ce point est considéré comme un frein important et méconnu.

⁷² Additive manufacturing, a game changer for the manufacturing industry, Roland Berger, 2013.

Ce besoin a notamment été exprimé dans les domaines du spatial et du ferroviaire où le développement de machines de fusion sélective par laser (SLM) d'un m³ pour la production de grandes pièces est particulièrement attendu. C'est aussi le cas des équipementiers de l'automobile qui imaginent à terme pouvoir fabriquer leurs panneaux de bord en une seule fois. L'augmentation du volume de production présente l'avantage de réduire une nouvelle fois le nombre d'étapes d'assemblage et d'ajouter de nouvelles fonctions à un niveau supérieur. Pour les industries qui ne recherchent pas forcément de pièces de grandes tailles, l'augmentation du volume de production présente l'avantage de pouvoir augmenter le nombre moyen de pièces par plateau et donc la productivité de l'équipement. Cependant, il convient de noter que le volume de production n'est pas considéré aujourd'hui comme facteur limitant mais plutôt comme un besoin secondaire à l'exception du marché de la construction qui bénéficie de machines spécifiques.

Paramètres	Tendance	Caractérisation
Vitesse de production	+++	La hausse des vitesses de production est notamment associée à l'introduction de nouvelles sources lasers, à l'optimisation de l'orientation des pièces, et à la réduction des étapes d'arrêt (chargement des poudres, étalement des nouvelles couches)
Prix des machines	+	Le prix des machines est jugé comme secondaire par rapport à la productivité. Le coût des machines pourrait ainsi augmenter légèrement, si le surcoût est compensé par les économies d'échelle apportées par le gain en cadence.
Volume de la chambre de fabrication	++	Le volume de la chambre de production n'est pas considéré comme un critère bloquant mais peut ouvrir à de nouvelles applications et offrir une meilleure productivité. Une augmentation du volume de la chambre significative à fiabilité du procédé constante.

Tableau 4 : Réduire le coût d'amortissement et réaliser des économies d'échelles par une meilleure productivité

Une volonté de produire des pièces de meilleure qualité grâce à une plus grande maîtrise du procédé

- **Garantir une pièce bonne matière grâce une meilleure gestion des paramètres de fabrication :** peu à peu, les machines de fabrication additive se font plus conviviales et proposent un accès aux paramètres de fabrication tels que la puissance du laser, la vitesse d'exposition ou la stratégie de production. Particulièrement appréciée, l'ouverture progressive des machines permet aux utilisateurs d'ajuster le procédé en fonction des problématiques rencontrées ou des spécificités de la pièce. Cependant, les contrôles en cours de fabrication tels que l'analyse de la température dans l'enceinte, l'asservissement de la puissance du laser ou l'étude de l'homogénéité du lit poudres ne sont pas systématiques alors qu'ils peuvent jouer un rôle important dans la qualité finale de la pièce. En effet, un des gros enjeux aujourd'hui repose sur l'amélioration du niveau d'intégration industrielle de la fabrication additive qui nécessite de nombreuses opérations de post-traitements (traitement thermique, usinage, rectification) et qui engendrent un délai et un coût supplémentaires. En effet, les surfaces fonctionnelles sont rarement satisfaisantes du fait de l'effet escalier apporté par des couches trop épaisses ou une résolution de la machine jugée trop faible. Ces derniers critères impactant directement le temps de fabrication et donc la productivité de la machine, il faut aujourd'hui trouver un compromis acceptable. Un autre besoin réside dans la nécessité de développer des post-traitements adaptés aux spécificités de la fabrication additive, intégrés à la machine afin d'obtenir en sortie de ligne une pièce directement utilisable.
- **Intégrer les opérations de contrôle qualité dès la fabrication :** les composants critiques pour la sécurité de l'utilisateur requièrent des analyses poussées des défauts éventuels de la pièce après fabrication. C'est notamment le cas dans l'aérospatial ou le

médical où les opérations de contrôle postfabrication représentent un poste de dépenses très important. En effet, la fabrication additive permettant de réaliser des pièces de plus en plus complexes à l'image des structures lattices, les technologies de contrôle de surface ne suffisent plus pour détecter les défauts internes et les poudres non fusionnées sur la structure interne de la pièce. Ces analyses sont aujourd'hui réalisées par tomographie à rayon X, une technique bien répandue mais qui peut parfois doubler le coût de revient de la fabrication additive. De ce fait, la demande des acteurs de la filière peut se décomposer en deux points :

- Premièrement, il serait judicieux de généraliser le contrôle *in situ* et en temps réel de la fabrication de chaque couche afin d'ajuster automatiquement les paramètres de la machine pour compenser les défauts en cours de production ou à *minima* de décider au plus tôt si la pièce doit être jetée ou non. En ce sens, Polyshape analyse une série de photographies prises à chaque couche tandis que le CEA List se penche sur le contrôle *in situ* temps réel par ultrasons lasers. Motivé par une demande insistante de ses membres, le Cetim travaille également sur le sujet par émission acoustique ;
 - Deuxièmement, il est important d'investiguer des méthodes de caractérisation alternatives à la tomographie⁷³ pour favoriser des contrôles réguliers à des coûts moins importants. Le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) est particulièrement actif pour répondre à ce besoin en travaillant sur des méthodes de mesures de masses volumiques grâce à un pycnomètre à gaz pour les structures lattices et en évaluant le potentiel de la tomographie térahertz pour les matériaux polymères et céramiques.
- **Cibler les critères prioritaires pour évaluer la conformité d'une pièce produite par fabrication additive** : la conformité géométrique et dimensionnelle, la résistance au choc, la tenue en fatigue et la résistance en traction et en flexion sont les critères jugés prioritaires pour évaluer la qualité d'une pièce. Cette analyse, réalisée en confortant les premiers retours du projet Sasam⁷⁴ avec la vision terrain d'acteurs de la filière, a pu démontrer que l'évaluation de la dureté, de la résistance en compression ou au cisaillement ainsi que du vieillissement sont considérés comme secondaires. Par ailleurs, la couleur ou l'apparence de la pièce n'est que très rarement citée, démontrant ainsi que la validation de concept par prototypage rapide n'est plus la priorité.

⁷³ Technique d'imagerie qui permet de reconstruire le volume d'un objet à partir d'une série de mesures effectuées par tranche depuis l'extérieur de cet objet.

⁷⁴ Support Action for Standardisation in Additive Manufacturing.

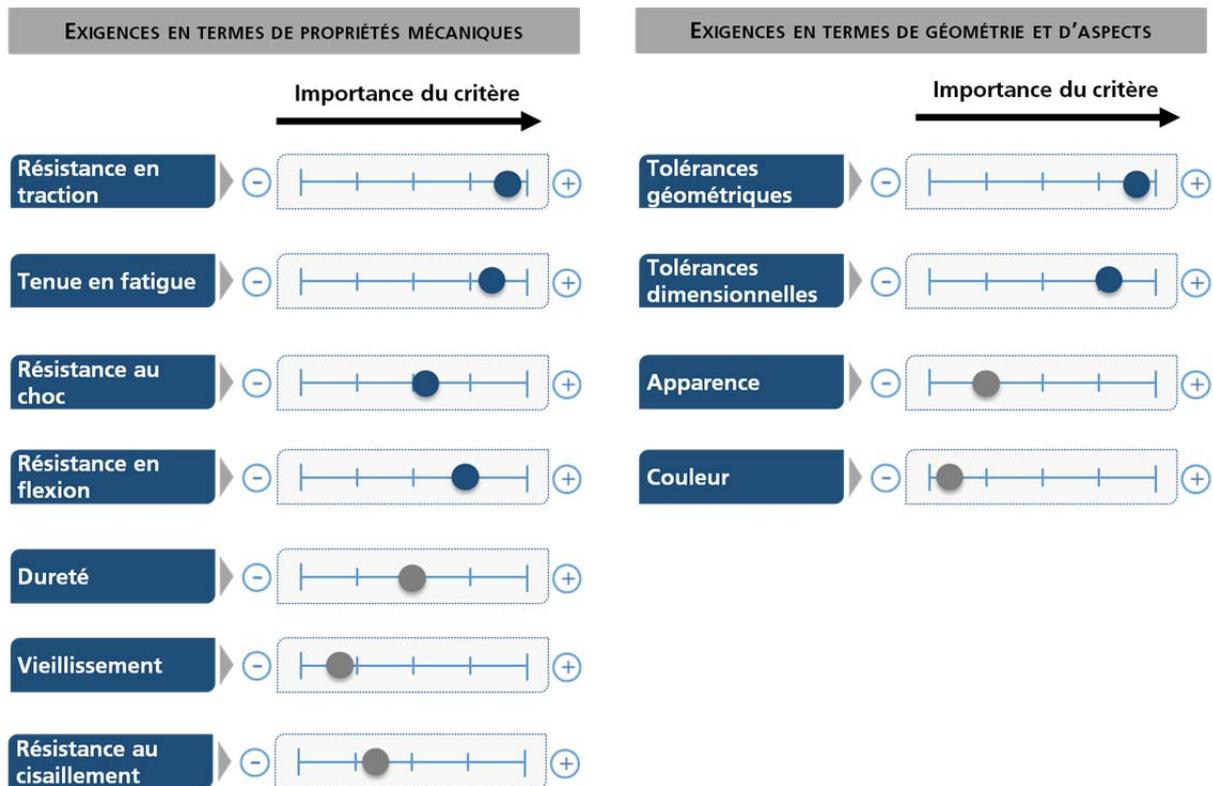


Figure 10 : Principaux critères d'évaluation de la conformité d'une pièce produite en FA⁷⁵

- **Une fiabilité du procédé jugée insuffisante par rapport aux procédés conventionnels** : que ce soit dans le domaine du ferroviaire, de l'automobile, du sport ou du médical, les acteurs interrogés ont souligné l'attention apportée à l'amélioration de la fiabilité de la fabrication additive. Un sujet qui pourrait d'ailleurs freiner la diffusion de technologie si aucune amélioration n'est observée à court terme. En effet, contrairement à d'autres industries, les équipementiers automobiles ne réalisent pas toujours de contrôles qualité sur certaines de leurs pièces et ont ainsi besoin d'avoir un procédé de fabrication au moins aussi fiable que l'injection pour avoir des pièces homogènes du premier coup. La principale raison à ce manque de répétabilité réside dans le fait qu'il s'agit d'une technologie qui n'est pas encore assez mature pour bénéficier de retours d'expériences ou de bonnes pratiques. Si des initiatives ont été lancées en ce sens à l'image du projet Karma⁷⁶ (Knowledge Assisted Rapid Manufacturing), il existe aujourd'hui peu d'outils d'aide à la décision, de bases de données ou de capitalisation de bonnes pratiques afin de diffuser l'innovation au plus grand nombre. Il s'agit notamment de développer des méthodologies « First time Right » basées sur l'exploitation des données des essais précédents (impacts de la puissance du laser, de la température de chambre, des caractéristiques du matériau...) afin d'obtenir directement des pièces conformes aux attentes. Un autre levier important à prendre en compte repose sur un certain manque en termes de simulation du fait d'une mauvaise compréhension relative des transformations associées à la fabrication additive (fusion, refroidissement, interaction laser-matière, contraintes résiduelles). L'objectif est d'être prédictif le plus possible de façon virtuelle afin d'ajuster les paramètres au plus tôt et assurer une meilleure fiabilité du procédé. Jusqu'ici, les utilisateurs de ces machines admettent avoir des difficultés pour prévoir si les pièces fabriquées auront les qualités requises.

⁷⁵ Évaluation issue de la compilation des différents retours des acteurs consultés.

⁷⁶ L'objectif du projet Karma était de développer une application d'aide à l'évaluation des paramètres de mise en œuvre d'une fabrication additive au regard du coût, de l'état de surface et du temps de fabrication.

- **Nécessité de capitaliser les données sur les pièces fabriquées :** Il est nécessaire de réaliser des bases de données sur les matériaux disponibles et sur leurs performances après fabrication additive. De tels référentiels communs et partagés par les différents acteurs de la filière devraient permettre de relier caractéristiques des matériaux, paramètres *process* et caractéristiques d'usage des pièces produites. Par ailleurs, les enjeux associés à une meilleure prévision de la précision de la géométrie, des microstructures et des performances du processus de fabrication sont les suivants : réduction du temps d'impression, optimisation des supports, aide au développement de nouveaux matériaux et à la paramétrisation du procédé. Par exemple, les supports placés selon la géométrie de la pièce à fabriquer font rarement l'objet d'un calcul de contraintes alors qu'ils peuvent impacter directement les coûts de finition ou les fonctionnalités de la pièce s'ils sont mal conçus ou trop nombreux. Une analogie avec le domaine des composites a pu être soulevée dans la mesure où la compréhension des lois de comportement reste limitée. En effet, ces comportements dépendent non seulement de la nature, mais aussi de l'épaisseur et de l'orientation des différentes couches et impliquent de travailler simultanément à l'échelle macroscopique et microscopique⁷⁷. De manière similaire, l'interaction entre les différentes couches est peu maîtrisée en fabrication additive et ne devrait pas l'être avant cinq ou dix ans selon certains retours. Encore au stade de recherche et développement, la simulation dédiée à la fabrication additive fait son apparition sur le marché à l'image de l'éditeur 3DSIM. Début 2015, 3DSIM présentait deux solveurs basés sur une nouvelle méthode de calcul par éléments finis pour simuler le procédé et le matériau.

Au vu de ces différents retours, la fabrication de pièces de sécurité dites « critiques » ou la production de gros volumes ne devrait pas être une réalité industrielle avant une dizaine d'années. L'augmentation de la productivité et de la fiabilité du procédé dans un contexte normatif facilité est particulièrement attendue pour développer les usages commerciaux de la technologie. Estimé à 3,14€/cm³ par le cabinet Roland Berger, le coût de production d'une pièce en acier inoxydable en fabrication additive métallique devrait être divisé par deux dans les cinq prochaines années et par trois dans les dix ans. Les différents paramètres considérés pour réaliser ce calcul sont compilés en annexe et permettent de mieux comprendre les coûts inhérents au procédé (les étapes de conception, de préparation du modèle 3D et de finitions telles que le grenailage ou le traitement thermique ne sont cependant pas inclus). Le marché devrait en effet évoluer pour s'adapter aux différentes demandes exprimées par les acteurs de la filière : les experts interrogés s'attendent ainsi à une multiplication de la vitesse de fabrication par quatre, une augmentation significative du coût des machines mais qui sera compensée par le gain de productivité, une baisse du prix de la poudre métallique ou encore de la part de *monitoring* ou du coût de *postprocessing* grâce à une plus grande fiabilité du procédé.

⁷⁷ Retour à la case départ pour les composites, L'Usine Nouvelle n° 3418_HSFR.

Forecast metal AM costs [EUR/cm³]

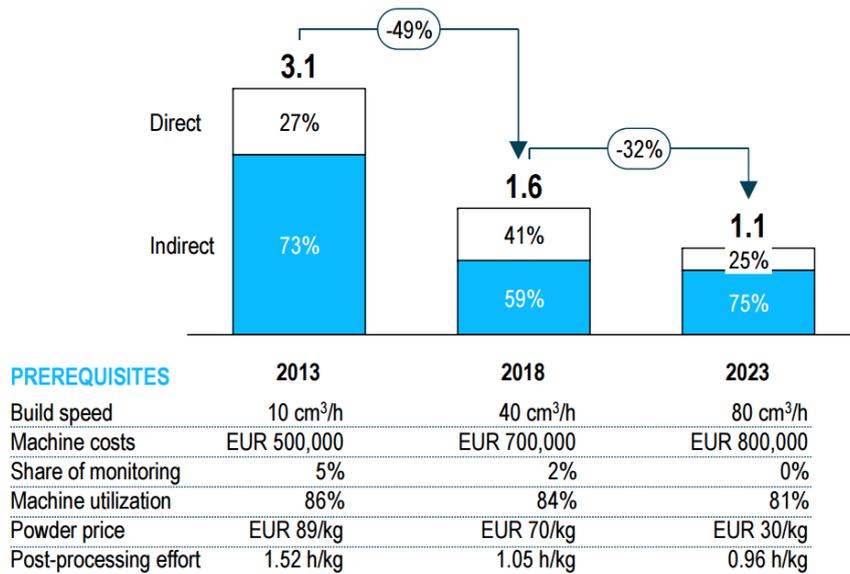


Figure 11 : Estimation de l'évolution du coût de production en fabrication additive métallique⁷⁸

Développer de nouveaux matériaux et en assurer l'accessibilité

- **Un besoin de consolider la filière amont des matériaux** : pour beaucoup d'acteurs, l'approvisionnement matière est fragile voire inexistant. En effet, la volonté de développer la fabrication additive pour de la production série implique un besoin de garantie supérieur auprès de son fournisseur pour sécuriser de gros volumes de fabrication souvent étalés sur plusieurs années. Le contrôle exercé sur les canaux de distribution ainsi que les volumes relativement faibles n'ont pas incité les fournisseurs de matière à investir massivement pour adapter leurs procédés ou développer de nouveaux matériaux pour la fabrication additive. Conscients de l'enjeu en termes de réduction du coût des matières premières et des risques liés à la garantie d'approvisionnement, les utilisateurs souhaitent que les fournisseurs tiers se développent sur ce segment. Aujourd'hui, même si la croissance à deux chiffres affichée par la fabrication additive ouvre les perspectives d'un marché futur important et attire progressivement les fournisseurs de matière, les utilisateurs finaux font aujourd'hui face à des délais d'approvisionnement plus importants. Une augmentation du nombre d'acteurs sur la filière amont est attendue pour générer une tarification plus concurrentielle et réduire le risque de s'affranchir des garanties appliquées aux machines. Si le coût des matières premières reste encore très élevé, la faible part du matériau dans le coût global de fabrication de la pièce a pu être soulevée. En effet, on peut estimer que même en divisant le prix de la matière par deux, le prix de la pièce ne sera pas impacté de manière significative, le véritable enjeu se situant d'avantage au niveau des capacités de production. En parallèle, la question du recyclage des poudres et des produits en fin de vie est également une problématique d'importance. Certaines poudres finissent notamment par s'user après plusieurs réutilisations. Compte tenu des directives européennes de recyclage en fin de vie (VHU, DEEE, etc.), la question de la facilité de recyclage des produits en fin de vie reste bloquante, par le manque de connaissance des compositions exactes notamment.

⁷⁸ Source : Additive Manufacturing (AM) – Opportunities in a digitalized production, Additive Manufacturing European Conference Roland Berger 2015.

- **Une volonté de gagner en maturité sur les matériaux existants :** il existe aujourd'hui un gap important entre ce qui peut être réalisé grâce à la fabrication additive par rapport à un procédé de fonderie conventionnel. En effet, il est encore fréquent qu'un fournisseur de matière soit sollicité par un industriel qui présente un cahier des charges précis en termes d'alliages mais spécifique à la fonderie de précision ou aux procédés de métallurgie conventionnels. Il existe ainsi un vrai besoin d'explication sur ce qu'est réellement le procédé d'atomisation et d'éclaircissement sur les matériaux équivalents. Par ailleurs, il semblerait que les industriels souhaitent aujourd'hui gagner en maturité sur les matières existantes plutôt que de se pencher sur le développement d'alliages innovants. En effet, la maturité des alliages existants n'est pas encore satisfaisante et implique de nombreux efforts en termes de caractérisation, de méthodologie de mise en forme ou de procédures de contrôle qualité. Les relations directes et indirectes entre les caractéristiques des poudres ou des résines sur les performances finales de la pièce sont encore mal connues. Le développement de normes et de procédures de mesures et d'essais associés devrait ainsi être approfondi pour simplifier les relations entre le fournisseur et l'utilisateur. En effet, il est par exemple nécessaire de pouvoir établir la traçabilité des matériaux à l'aide de certificats d'étalonnage (dimension des grains et distribution, forme, composition chimique, qualité des poudres non utilisées) ou d'évaluer les performances en traction ou en fatigue grâce à des éprouvettes. L'interchangeabilité des paramètres de fabrication d'une machine à l'autre serait également appréciée. Un autre point intéressant qu'il convient de soulever repose sur l'idée que l'on se fait qu'une pièce égale un matériau : il faut arriver à démontrer que ce n'est pas forcément le cas et surtout que ce n'est pas forcément une bonne chose. En effet, que ce soit une petite ou une grande pièce, il faut avoir les mêmes performances, peu importe la morphologie. Sur ce point, le contrôle du procédé n'est cité que comme une solution court terme au problème qui sera mieux résolu par une augmentation générale de la fiabilité.
- **Élargir les gammes de matériaux accessibles :** même si le besoin industriel court terme reste relativement éloigné des nouveaux matériaux comme le polyetheretherketone (PEEK) renforcé par des fibres de carbones continues dans les directions x, y et z, les biomatériaux ou les composites titane/zircone, la filière est demandeuse de gammes d'alliages plus étendues.

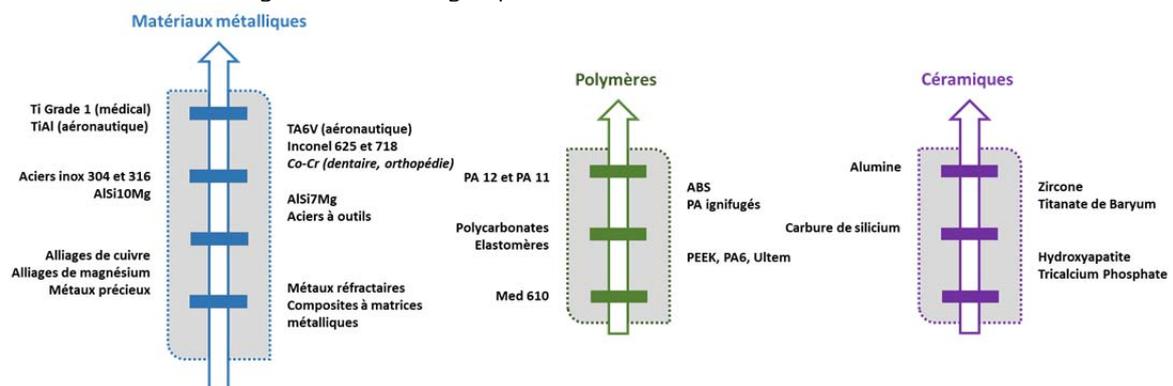


Figure 12 : Comparaison des niveaux d'utilisations des différents matériaux en fabrication additive⁷⁹

En effet, les gammes des matières utilisées pour la fabrication additive sont jugées trop étroites et les nouvelles mettent trop de temps à sortir en comparaison de la dynamique du secteur. Cette extension de la palette de matériaux devrait ainsi permettre d'ouvrir de nouveaux usages, augmenter la qualité des pièces et accroître la demande. En considérant les niveaux d'adoption des différents matériaux présentés dans la figure ci-dessus (plus le curseur est élevé, plus l'utilisation du matériau est courante en fabrication

⁷⁹ Evaluation issue de la compilation des différents retours des acteurs consultés.

additive), les alliages métalliques Co-Cr, TA6V, UT40, AlSi10Mg, Inox 316 et 304 et les Inconels 718 et 625 sont aujourd'hui relativement accessibles et bénéficient de nombreux travaux qui ont contribué à augmenter leur maturité pour des usages commerciaux. La filière aluminium affiche un léger retard qu'il semble important de rattraper dans la mesure où l'ensemble des matériaux n'a pas encore atteint le niveau de qualité attendu : il existe une volonté de sécuriser les alliages AlSi7Mg, notamment dans les applications spatiales, aéronautiques et automobiles et de développer des alliages d'aluminium qui présentent un coefficient de dilation thermique réduit. Par ailleurs, il existe tout un volet d'alliages pour lesquels il n'y a ni poudre ni paramètre : c'est notamment le cas des Inconel600, des aciers inox à haute limite élastique ou du type austéno-ferritique très utilisés dans le nucléaire. En ce qui concerne le domaine des céramiques, il n'existe pas de volonté des fournisseurs de matières premières d'adapter leurs procédés de fabrication pour adapter leurs produits à la fabrication additive. Les utilisateurs sont alors obligés de retraiter les poudres avant de développer les formulations céramique/organique spécifiques. Il y a donc non pas un élargissement de gamme à apporter mais une véritable filière d'approvisionnement à créer ici. En plus de cette phase d'industrialisation, de nombreuses innovations sont attendues à moyen et long terme et constituent actuellement l'objet de travaux de recherche. Ainsi, le premier prototype de machines de fabrication additive de verre est apparu dans les laboratoires du MIT⁸⁰, des encres à base de nanopétales de graphène sont développées à l'université de Northwestern⁸¹ et des projets de formulation de béton prêt à l'emploi sont lancés. De façon encore très théorique, les chercheurs se tournent aujourd'hui vers les composites hiérarchiques⁸², les matériaux à gradients de fonctionnalités⁸³ et l'optimisation des formulations matières multiéchelles.

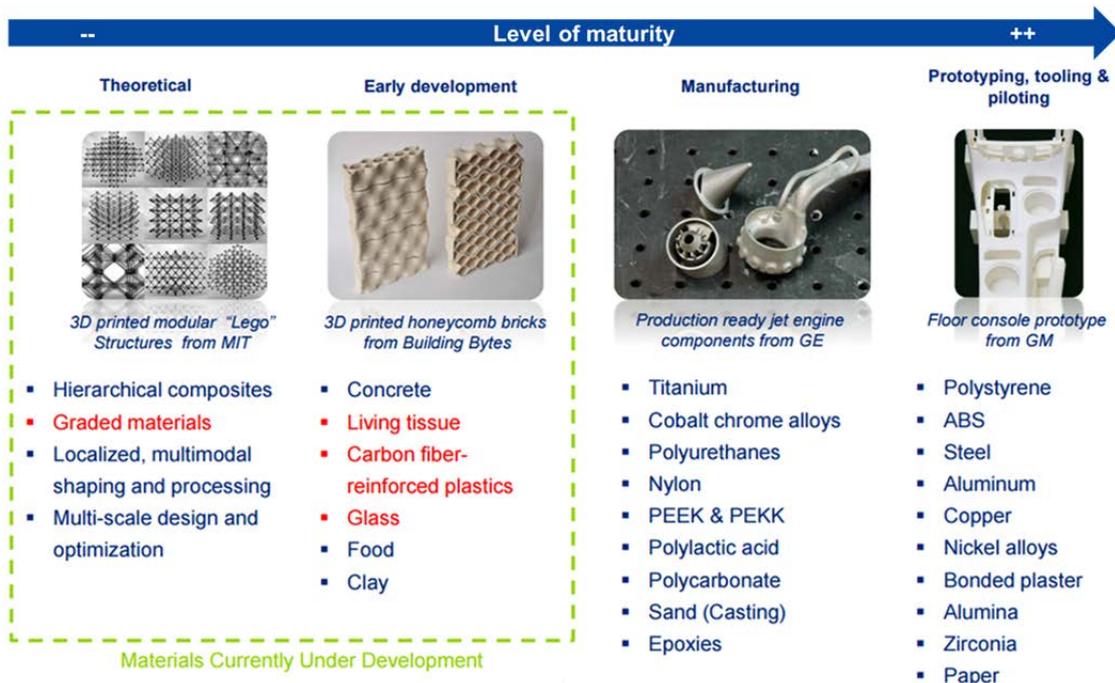


Figure 13: Aperçu du niveau de maturité actuel des différents matériaux⁸⁴

⁸⁰ Printing transparent glass in 3-D <http://news.mit.edu/2015/3-d-printing-transparent-glass-0914>.

⁸¹ Impression 3D : une nouvelle encre à base de graphène <http://www.futura-sciences.com/>

⁸² Assemblage de composants structurels.

⁸³ Combinaison de propriétés et de fonctionnalités introuvables dans des matériaux classiques.

⁸⁴ 3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth, Deloitte Services, Octobre 2014.

Un besoin de sensibiliser les équipes aux nouvelles approches de conception

- **Repenser le design des pièces existantes grâce à l'optimisation topologique :** alors que les industriels s'emparent progressivement des technologies de fabrication additive, beaucoup de pièces sont encore produites sans changement de design. Cette approche permet de réduire considérablement les pertes matières dans la mesure où on ne dépose que ce dont on a besoin plutôt que de partir d'un brut, mais ne profite pas pleinement des avantages de la fabrication additive. On observe une prise de conscience progressive sur le fait qu'un des véritables gains apportés par la fabrication additive repose sur l'optimisation topologique de ces mêmes pièces, la génération de structures lattices permettant de garantir une tenue mécanique avec moins de matière ou encore de formes organiques. Habités à utiliser la fabrication additive pour la validation de concept, de design ou de prototype, les bureaux d'études des utilisateurs industriels se situent aujourd'hui dans une phase de transition généralement accompagnée par les sous-traitants industriels ou les fabricants de machines qui ont bien perçu ce besoin d'accompagnement sur la partie design. Ce volet conception draine énormément de bureaux d'études indépendants qui veulent se positionner pour élargir leur offre de services et gagner de nouveaux clients grâce à la fabrication additive. Conscients que le choix de la fabrication additive n'est pas toujours pertinent, les industriels les plus matures redoutent tout de même une incitation excessive des bureaux d'études de fabriquer en impression 3D mais reconnaissent une réactivité supérieure lorsqu'ils recourent à des prestataires externes. Si la réindustrialisation des pièces existantes permet d'alléger considérablement les structures, d'intégrer des fonctions supplémentaires afin de réduire le coût et le nombre des étapes d'assemblages, il ne s'agit que d'une première assimilation de la fabrication additive.

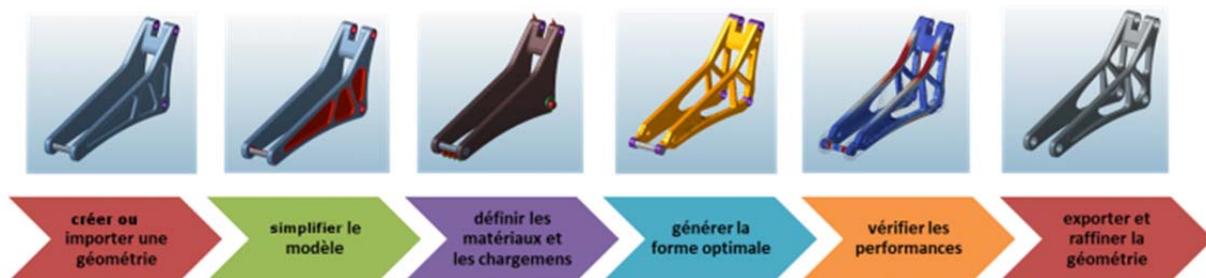


Figure 14: Optimisation topologique d'une pièce existante⁸⁵

- **Oser la complexité sans surcoût lors de la conception de nouvelles pièces :** la prochaine étape consiste à penser directement en fabrication additive lors de la conception de nouveaux produits, ce qui implique un recul bien plus important. Dans le domaine de l'énergie, on imagine déjà des applications pour réduire les pertes de charges dans les échangeurs thermiques ou les réseaux de tubes grâce à de nouvelles formes. Il est important de considérer le niveau de résolution qu'il est possible d'obtenir pour chaque technologie pour réaliser une pièce complexe. Par exemple, les procédés de dépôt de matière sont moins matures et présentent l'inconvénient de ne pas pouvoir adresser des géométries complexes avec précision. Cependant, les utilisateurs les plus avancés notent une certaine résistance au changement et une difficulté à assimiler cette approche chez les designers industriels habitués à concevoir des produits par rapport à des cahiers des charges associés aux méthodes de fabrication soustractive et d'assemblage. En effet, réfléchir en structures lattices, en formes organiques ou intégrer plus de fonctions dans une pièce sont des nouvelles règles de conception qui ne sont pas encore bien assimilées. Dans la mesure où la maturité de la filière sur ce point reste relativement faible, les utilisateurs industriels attendent de leurs différents prestataires de

⁸⁵ Inspire de solidThinking, Logiciel d'optimisation topologique, <http://www.digicad.fr/solidthinking-optimisation-topologique>

services un accompagnement poussé pour gagner en maturité sur ces sujets sans pour autant posséder d'expertise en interne.

Il y a une prise de conscience progressive des utilisateurs industriels qui prévoient de nombreux efforts dans leur feuille de route pour gagner en maturité. D'après les différents retours, la sensibilisation des acteurs se déroule généralement par étapes en suivant ce parcours type :

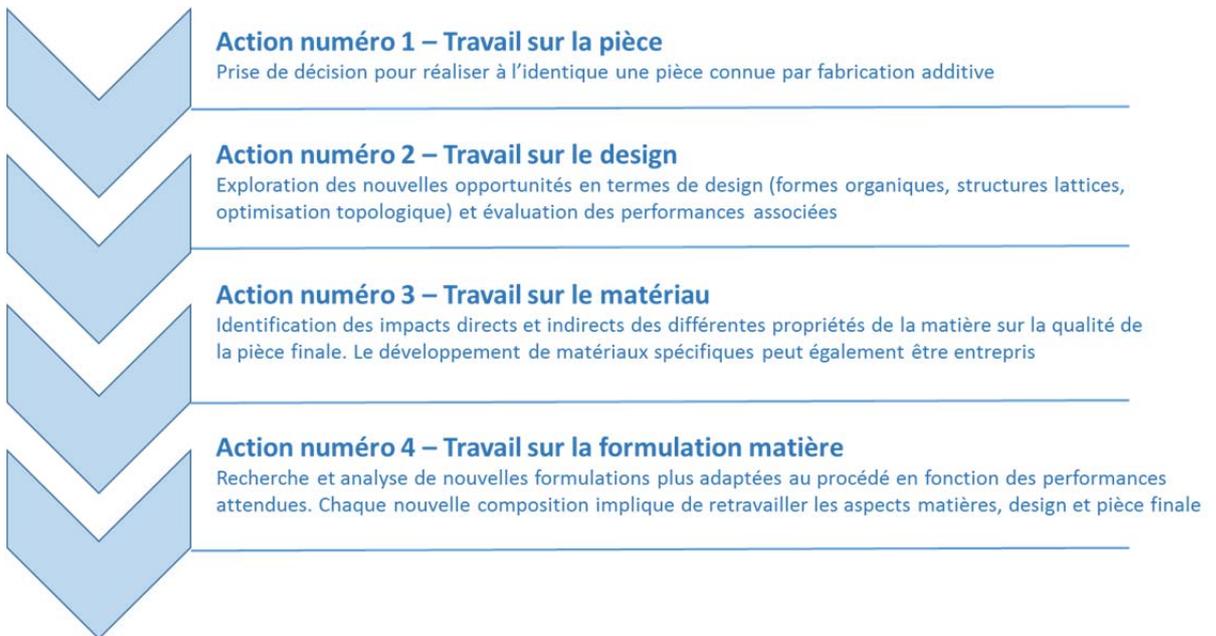


Figure 15 : Exemple représentatif des différents niveaux d'adoption de la fabrication additive

Développer des offres de formation académiques et continues autour de la fabrication additive

- Il paraît évident que les profils de compétences restent à préciser dans l'ensemble des domaines impactés par la fabrication additive⁸⁶. En effet, la mauvaise compréhension des compétences clés nécessaires à tous les niveaux de la chaîne de valeur entraîne une mauvaise structuration de l'offre de formation actuelle. À l'heure actuelle, les industriels ont pu souligner l'ignorance de la fabrication additive dans la plupart des programmes scolaires et postsecondaires européens où seul un survol descriptif des procédés et des performances associées est proposé sans véritable approfondissement pour aider l'étudiant à acquérir de véritables compétences en la matière. Aujourd'hui, malgré la richesse des systèmes éducatifs français et européens, la fabrication additive demande de nombreuses compétences en mathématiques, physique, informatique, électrotechnique ou encore mécanique, et ne peut justifier un diplôme spécifique à tous les niveaux scolaires et universitaires. Cependant, les industriels souhaitent voir se développer des modules d'enseignements spécifiques dans les filières BTS, DUT, les écoles d'ingénieurs et les universités. De ce fait, les principaux besoins exprimés en termes de formation concernent de façon naturelle l'ensemble de la chaîne de production⁸⁷ par fabrication additive :
 - Conception : parallèlement à ce qui se passe dans l'industrie, les enseignants et les étudiants n'ont pas encore assimilé les nouvelles règles de conception. Le futur concepteur doit pouvoir réaliser une analyse fonctionnelle afin d'avoir le

⁸⁶ Fabrication additive : des formations adaptées à tous les acteurs, A3DM Magazine N°1, p22.

⁸⁷ La chaîne de production est l'ensemble des opérations de fabrication nécessaires, à la réalisation d'un produit manufacturé, des matières premières jusqu'à la mise sur le marché.

- recul nécessaire pour imaginer des fonctions nouvelles. L'apprentissage des outils de simulation et d'optimisation topologique serait également apprécié ;
- Préparation et mise en œuvre : cette étape nécessite d'avoir une vision globale du procédé pour évaluer la meilleure orientation possible de la pièce et les paramètres de la machine en considérant le procédé choisi et les efforts de posttraitement. Il s'agit là d'une connaissance complémentaire au reste mais nécessaire, qui permettrait d'enrichir les services méthodes des industriels. La mise en œuvre du processus complet de fabrication, impliquant le préchauffage, l'approvisionnement en matériaux, la fixation et l'extraction de la pièce, demande une très bonne maîtrise non seulement des différentes machines de fabrication mais aussi des méthodes de post-traitement pour ne pas détruire la valeur ajoutée de la pièce lors des opérations précédentes ;
 - Contrôle, test et mesures : les efforts actuels en termes de normalisation et de procédure de contrôle dans le domaine de la fabrication additive ainsi que le développement de techniques de mesures *in situ* devraient entraîner une demande nouvelle en termes de compétence en assurance-qualité.

L'industrie souhaite être d'avantage impliquée dans les futures offres de formation sur la base d'une coopération avec les établissements d'enseignement et les autorités locales pour s'assurer que les connaissances enseignées correspondent à ses besoins et garantir l'employabilité des futurs travailleurs.

Un impact court terme relativement faible sur la chaîne de valeur et les organisations

Si la fabrication additive remet en cause le concept de la chaîne logistique avec une approche « un produit égal un fichier » et peut représenter une certaine menace pour la filière transport, la maturité actuelle de la technologie ne permet pas d'envisager un bouleversement court terme de la *supply chain* et des organisations. En effet, la faible cadence de production et les nombreuses étapes de post-traitement, de finitions et d'analyse qualité limitent le déploiement de mini-usines au plus près du client, que ce soit pour produire des pièces détachées ou non. De ce fait, les retours sont relativement mitigés vis-à-vis des opportunités de production en flux tendus, et de réduction des stocks. La fabrication additive présente un intérêt particulier lorsque le coût de transport représente une part très élevée du prix global du produit : c'est le cas des jouets, des meubles et des objets de décoration mais généralement pas le cas des pièces complexes à haute valeur ajoutée dans la plupart des industries. Par ailleurs, selon certains acteurs consultés, la relocalisation de la force manufacturière se fera indépendamment de la fabrication additive : la recherche de rapidité, de réactivité, et la volonté de faire face à une potentielle augmentation des coûts de production en provenance des pays encore réputés à faible coût de main-d'œuvre, peuvent également induire des phénomènes de relocalisation. Si aujourd'hui on ignore quelle sera la stratégie gagnante vis-à-vis de la fabrication additive, il semble fondamental de réaliser un diagnostic stratégique des pièces les plus importantes pour l'entreprise et celles pour lesquels le ratio faisabilité par fabrication additive/importance du coût de transport est intéressant. Enfin, il a été souligné que la fabrication additive peut représenter une réelle menace pour les acteurs en place sur le segment des pièces détachées ou de la maintenance, notamment pour les entreprises capables de proposer réactivité et qualité de services n'importe où dans le monde. En effet, la mise en place d'un réseau de fournisseurs de pièces détachées capables d'approvisionner le marché local grâce à des machines de fabrication additive viendra court-circuiter la chaîne de valeur en place.

Sur le plan organisationnel, la phase de transition pousse les industriels à réfléchir sur l'implémentation de services méthodes capables d'évaluer le potentiel de la fabrication additive et d'accompagner les différentes divisions de l'entreprise. Si les impacts organisationnels de ces technologies sont jugés très secondaires en ce qui concerne la fabrication directe, l'utilisation de la fabrication additive pour le prototypage ou l'outillage rapide a bouleversé certains métiers qui

ont dû évoluer et compléter leur offre de services afin de répondre aux besoins de leurs clients en termes de complexité, de coût et de réactivité. Ainsi, aujourd'hui, certains sous-traitants industriels en fabrication additive s'associent avec des usineurs et fondeurs pour pouvoir couvrir un panel de services plus large.

Un besoin de clarifier la situation en termes de propriété intellectuelle et de responsabilité

Perçue plutôt comme une menace à garder en tête qu'un véritable besoin par les industriels, la question de la propriété intellectuelle et de la responsabilité de chacun sera inévitablement soulevée au fur et à mesure de l'adoption de la fabrication additive. Si les premières études lancées sur le sujet⁸⁸ préconisent l'implémentation de procédures de contrôle de l'utilisation des fichiers numériques ou encore l'extension du principe de rémunération pour copie privée aux outils de reproduction des œuvres (machines de fabrication additive et d'impression 3D, scanners 3D), ces mesures semblent plutôt destinées à la lutte contre le piratage à des fins d'utilisation grand public. Pour la plupart des industriels, le cadre légal existant pour protéger les droits de propriété intellectuelle des créateurs est suffisant, l'enjeu étant plutôt de développer des solutions de marquages consistant à insérer dans la pièce des particules ou microtags invisibles à l'œil nu afin de lui apporter une empreinte unique⁸⁹, non copiable et ainsi garantir sa traçabilité. En effet, le développement des technologies de scan 3D facilite la copie du produit et les industriels ont conscience du danger pour les utilisateurs finaux de l'achat d'une pièce identique mais constituée de matériaux différents ou n'affichant pas les résistances mécaniques nécessaires. Très touchée par la contrefaçon, l'industrie du luxe semble la plus concernée par ces sujets mais fait aujourd'hui face à un vrai manque d'investissements et de développements dans la fabrication additive de textile. Autre élément à prendre en compte, le partage des responsabilités en cas de défaillance peut se poser mais ne devrait pas véritablement être bouleversé par rapport aux conditions actuelles et garanties négociées entre fournisseurs, sous-traitants, concepteurs et utilisateurs.

Un manque de recul sur les impacts de la fabrication additive sur la santé et la sécurité

Encore peu investigués par les organismes en charge de la prévention des risques professionnels, les risques encourus lors de l'utilisation de la fabrication additive doivent être pris en compte afin d'éviter un accident ou un scandale qui ternirait l'image de la technologie, notamment pour les procédés qui utilisent des poudres. Les machines de fabrication additive relèvent au niveau de l'Hygiène et de la Sécurité pour l'Espace économique européen de la directive « Machines ». Cette directive européenne impose le respect dès leur conception de différentes exigences essentielles de sécurité qui couvrent notamment les risques mécaniques, électriques, d'expositions aux substances (poussières, gaz...), et les risques d'explosions, ceci dans les différentes phases d'utilisation de la machine (production, nettoyage, maintenance...). En cela les machines de fabrication additive partagent un large tronc commun de risques et de mesures préventives avec les équipements mis en œuvre avec d'autres procédés. Considéré une nouvelle fois comme secondaire dans la mesure où cela ne représente pas un frein au développement du secteur, le besoin d'avoir plus de recul sur l'impact de la fabrication additive sur la santé et la sécurité des travailleurs est à garder en tête. Il serait alors judicieux de caractériser les risques suivants en ayant pour objectif de définir un ensemble cohérent de bonnes pratiques et en se basant sur des diagnostics HSE d'installations existantes :

- Les risques chimiques associés aux résines volatiles lors de la fabrication de pièces polymères, ainsi qu'aux additifs volatils utilisés lors de la mise en œuvre de poudres métalliques.

⁸⁸ L'impression 3D Impacts économiques et enjeux juridiques, F.Ghilassene, INPI 2014.

⁸⁹ À l'image de ce que propose la société Diamlite (<http://www.diamlite.com/>) qui commercialise des nanodiamants fluorescents utilisés à des fins de marquage permanent.

- Les risques d'explosions résultant de l'utilisation de poudres ou de l'accumulation de charges électrostatiques : en effet, les poussières de matières mélangées avec l'air forment des atmosphères explosives et impliquent d'agir le plus en amont possible.
- Les risques chimio-physiologiques du fait de l'inhalation de poudres de taille nanométrique.
- Les risques spécifiques associés à l'utilisation de faisceaux d'électrons, de lasers et de manière plus générale à l'utilisation des machines.

L'identification de ces différents dangers pousse actuellement le développement de systèmes fermés, automatiques afin de minimiser l'intervention humaine. En effet, les machines n'ont pas encore intégré l'automatisation de la gestion des poudres, ce qui provoque un certain inconfort pour le personnel obligé de s'équiper de masques et de combinaisons pour se protéger des particules. Toutefois, des actions de sensibilisation et de rappel des bonnes pratiques permettraient d'adapter au mieux les mesures de sécurité aux risques encourus. Bien qu'enjeu central du développement de la fabrication additive, le risque Hygiène-sécurité-environnement ne doit pas aboutir à une contrainte excessive qui serait contre-productive. La levée des incertitudes dans ce domaine implique l'action coordonnée des différents acteurs de la filière, constructeurs de machines, producteurs de poudres et utilisateurs.

Il semble alors nécessaire d'accompagner l'essor des technologies de fabrication additive par des études permettant d'évaluer de façon plus approfondie les risques encourus, les dispositifs de prévention à implémenter ou encore la réglementation à mettre en œuvre. Des initiatives telles que la publication du journal américain *Environmental Science & Technology*⁹⁰ (sur les émissions de particules fines et de composés organiques volatils liées aux imprimantes 3D) ou dans le livre Dunod « Fabrication additive : du prototypage rapide à l'impression 3D » (menant une analyse exhaustive des risques liés à la mise en œuvre, aux opérations ou aux machines) vont dans ce sens. Par ailleurs, si l'utilisation de la fabrication additive présente de vrais impacts durables (que ce soit en économisant de la matière en évitant les copeaux d'usinages, les économies de carburants associés ou encore les réductions des flux logistiques à terme), le recyclage et la réutilisation des matières utilisées sont encore peu structurés, ce qui tend à maintenir un taux de perte relativement élevé.

Quels modèles économiques pour la fabrication additive ?

La fabrication additive représente un investissement matériel relativement important en termes non seulement de machines ou de logiciels, mais aussi d'implémentation d'une stratégie ou de formation du personnel. Il est donc important de mener une réflexion approfondie avant de repenser en partie sa stratégie industrielle. Trois modes de fonctionnement sont aujourd'hui considérés par les industriels selon leur niveau de maturité vis-à-vis des technologies, leur marché ou les usages qui sont faits de la fabrication additive (prototypage, outillage, production...).

1. **L'intégration de la technologie** est une décision stratégique importante dans la mesure où elle représente une démarche longue et coûteuse. À noter que l'implémentation d'une imprimante 3D peu coûteuse dans un bureau d'études a déjà été effectuée par la plupart des grandes entreprises pour leurs propres besoins et n'est pas considérée comme une véritable intégration de la fabrication additive. À l'image de General Electric, et plus récemment d'Avio Aero⁹¹ et du groupe Thales⁹², l'internalisation de la recherche et développement et de la production permet de monter en compétences sur un sujet stratégique dans l'ensemble des divisions du groupe (ressources humaines, recherche, production, méthodes, contrôle qualité, achats). Afin de bien caractériser le retour sur investissement de ces premières

⁹⁰ *Environmental Science and Technology* <http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.est.5b04983>

⁹¹ GE's Avio Aero orders 10 new Arcam EBM metal 3D printers to produce aerospace parts, 3ders.com, décembre 2015.

⁹² Thales se dote de sa première usine d'impression 3D, Industrie et Technologies, décembre 2015.

phases de tests, les industriels ont besoin de se faire accompagner par les fabricants de machines et les usineurs lors des phases d'intégration au niveau des choix de matériaux, de procédés et des finitions, car ils ne disposent souvent pas des compétences en interne.

2. Le **recours à la sous-traitance** : conscient de l'évolution très rapide de la filière et des importants investissements nécessaires, la majorité des acteurs interrogés privilégient le codéveloppement ou la recherche sous-contrat avec des prestataires externes. Ces derniers, en plus d'assumer le risque lié à l'obsolescence des machines, apportent un savoir-faire en termes de fabrication, de conception et de finitions. Les industriels sont ainsi sensibilisés aux possibilités offertes par les différents procédés et peuvent éventuellement se tester avant de lancer une démarche d'intégration.
3. L'**utilisation ponctuelle de services d'impression en ligne** : ce mode d'utilisation de la fabrication additive est minoritaire et consiste à mettre en ligne le fichier 3D d'un prototype ou d'un outil d'aide à la vente afin qu'il soit fabriqué sur les machines d'un prestataire et envoyé ensuite au destinataire par courrier.

La stratégie de déploiement à adopter est donc variable et dépend du besoin et de la maturité de l'utilisateur. Afin de mieux comprendre le positionnement des différents acteurs impliqués dans ces trois cas d'usage, il peut être également intéressant de se pencher sur les modèles associés.



Figure 16 : Principaux modèles économiques de la fabrication additive⁹³

Impacts de l'hybridation et des machines de nouvelles générations

Bien conscients que la fabrication additive n'est pas une fin en soi et est un procédé qui doit être intégré au sein de l'écosystème productif, les fabricants de machines-outils se positionnent progressivement en proposant des équipements hybrides à l'image du premier modèle présenté par Matsuura au salon Euromold en 2011. Il s'agit la plupart du temps de machines qui utilisent comme base un centre d'usinage cinq axes et qui combinent un procédé additif comme du dépôt de matière sous flux d'énergie dirigé (laser *cladding*) avec un dispositif d'usinage (fraisage ou rectification). L'hybridation offre alors la possibilité de réaliser de A à Z des outillages complexes de précision, des pièces métalliques complexes en petite série, de réparer une pièce à

⁹³ The rise of 3D Printing : Star Trek Technology becomes real disruptive phenomenon, Frost and Sullivan, 2014.

forte valeur ajoutée ou de lui rajouter des fonctions. Ces équipements répondent à la fois aux besoins actuels en termes de taille en traitant des pièces volumineuses, de rapidité (DMG annonçait en 2014 que la Lasertec 65 Additive affichait une vitesse de fabrication dix fois plus grande que celle des machines de fusion de poudres métalliques) ou de post-traitement. D'importants efforts restent à fournir pour mettre au point des solutions logicielles capables d'intégrer le savoir-faire en fabrication additive et celui d'usinage, en combinant les outils de simulation de trajectoire avec des bases de données de matériaux et de paramètres nécessaires pour la fabrication additive.

Les experts interrogés ont fortement insisté sur le fait que la plupart des insatisfactions observées ainsi que les freins potentiels au développement de la fabrication additive pourraient devenir obsolètes dans les prochaines années, si ce n'est dans les prochains mois. En effet, les fabricants de machines-outils sont prêts et annoncent une nouvelle ère de la fabrication additive plus rapide et plus précise. Ce point doit être souligné car les transformations attendues à moyen et long terme pourraient intervenir plus tôt que prévu.

La fabrication additive dans les services, le commerce et son adoption par le grand public

L'introduction de la fabrication additive dans le monde du commerce de détail a provoqué une véritable remise en question de l'approvisionnement, la commercialisation des produits ou encore la valorisation de leur création. Face à un consommateur toujours plus exigeant et toujours plus pressé, l'enjeu de la fabrication additive dans les services et le commerce de détail est double : être capable de proposer rapidement des solutions personnalisées et démocratiser l'accès aux machines et aux techniques de fabrication, jusque-là réservé aux professionnels. C'est donc sur des deux axes que sera menée l'analyse d'un segment où toute la chaîne de valeur devra être évaluée et repensée pour intégrer l'impression 3D.

La personnalisation du *retail* grâce à la fabrication additive

Véritable tendance dans le domaine du commerce de détail, la personnalisation des biens de consommation représente un véritable levier de croissance pour les technologies de fabrication additive qui offrent la possibilité de fabriquer un objet à son image. Ainsi, de nombreux détaillants soucieux de ne pas manquer ce virage technologique et organisationnel proposent déjà en ligne ou en magasins des produits fabriqués de façon additive. À l'heure où tout ou presque devient imprimable (vêtements, mobilier, instruments de musique, figurines et accessoires), les exemples sont nombreux. Après les bijoux imprimés en 3D de Jweel⁹⁴, les écouteurs sur-mesure de la *start-up* Normal⁹⁵, les chaussures Feetz⁹⁶, ce sont désormais les soutiens-gorge qui sont produits par fabrication additive chez Joyfit⁹⁷ ou encore les montures de lunettes chez Aoyama Optical France⁹⁸. Le point commun entre toutes ces enseignes : une vidéo panoramique ou quelques clichés de la poitrine, des pieds, des oreilles ou de la tête du client suffisent pour générer un modèle 3D et lancer la fabrication d'un produit sur-mesure.

⁹⁴ Jweel.com, l'univers du bijou personnalisé <https://www.jweel.com/fr/>

⁹⁵ La *start-up* Normal propose des écouteurs sur-mesure pour 199 dollars, 3dnatives.com, 2014.

⁹⁶ Feetz : la 3D au service de la podologie et de la personnalisation, L'atelier BNP Parisbas 2015.

⁹⁷ Joyfit 3D printed custom bra could be the future of lingerie, 3ders.org, 2015.

⁹⁸ Aoyama Optical France lance sa gamme de lunettes imprimées en 3D, 3dnatives.com, 2015.



Figure 17 : Exemples de personnalisation de biens de consommation grâce à la fabrication additive

Cette liste n'est pas exhaustive mais démontre bien l'engouement de la filière pour ces produits personnalisés, que ce soit pour un meilleur confort ou tout simplement pour disposer d'un produit unique à un prix raisonnable. Un engouement partagé par les grands groupes qui réalisent leurs premiers pas dans la personnalisation de masse à l'image d'Addidas ou de Philips. En effet, le groupe allemand envisage déjà de laisser courir le client sur un tapis roulant situé dans une de ses boutiques pour obtenir ses caractéristiques morphologiques et sa démarche de course et produire une semelle intermédiaire en 3D sur-mesure⁹⁹. De façon similaire, Philips propose à ses clients néerlandais un rasoir personnalisable en ligne mais en quantité limitée, seulement deux par jour¹⁰⁰. Un lancement prudent au vu de la réorientation stratégique nécessaire pour ces acteurs habitués à la production de masse pendant plusieurs décennies. Par ailleurs, au-delà du fait d'apporter une nouvelle expérience utilisateur grâce à un catalogue quasi illimité, la fabrication additive permet de réduire considérablement les stocks et de gagner en trésorerie.

Enfin, si la configuration en ligne du produit *via* une application mobile semble aujourd'hui le mode de fonctionnement le plus répandu, certains acteurs tentent de rapprocher davantage l'utilisateur final de la fabrication du produit. C'est notamment le cas de Normal¹⁰¹ ou de Mesh Lingerie¹⁰² qui encouragent leurs clients à venir se faire numériser en boutique et à assister à la confection de leurs écouteurs ou de leurs soutiens-gorge, un concept de point de vente de détail couplé à une mini-usine qui pourrait être amené à se généraliser dans les prochaines années.

Des services en ligne à l'impression 3D en magasin

Avec de nombreuses offres d'impression 3D à la demande à l'image de Sculpteo ou Shapeways, des places de marchés dédiées à la fabrication additive ou des plateformes de mise en relation entre designers, fabricants et utilisateurs, le segment des services est relativement bien fourni pour un public de petits professionnels et de particuliers. Par ailleurs, les « early adopters » qui ont franchi le cap et qui possèdent une imprimante 3D à leur domicile peuvent aujourd'hui profiter de services innovants tels que 3DShook¹⁰³ (un abonnement mensuel de \$14,99 permettant de télécharger à volonté des fichiers d'accessoires pour la maison, des casse-tête, des bijoux, des oeuvres d'art ou bien des jouets et profiter de nouveautés tous les mois) ou encore ProtoCreate¹⁰⁴ qui approvisionne chaque mois le client en consommables, ustensiles et nouvelles idées sous forme de *box* vendue par abonnement. Enfin, les FabLabs permettent à tout un chacun de venir se former et tester les fonctionnalités offertes par les imprimantes 3D. Ces tiers-lieux¹⁰⁵ favorisent ainsi la sensibilisation du grand public aux opportunités associées à ces nouvelles technologies.

Afin de mieux comprendre les attentes de leurs clients, démocratiser la technologie et éduquer le consommateur grand public, des grands magasins généralistes et des grandes enseignes de

⁹⁹ Futurecraft 3D, la basket Adidas imprimée en 3D, Numerama, 2015.

¹⁰⁰ Un rasoir personnalisé grâce à l'impression 3D pour Philips, 3dnatives.com, 2016.

¹⁰¹ 3D Printing in Retail: Watch Personalised Earphones Being Created in a New York Store, International Business Times 2014.

¹⁰² Mesh Lingerie, le soutien-gorge ajusté et imprimé en 3D, 3dnatives.com, 2015.

¹⁰³ 3DShook, la plateforme qui veut devenir le Netflix de l'impression 3D, impression3dnews.com, 2015.

¹⁰⁴ ProtoCrate approvisionne votre imprimante 3D pour \$50 par mois, 3Dnatives.com, 2015.

¹⁰⁵ Une analyse plus approfondie de ces tiers-lieux est explicitée au chapitre relatif à l'usage de la fabrication additive dans les lieux d'innovation.

distribution implémentent depuis 2013 des services d'impression 3D en boutique, souvent en collaboration avec des professionnels de la fabrication additive.

Focus sur quelques exemples d'applications proposées aux consommateurs :

Dans certains cas, l'utilisateur choisit dans un catalogue, personnalise ou cocrée un modèle 3D grâce à une interface tactile disposée en magasin qui enverra une demande de fabrication à une entreprise spécialisée. Le client a alors le choix de venir retirer sa pièce en magasin ou de se la faire livrer. Dans d'autres cas, l'utilisateur apporte son propre modèle et se fait accompagner par l'enseigne lors de la fabrication grâce à des conseillers en impression 3D.

On peut citer ici l'exemple de l'initiative Yoomake, lancé par Auchan en 2014 en collaboration avec la société belge d'impression 3D Materialise et Twikit, qui a fourni l'interface de personnalisation ainsi que les modèles 3D du catalogue. Afin de proposer une expérience ludique et innovante aux passants dans les centres commerciaux tout en générant une source de revenus supplémentaires, le fabricant américain 3D Systems a annoncé en 2015 la commercialisation d'une nouvelle génération de photomatons 3D permettant aux utilisateurs de commander une figurine à leur effigie. Par manque de compétences ou de temps, l'utilisateur ne gère pas la production et se concentre sur le design du produit ; une tâche de personnalisation et de création que les acteurs de la filière cherchent à faciliter à l'image du service en ligne « Innover et Créer en 3D » lancé par la Poste fin 2015 ou de la solution 3D Via Make, une nouvelle application de Dassault Systèmes destinée aux commerçants et permettant de proposer à leurs clients des produits personnalisables en ligne et imprimables en 3D.

Le groupe Auchan a également dévoilé en 2013¹⁰⁶ en collaboration avec la *start-up* CKAB un corner équipé d'une MakerBot Replicator 2 et d'une Cube de chez 3D Systems, ainsi qu'une équipe de conseillers formés par CKAB pour guider les clients jusqu'à la fabrication. Le prix facturé pour ce service est proportionnel au poids de l'objet et selon la durée de la fabrication, le client peut être invité à assister au processus ou à venir le récupérer le lendemain.

Pour un public plus averti, la chaîne Leroy Merlin, spécialisée dans le bricolage et le jardinage, ouvrait en février 2015 un espace de fabrication numérique de 2 000 m² en collaboration avec TechShop, une entreprise américaine déjà propriétaire de 8 ateliers similaires¹⁰⁷. Si l'espace propose des fraiseuses numériques, des découpes laser ou bien des imprimantes 3D disponibles en libre accès pour concevoir et fabriquer soi-même, Leroy Merlin ne néglige pas le service en mettant à disposition des visiteurs une vingtaine de formateurs. Un enjeu partagé par Top Office qui déclarait que « la démocratisation de l'impression 3D, notamment chez les particuliers, passera par le service et la relation client »¹⁰⁸.

Souvent proposés aujourd'hui par des chaînes spécialisées à l'image de Top Office ou Staples, les hypermarchés et les enseignes généralistes tentent à leur tour d'éduquer les consommateurs. C'est le cas notamment de BHV qui a lancé avec LeFabShop un grand espace éphémère du 3 avril au 9 mai 2014 consacré à la technologie d'impression 3D au 5^e étage du magasin¹⁰⁹. Enfin, l'impression 3D apparaît comme une diversification à fort potentiel pour les services postaux et les sociétés spécialisées dans le transport de marchandises. Ayant bien compris que les besoins de leurs clients devraient évoluer dans les prochaines années, des acteurs comme La Poste, UPS¹¹⁰ ou encore TNT¹¹¹ ont décidé de proposer des machines dans leurs agences stratégiques afin de lancer le dialogue avec leurs clients et réfléchir ensemble sur les impacts de la technologie sur le transport de produit, la production délocalisée ou encore la *supply chain*. Des initiatives qui laissent déjà entrevoir des applications dans le domaine des pièces détachées ou bien des produits personnalisés.

¹⁰⁶ Le concept d'impression 3D s'invite chez Auchan, lesnumeriques.com, 2013.

¹⁰⁷ Techshop : À Ivry-sur-Seine, Leroy Merlin ouvre à ses clients des ateliers partagés, L'Usine Digitale, 2015.

¹⁰⁸ Top Office : « La démocratisation de l'impression 3D passera par le service », 3dnatives.com, 2015.

¹⁰⁹ Le Fabshop : impression 3D dans un magasin éphémère au BHV (Paris), intotheminds.com, 2014

¹¹⁰ La Poste et UPS étendent leur service d'impression 3D, 3dnatives.com, 2014.

¹¹¹ TNT s'intéresse de près à l'impression 3D pour envoyer ses colis, 3dnatives.com, 2015.



Figure 18 : Les initiatives fleurissent dans les enseignes de *retail* pour diffuser la technologie (Top Office et Leroy Merlin)

À l'heure des premiers bilans, les initiatives autour de l'impression 3D dans les enseignes généralistes et spécialisées ont reçu un accueil plutôt favorable. Cependant, au-delà du *buzz* médiatique, l'impression 3D par les particuliers reste ponctuelle et limitée aux initiés, les fameux *makers* ou les bricoleurs. En effet, malgré un fort succès et 3 000 projets réalisés depuis le lancement du service en 2013, Top Office admet aujourd'hui que 95 % des clients sont des professionnels qui utilisent l'impression 3D « comme une vraie solution accessible pour développer leur activité, notamment par la création de prototypes ou de maquettes »¹¹². Sans qu'il soit possible d'y associer un chiffre d'affaires déterminé, la fabrication additive grand public, qui concerne en grande majorité des technologies à dépôt de fil, est ainsi de moins en moins attractive pour les professionnels du secteur. Ainsi, l'engouement autour des imprimantes 3D grand public¹¹³ retombe peu à peu, et la réalité du marché professionnel s'impose progressivement.

Analyse de la demande dans les lieux d'innovation

Afin de mieux comprendre la demande des technologies d'impression 3D grand public dans les lieux d'innovation, nous proposons d'analyser cette demande en fonction d'usages différents du lieu. Pour rappel, nous distinguons trois fonctions principales au sein des ateliers de fabrication numérique :

- Le prototypage et l'innovation ;
- La fabrication personnelle ;
- L'apprentissage et le « pair à pair ».

Bien que distinctes, ces notions restent entremêlées dans la description de la demande pour l'impression 3D grand public.

Comme dans l'industrie, les ateliers de fabrication numérique ont des imprimantes 3D qui sont très adaptées à un public novice et qui en fait une utilisation ponctuelle. Elles demeurent des machines à commande numérique et nécessitent l'emploi de logiciels :

- Pour la modélisation 3D, pour dessiner en volume son idée et ainsi prototyper des objets physiques, on utilise généralement les logiciels dits de conception assistée par ordinateur (CAO) :

¹¹² Baisse d'intérêt du grand public, Usine Nouvelle n°3453, 2016, p34.

¹¹³ Cette analyse n'est pas spécifique au territoire national, et peut être appliquée à l'échelle mondiale, au vu de l'évolution de la stratégie de Stratasys par exemple.

Usages	Logiciels
Prototypage	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Autodesk Fusion 360, OpenSCAD, SolidWorks, Blender, Rhino3D, Grasshopper, 3ds Max, Maya et Modo
Fabrication personnelle	<ul style="list-style-type: none"> ▪ SketchUp, Autodesk 123D design & make, ZBrush, Sculptris, Mudbox
Apprentissage « Pair à pair »	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tinkercad

Source : Pratique de l'impression 3D, par Anna Kaziunas, 2014, Eyrolles.

- Pour la conception et fabrication assistées par ordinateur : il s'agit de logiciels d'usinage, ils convertissent un modèle numérique en une série d'instructions mécaniques (commandes numériques) spécifiques pour le robot d'impression. Ils ne sont pas légion et demandent un niveau de compétence avancé dans le domaine pour être utilisé : Slic3r, Netfabb, MeshLab, Repetier, Cura pour les plus courants et ensuite chaque marque ou modèle d'imprimante propose généralement son client CFAO (par exemple : Z-suite pour Zortrax ou encore ReplicatorG pour Makerbot).

La fabrication dite « personnelle » représente les usages grand public de l'impression 3D. Nous parlons alors de passionnés qui vont se servir de l'impression 3D pour du DIY, proposer des microservices de fabrication (cf. : etsy.com) ; certains voient enfin dans l'impression 3D la possibilité de produire ce qu'ils veulent au moment où ils le souhaitent.

Dans ce contexte, les individus peuvent rapidement devenir des artisans et s'emparer des technologies de scan grand public comme celle de Microsoft avec la « kinect », et de modélisation et d'impression 3D.

La demande d'impression pour la fabrication personnelle existe. En effet, les demandes pour des biens de consommation qui pourraient être fabriqués par des particuliers sont régulières, mais il n'existe pas encore aujourd'hui de réponse sérieuse sur des technologies d'impression 3D grand public. Dans la majorité des cas, nous constatons que les demandes vont évoluer vers le développement d'un projet innovant (prototypage) ou vers l'utilisation de matériel grand public pour découvrir et apprendre l'impression 3D :

- Le prototypage et l'innovation

Les activités de prototypage et d'expérimentation en contexte « fabLab » sont le plus souvent menées avec du matériel de bureau (*desktop printing*) grand public ou semi-professionnel. On retrouve les marques clés du secteur : Zortrax, Formlabs, Makerbot, Ultimaker et dans une moindre mesure dans les lieux d'innovation d'entreprise du matériel semi-professionnel des mastodontes de la fabrication additive (Cube pro de chez 3DSystèmes).

Pour ce type d'usage, on retrouve des usagers aux profils à la fois de créateur, d'inventeur et d'entrepreneur ou d'« intrapreneur » (notamment dans les ateliers de fabrication numérique professionnels ou en entreprise).

- L'apprentissage et le « pair à pair », se veut une modalité d'apprentissage innovante

La majorité des espaces de fabrication numérique sont identifiés par le grand public comme des espaces d'apprentissage et de médiation technologique.

On retrouve un matériel *low-cost*, en kit dont la plupart des pièces peuvent être fabriquées à l'aide d'autres imprimantes 3D. Il existe une très grande quantité de modèles et de variations différentes de ces kits, mais les modèles les plus connus à l'international sont Rep Rap, Ultimaker et Printrbot.

Pour ce type d'usage, on retrouve une grande diversité de publics qui cherchent à vivre une expérience plus qu'à acheter ou produire quelque chose. Collectivement, ils se confrontent au challenge de la fabrication. Le plus souvent, ce challenge est le montage d'une imprimante 3D. Il permet d'apprendre une quantité d'information essentielle pour pouvoir ensuite concevoir et imaginer n'importe quel objet.

État des lieux de l'usage de la fabrication additive dans les lieux d'innovation

Les nouveaux modèles territoriaux d'innovation invitent à repenser les relations entre innovation et territoire. À ce sujet, le chercheur Raphaël Besson décrit dans ses travaux le modèle du Système Urbain Cognitif (SUC). Ces modèles urbains doivent chercher à attirer les talents et les activités innovantes tout en jouant un rôle actif dans les processus créatifs et d'innovations. L'enjeu des SUC est ainsi de créer les conditions d'une innovation ouverte au tissu social et économique des villes, afin de stimuler leur créativité, via une réflexion sur l'organisation spatiale. Le modèle des SUC évolue aujourd'hui autour des tiers-lieux, notion en développement avec les espaces de coworking, les Living Labs et les FabLabs.

Définition de différentes typologies de tiers-lieux d'intérêt :

Tiers-lieu : Le tiers-lieu fait référence à un environnement social se distinguant du lieu de domiciliation et du lieu de travail. Ils sont importants pour la société civile, la démocratie, et l'engagement civique car dédiés à la vie sociale de la communauté, avec des espaces où les individus peuvent se rencontrer, se réunir et échanger de façon informelle.

Espaces de coworking : Le *coworking* est un type d'organisation du travail regroupant un espace de travail partagé pour des travailleurs à la recherche d'échange et d'ouverture. Il fait partie de l'économie collaborative.

Living Lab : Un *Living Lab* regroupe des acteurs publics et privés, des entreprises, des associations et des citoyens dans l'objectif de tester des services, des outils ou des usages novateurs. Il crée du lien entre la recherche des laboratoires et le quotidien des citoyens avec une orientation stratégique sur les usages potentiels des nouvelles technologies.

Le *Living Lab* cherche ainsi à favoriser l'innovation ouverte grâce à une méthodologie où citoyens, habitants et usagers sont considérés comme des acteurs clés des processus de recherche et d'innovation afin de stimuler les collaborations entre des profils hétérogènes et ainsi leur permettre d'influer sur les évolutions de notre société et d'appréhender les enjeux sociaux, technologiques et économiques associés.

FabLab : Un FabLab est un lieu ouvert au public où est mis à disposition un panel d'outils et de machines-outils pilotées par ordinateur pour la conception et la réalisation d'objets. Le FabLab s'adresse aux entrepreneurs, aux designers, aux artistes, aux bricoleurs ou aux étudiants afin de passer plus rapidement d'un concept à un prototype. Un FabLab est un lieu de rencontre et de création collaborative.

La spécificité des tiers-lieux, selon monsieur Besson, réside dans leur capacité à articuler et intégrer les trois dimensions essentielles de l'innovation : la dimension spatiale des espaces de coworking, la dimension sociétale des *Living Labs* et la dimension productive des FabLabs. **Les tiers-lieux interrogent le détournement des innovations au regard de finalités sociétales, urbaines, culturelles ou environnementales, pour la coproduction des innovations par les habitants et les utilisateurs.**

Au sein de ces tiers-lieux se développent des principes nouveaux, socialement utiles, et jouant un rôle déterminant dans les dynamiques d'innovations. La volonté finale est de mettre les utilisateurs au cœur des processus d'innovation par l'intermédiaire d'un ancrage local fort auprès des communautés urbaines.

Les lieux ouverts d'innovations sont ainsi des lieux créatifs où naissent les idées, ils apparaissent très variés mais ont des caractéristiques communes. En effet, de l'espace de *coworking* au *bio-hackerspace* en passant par l'atelier de fabrication numérique, ces lieux sont très différents mais

font partie d'un même écosystème et se structurent autour d'un certain nombre de principes communs.

Communautaires, ils encouragent le travail collaboratif et connecté, animés par des communautés fortes, qui cherchent à modifier le rapport à la propriété intellectuelle pour une R & D décentralisée et plus performante¹¹⁴.

Il s'agit d'espaces dans lesquels des individus se rencontrent, échangent et collaborent. Si l'objet du lieu (bénéficier d'un lieu de travail, faire de la science, créer des objets, concevoir un service, réaliser des analyses biologiques, etc.), et les outils disponibles varient fortement (des ordinateurs, du mobilier, des séquenceurs ADN, des imprimantes 3D, etc.), plusieurs caractéristiques restent centrales :

Caractéristiques	Détails
Des outils connectés à faible coût	Que l'objectif soit de fabriquer un objet ou d'inventer un nouveau service, les lieux ouverts d'innovation disposent d'outils qui servent et facilitent l'échange de données à distance et qui servent d'accélérateur au service de la collaboration.
Des populations hétérogènes	La « sérendipité » et l'innovation sont permises par le mélange d'individus aux savoirs, aux expertises, aux modes de réflexion différents. Soit cette hétérogénéité est construite, soit elle provient de l'ouverture du lieu au public.
Une vision renouvelée de la propriété intellectuelle	Les principes collaboratifs impliquent une remise en question totale (le « libre ») ou partielle (« l'open source ») de la propriété industrielle, à travers l'utilisation de licences innovantes (<i>Creative Commons</i> notamment).
La force des communautés réelles et virtuelles	Les lieux ne fonctionnent que s'ils sont animés par une communauté, qui est à la fois locale (et réelle) et relayée par une communauté plus large (et virtuelle).

Figure 19 : Caractéristiques représentatives d'un lieu d'innovation en fabrication additive

Objectifs des ateliers de fabrication numérique

Selon le rapport concernant l'état des lieux des ateliers de fabrication numérique publié en 2014¹¹⁵, l'émergence mondiale des FabLabs, des *hackerspaces*, des ateliers sur abonnement et d'autres espaces plus ou moins ouverts dédiés à la conception, au prototypage, à la production, à la réparation et/ou la transformation d'objets physiques constitue un phénomène remarquable ces dernières années. À tel point qu'il a conduit le gouvernement à faire de ces ateliers de fabrication numérique l'une des priorités de sa « feuille de route numérique ».

Ce développement rapide s'explique par des tendances de fond qu'il semble judicieux d'expliquer :

- **L'avancée du modèle numérique :** conjonction entre la numérisation de la conception, de la production et de la gestion du cycle de vie des objets industriels ; la baisse du prix des logiciels et des machines à commande numérique ; et la mise en réseau des acteurs, facilitée par le développement de l'internet et la standardisation des formats.

¹¹⁴ État des lieux et typologie des ateliers de fabrication numérique, Conseil & Recherche – Fing, avril 2014.

¹¹⁵ État des lieux et typologie des ateliers de fabrication numérique : Fab Labs, DGE, 2014.

- **L'extension de l'*open source***, né dans le monde du logiciel, à l'électronique (ex. contrôleurs Arduino), aux machines (ex. imprimante 3D RepRap et ses forks), voire aux biens de consommation (machine à laver et voitures *open source* par exemple).
- **Le développement rapide de toutes sortes de « tiers ateliers »** (de médiation, de services, de travail, culturels, communautaires...), qui fonctionnent comme des nœuds physiques de réseaux à la fois physiques et numériques, locaux et globaux.
- **La recherche de nouvelles formes d'apprentissage** ainsi que de reconnaissance professionnelle qui revalorisent le « faire » et « l'intelligence de la main », tout en les associant aux possibilités offertes par le numérique.

Cette même étude présente une tension entre un **objectif matériel (production de biens physiques) et un objectif immatériel (production de savoir et d'innovation)**, la question est de savoir si ce dernier est une fin en soi ou un moyen (d'apprendre, d'innover).

Pour Neil Gershenfeld (professeur au MIT), le FabLab est un lieu de production qui doit évoluer pour atteindre, *in fine*, des capacités de conception d'objets complexes. Mais la réalité de certains lieux est différente : lorsqu'il est possible de fabriquer un objet (donc quand il y a des machines adaptées pour remplir ces fonctions, ce qui n'est pas toujours le cas), ce dernier est au mieux une maquette, ou un prototype.

L'objectif de nombreux ateliers est ainsi tourné vers **l'information, entendue au sens large, c'est-à-dire le savoir**, le savoir-faire et le design d'objets (les plans). Les machines-outils sont alors un prétexte pour apprendre un savoir, acquérir un savoir-faire, créer un nouveau savoir, ou créer un nouveau modèle de biens physiques. Les ateliers de ce type sont en particulier les ateliers situés dans les écoles et les universités, dans lesquels on vient apprendre en « mode projet » ; les ateliers situés dans une entreprise, dans lesquels on vient innover en mode « pair à pair » ; et de nombreux FabLabs ayant une vocation de « capacitation » (*empowerment*).

Mais d'autres ateliers sont résolument tournés vers la production d'objets physiques, comme une fin en soi, et non comme un moyen d'apprendre ou d'innover. Cela n'implique pas que l'apprentissage ou l'innovation y soient absents, mais qu'ils sont secondaires dans la présentation du service. C'est le cas typique des ateliers plus grands, d'ateliers que l'on pourrait qualifier de plus « professionnels ». Ils sont en général équipés de machines professionnelles, onéreuses, mais permettant d'obtenir un travail de bonne qualité. On peut ainsi y produire un prototype fonctionnel voire une petite série de produits finis.

On obtient ainsi trois fonctions principales de ces ateliers : le prototypage et l'innovation, la fabrication personnelle, l'apprentissage et le « pair à pair », qui se veut une modalité d'apprentissage innovante.

Caractérisation du réseau de FabLabs existant et poids de l'impression 3D

Le recensement exact du nombre de FabLabs français n'est pas possible aujourd'hui, d'une part car il n'existe pas de définition consensuelle du terme « FabLab », et d'autre part car il existe beaucoup de projets qui en amont de leur création sont tentés d'utiliser le terme « FabLab » comme un mot-clé *marketing* au service de leur stratégie. Tout ceci rend l'étude quantitative et la cartographie de ces initiatives assez complexes et relève d'un travail à part entière.

Il est envisageable de s'appuyer sur des sources d'information qui fournissent un certain niveau d'informations, à l'image des réseaux de FabLabs, sans que cela puisse être exhaustif. Notons par exemple le Réseau des FabLabs Français, la FabFoundation ou l'Association des FabLabs d'entreprises Fab&Co. Les deux premiers réseaux qualifient et cartographient leurs membres, mais l'approche répertoire uniquement les FabLabs qui s'y sont manifestés.

Il n'existe ainsi pas de statistiques consolidées sur les FabLabs français. Les nouveaux outils CRM dédiés aux FabLabs tels que fab-manager.com (qui a notamment bénéficié des Investissements d'avenir) pourraient permettre de remplir une telle mission.

Par ailleurs, le rapport concernant l'état des lieux des ateliers de fabrication numérique¹¹⁶ décrit une grande diversité de FabLabs et nous présente plusieurs types de lieux en fonction de différents critères d'analyse, en fonction de leurs degrés de maturité (ouvert, à l'état de pilote ou encore en projet), en fonction du profil de la structure porteuse (association, université, société, etc.), et en fonction de l'objectif poursuivi par la structure (recherche, innovation, éducation, etc.).

La typologie des FabLabs établit dans ce rapport distingue les ateliers d'entreprise, des ateliers grand public, des ateliers institutionnels, et des ateliers professionnels :

- Ateliers d'entreprise : Le FabLab d'entreprise est un atelier créé par une entreprise privée à destination de ses salariés et de son écosystème. L'objectif de ce type d'atelier est de créer un espace libéré de toute contrainte organisationnelle pour favoriser la créativité et l'innovation. Son degré d'ouverture au public est nul à faible. (Ex : SebLab, FabLab interne à l'entreprise SEB).
- Ateliers grand public : Souvent assimilé au concept de FabLab, c'est un atelier de fabrication numérique qui propose régulièrement des ouvertures à tous (gratuites), ou adaptées à des profils tels que les scolaires, les chômeurs ou les artistes. L'objectif pour lui est de sensibiliser et donner accès aux machines à commandes numériques au plus grand nombre. Dans l'esprit du MIT, il s'agit bien de permettre à « n'importe qui » de fabriquer « n'importe quoi ». L'apprentissage est central, mais le prototypage et l'innovation y sont également importants. (Ex : zBis à la Roche-sur-Yon).
- Ateliers institutionnels : L'atelier institutionnel est un atelier de fabrication numérique créé dans, par et pour une institution, donc dans un objectif de service public. Il est généralement associé à des universités et à de grandes écoles avec le concours du territoire au sens large (organismes publics, parapublics et bassin entreprises). Il est généralement à destination des étudiants et/ou des chercheurs mais ouvre également à tous. (Ex : FaLab de l'université de Cergy-Pontoise).
- Ateliers professionnels : L'atelier « professionnel » est un atelier de fabrication numérique, lui-même souvent inséré dans le marché, qui recherche un public professionnel pour une utilisation professionnelle (entre le prototypage et la production). On y retrouve l'artisan ou l'artiste, les créateurs et *start-up* qui utilisent l'atelier comme espace de travail ou pour utiliser des machines qu'ils ne pourraient entretenir ou utiliser seuls (joaillerie, mécanique, couture, etc.). (Ex : YOUFACTORY à Lyon).

En tant qu'initiative de prototypage rapide en contexte non industriel, les imprimantes 3D donnent vie aux concepts et aux créations très en amont dans le cycle de design. Pour Richard d'Aveni de Harvard Business Review, le prototypage de nouveaux produits ou d'amélioration de produits existants est l'application commerciale la plus développée à l'heure actuelle, couvrant près de 70 % des transactions marchandes totales de l'impression tridimensionnelle.

Ce constat est le même en amont de la chaîne de valeur dans les espaces d'innovations où le prototypage fournit aux designers, ingénieurs et même aux consommateurs une solution idéale pour fabriquer des pièces ou des objets fonctionnels. Ceci leur permet alors de pouvoir manipuler et d'évaluer l'utilisation des produits. Les innovateurs peuvent s'apercevoir plus facilement des défauts et vont rapidement effectuer des reprises sur leurs dessins afin d'améliorer leur projet¹¹⁷. « Les imprimantes donnent ainsi vie aux concepts et aux créations en amont dans le cycle de design » explique Richard d'Aveni.

Ainsi, l'ensemble des FabLabs qui développent des offres de services ont à coup sûr une offre dédiée à l'impression 3D. Il est impossible aujourd'hui de ne pas aborder la question. Cependant, il est également impossible de quantifier davantage le poids de la fabrication additive dans ces tiers-lieux, faute de données à ce sujet.

¹¹⁶ État des lieux et typologie des ateliers de fabrication numérique : FabLabs, DGE, 2014.

¹¹⁷ *La révolution de l'impression 3D*, par Richard d'Aveni, Harvard Business Review Février-mars 2016.

Analyse de la demande dans les technologies grand public

« Les particuliers utiliseront la fabrication additive à domicile pour imprimer des objets du quotidien, mais seulement à partir de 2030 » disait la chercheuse de l'*University College* de Londres, Ludmila Striukova¹¹⁸ à l'occasion du salon 3D PrintShow 2015. Cet horizon semble cependant encore lointain et incertain. En effet, les besoins d'impression 3D pour les foyers ne sont pas encore bien définis. Après avoir dû se séparer de 20 % de son effectif à la fin de l'année 2015¹¹⁹, Makerbot a particulièrement travaillé pour réorienter sa stratégie en ciblant d'avantage le marché des écoles et de la recherche académique, un segment beaucoup plus porteur et qui devrait permettre de mieux toucher les consommateurs. La chute des actions des grands offreurs de technologie grand public que sont Stratasys, 3D Systems et ExOne peut s'expliquer par une saturation des utilisateurs précoces et un attentisme des autres consommateurs grand public.

Considérée par beaucoup comme un épiphénomène, l'impression 3D grand public doit encore lever de nombreuses barrières pour se démocratiser et aller au-delà d'une simple poignée de porte ou d'un gobelet en plastique. Les principales demandes vis-à-vis de ces technologies peuvent être résumées en plusieurs axes de réflexion :

- **Un prix jugé trop élevé pour des applications « gadget »** : alors que de nombreuses imprimantes sont présentes sur le marché pour moins de 1 000 €, il s'avère que ce positionnement prix ne contente personne. En effet, ces machines *low-cost* qui génèrent des formes souvent grossières du fait d'une résolution d'environ 0,1 mm sont jugées beaucoup trop chères par la communauté grand public qui s'attend davantage à voir des produits dont le prix se rapprocherait des imprimantes traditionnelles (entre 100 et 200 €). Le constat est similaire au niveau des pièces fabriquées par impression 3D qui restent beaucoup plus coûteuses que par des techniques de fabrication traditionnelles. Pour économiser quelques centaines d'euros, certains particuliers n'hésitent pas à privilégier une livraison en kit même s'ils n'ont pas les compétences pour monter correctement la machine. La baisse du prix de vente ne garantira pas l'adoption de la technologie tant que le grand public n'aura pas identifié des applications concrètes de l'impression 3D.
- **Un besoin de sensibilisation sur les usages de l'impression 3D** : démontrer le véritable potentiel de la technologie au-delà de ce qui est présenté dans les médias est un vrai besoin pour le particulier qui a besoin de cas concrets d'utilisation. En effet, les premières initiatives menées dans le domaine du *retail* ont dû faire face à une vague de consommateurs qui imaginaient pouvoir tout faire en impression 3D et qui repartaient frustrés face à la réalité technique et économique. De ce fait, le *buzz* médiatique généré autour de la fabrication additive peut être considéré comme contre-productif. Par ailleurs, le grand public est très axé sur le prix de la machine, ce qui a pour conséquence directe de bloquer les usages et de maintenir l'imprimante au stade de gadget. L'adoption massive de la fabrication additive par le grand public ne passera donc que par une sensibilisation poussée aux applications possibles.
- **Un manque de boutiques et de relais physiques** : étant donné qu'il s'agit d'un produit relativement nouveau, le consommateur peut émettre le besoin de proximité et de dialogue pour se rassurer et se faire conseiller sur le type de machines ou de matériaux par rapport à ses besoins. De ce fait, des premières initiatives françaises, consistant à développer des réseaux de boutiques physiques ou à former les distributeurs pour assurer le SAV et l'aide au montage pour les imprimantes en kit, ont reçu un accueil très positif de la part des utilisateurs.

¹¹⁸ L'imprimante 3D à domicile, une fausse vision du futur ? http://www.clubic.com/pro_2015

¹¹⁹ Makerbot licencie plus de 100 employés en 2015 <http://www.3dnatives.com/makerbot-licencie-employes-10102015/>

- **Une gestion des fichiers numériques difficilement accessible pour un particulier :** pour tout débutant en conception assistée par ordinateur, la modélisation 3D et la préparation du fichier numérique avant fabrication peut s'avérer complexe et décourageant. « Personne ne devrait avoir besoin d'être un designer expérimenté, un architecte ou un développeur informatique pour pouvoir utiliser une imprimante 3D » expliquait Chris Elsworthy, dirigeant de CEL¹²⁰. En effet, le consommateur grand public ne maîtrise pas les logiciels actuels associés à l'impression 3D et est très demandeur de solutions ergonomiques et plus simples d'utilisation pour se familiariser. La complexité des outils face aux faibles connaissances des utilisateurs représente un des freins les plus importants pour la démocratisation de la fabrication additive auprès du grand public. En réponse à ce besoin, des solutions faciles à prendre en main apparaissent sur le marché à l'image de la *start-up* française 3D Slash¹²¹ (qui propose une interface en accès libre et inspirée pour modéliser de façon très simple son propre objet 3D) ou encore du système Fab Forms. Imaginé par des chercheurs du MIT en association avec des chercheurs en Israël, ce dernier élimine automatiquement les paramètres qui génèrent des designs instables et propose par le biais de curseurs des modèles valides¹²². Une approche également encouragée par de nombreuses enseignes de commerce de détail qui mettent à disposition du consommateur un catalogue d'objets numériques qu'il peut personnaliser. Cette stratégie permet de répondre à la fois au manque de compétence et au besoin de fabriquer un objet unique.

- **Plus de briques technologiques complémentaires pour développer le marché :** pour que l'impression 3D se démocratise sensiblement dans les foyers, il semble nécessaire de développer de nouvelles technologies qui viendront compléter l'offre. Thierry Rayna, professeur d'économie à l'école Novancia affirme que le marché de l'impression 3D ressemble en tout point à celui des ordinateurs personnels. « C'est l'arrivée des imprimantes et d'Internet qui a permis à ce secteur de faire des bonds et d'entrer massivement dans les foyers¹²³ ». De ce fait, l'impression 3D n'a pas vocation à être proposée seule mais plutôt comme complément dans une offre plus globale. Les difficultés rencontrées par les industriels pour développer des systèmes de scan 3D satisfaisants ont véritablement freiné la croissance du marché de l'impression 3D, notamment du fait qu'ils représentent une alternative intéressante à la modélisation 3D. Aujourd'hui, des applications smartphones et des scanners 3D apparaissent afin de combler ce manque¹²⁴, mais il ne s'agit là que d'un exemple de brique technologique. Des réflexions sont également en cours pour élargir l'offre en intégrant les objets connectés (Raspberry Pi, Arduino) au service d'impression 3D et ainsi générer de nouvelles idées. Enfin, on peut citer l'exemple des produits intermédiaires comme les stylos 3D qui, à défaut de représenter véritablement une brique technologique complémentaire, apportent une solution de transition pour créer manuellement son modèle 3D, sans robotique ni modélisation 3D. Un produit qui reste aujourd'hui destiné aux loisirs créatifs mais qui pourrait se positionner comme véritable levier d'adoption de la technologie.

- **L'importance de la sensibilisation à moyen terme par l'éducation :** si l'éducation représente aujourd'hui entre 20 et 30 % des ventes des technologies d'impression 3D grand public, la formation des jeunes en France est bien moins importante qu'en Angleterre ou aux États-Unis où l'utilisation des outils de conception et d'impression 3D est enseignée. Cette sensibilisation à moyen terme représente un enjeu double, tant en

¹²⁰ New Design Issue 118 Supplement 2015 3d printing Additive manufacturing Product Development p. 6.

¹²¹ AstroPrint et 3D Slash s'associent pour simplifier l'impression 3D <http://www.3dnatives.com/> 2015

¹²² Customizable Objects for Fabrication with Validity and Geometry Caching <https://www.youtube.com/watch?v=LVOVmlbeTY>

¹²³ Besoin d'un boost, « comme Internet pour le PC » <http://www.msn.com/fr-ca/actualites/science-et-techno>

¹²⁴ XYZprinting et Intel développent un scanner 3D à moins de 300€ <http://www.3dnatives.com/> 2015.

termes de diffusion auprès du grand public que de compétitivité industrielle. À l'heure où le code informatique commence à être enseigné dans les écoles, il existe une vraie demande d'expérimentation et de découverte de la fabrication additive, sous condition d'avoir un formateur réellement familier avec la technologie pour aider les élèves à créer les usages.

- **Renforcer les aspects sécurité du consommateur grand public** : même si ce facteur ne semble pas freiner les idées des consommateurs, il est important de le considérer afin d'éviter un éventuel scandale sanitaire à l'image de l'interdiction de l'amiante dans les années 1990. Que ce soit au niveau du consommable (vapeurs, composition), de l'utilisation de la machine ou de la pièce, il y a un besoin de clarifier les aspects sécuritaires et ainsi rassurer le consommateur grand public.

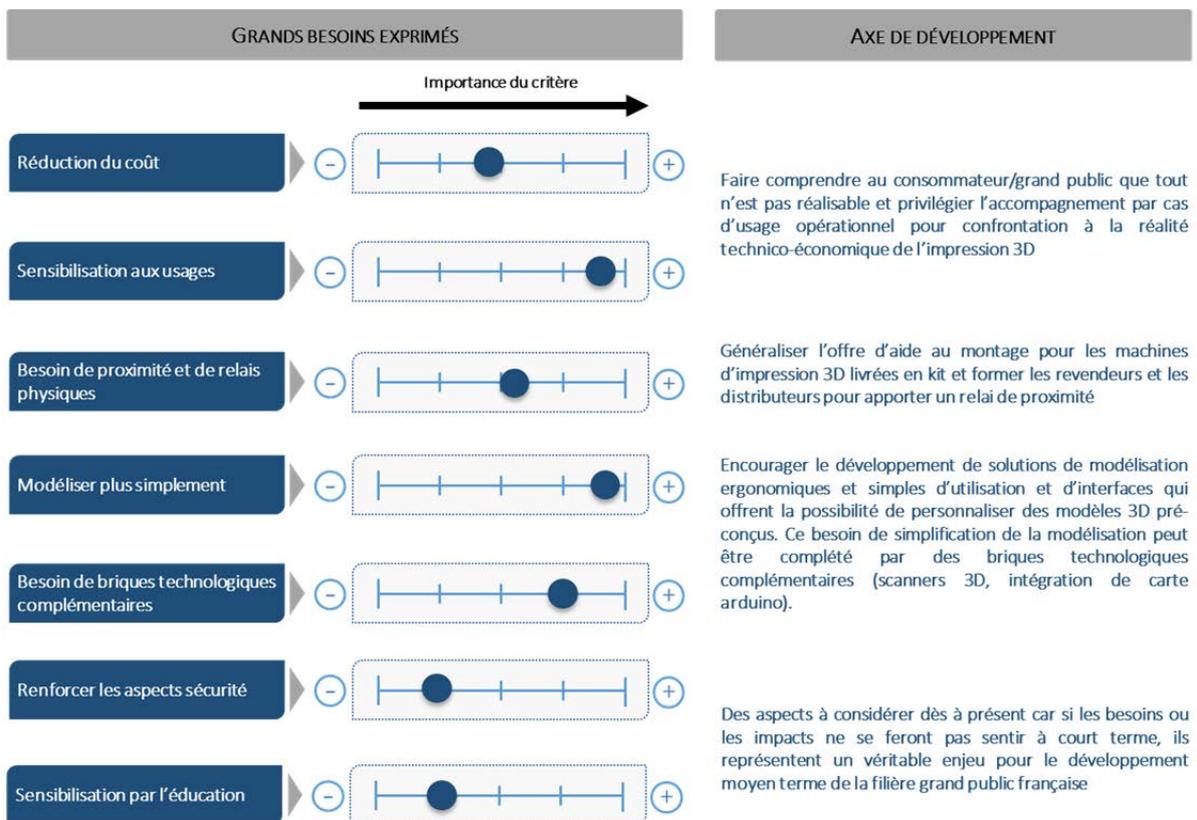


Figure 20 : Synthèse des principales attentes vis-à-vis des technologies livrées grand public¹²⁵

¹²⁵ Évaluation issue de la compilation des différents retours des acteurs consultés.

Conclusion et enseignement sur l'analyse de la demande grand public

Alors que beaucoup d'acteurs ne croient plus à l'impression 3D grand public du fait d'une certaine stagnation du marché et d'un désintérêt progressif des consommateurs, il est important de comprendre que l'adoption des technologies a été considérablement freinée par le *buzz* médiatique. En effet, le consommateur est confus entre des annonces lui faisant croire qu'il suffit d'appuyer sur un bouton pour avoir son objet et une technologie gadget aux usages limités. Aujourd'hui, les principaux freins à l'appropriation de l'impression 3D restent l'apprentissage de la modélisation 3D qui demande un investissement personnel et le manque de formation et de sensibilisation sur les applications potentielles. Enfin, la généralisation de scans 3D sur smartphone ou sur les ordinateurs avec par exemple le HP Sprout constituent des innovations sur des briques technologiques complémentaires qui peuvent accélérer l'adoption de la technologie. Confinée dans un premier temps au public de niche des amateurs-bricoleurs, la généralisation de l'impression 3D grand public ne devrait pas exploser avant une dizaine d'années mais devrait profiter de machines de plus en plus accessibles et de meilleure qualité et de leur complémentarité avec les plateformes d'impression en ligne.

ANALYSE DE L'OFFRE

Ce chapitre recense et cartographie l'offre française et les compétences associées à tous les niveaux de la chaîne de valeur. L'objectif est ici d'apporter une vision consolidée de l'offre et de la dynamique du secteur, d'identifier les écosystèmes de production et d'innovation, et d'apporter un éclairage sur le positionnement concurrentiel des industriels, tant sur le territoire national qu'au niveau européen et international.

Introduction

Depuis le premier brevet déposé par le Français Jean-Claude André en 1984, la fabrication additive a connu un développement soutenu grâce au prototypage rapide dans un premier temps, puis dans l'outillage rapide et enfin dans la fabrication directe de pièces. La généralisation de ces usages et l'appropriation de cette technologie par différents marchés d'application ont contribué à la diversification des machines ou des matériaux. L'impression 3D a été utilisée historiquement pour réaliser des maquettes servant à valider une fonction ou appuyer un discours commercial. Les machines plastiques représentent encore une large majorité des utilisations. Cependant, on observe une accélération des développements dans le domaine des matériaux métalliques de fabrication « conventionnels », des céramiques ou des métaux précieux, ce qui entraîne une multiplication des machines de fabrication ainsi que des matériaux associés.

En effet, un ajout de matière couche par couche peut être réalisé de multiples manières : réticulation¹²⁶ de résine liquide par passages successifs de rayons ultraviolets, dépôts successifs de matière thermoplastique fondue, projection de liant sur poudres céramiques ou encore frittage¹²⁷ laser de poudres métalliques. Cette grande diversité de procédés et de matériaux associés peut prêter à confusion et nécessite d'être explicitée pour percevoir les avantages et limites de chacun. Après avoir dressé un panorama exhaustif des technologies additives et des matériaux utilisés, ce chapitre proposera une analyse de l'offre française au regard des besoins techniques, économiques et sociétaux exprimés précédemment et examinera sa capacité à se positionner sur la scène internationale.

L'ensemble des différents procédés existants est résumé dans le tableau suivant. Le détail des différentes technologies est disponible en annexe.

Famille de procédé	Matériaux	Avantages	Inconvénients
Photopolymérisation de résine SLA/DLP	Photopolymères (possibilité d'inclure des charges métalliques ou céramiques) Cire	Vitesse de fabrication État de surface	Nécessité d'utiliser des supports compliqués à retirer
Projection de gouttes de matière	Thermoplastiques (ABS, PC, PA...) Photopolymères Cire	Vitesse de fabrication (compromis avec la qualité de la pièce) Supports non nécessaires Nombreux matériaux (polymères) disponibles	Prix des machines élevé

¹²⁶ En chimie des polymères, la réticulation correspond à la formation d'un ou de plusieurs réseaux tridimensionnels, par voie chimique ou physique.

¹²⁷ Le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion.

Projection de liant/ binder jetting (BJ)	Thermoplastiques (ABS, PC, PA...) Métaux Minéraux (sable, pierre...)	Nombreux matériaux disponibles Supports non nécessaires Vitesse de fabrication	Prix des machines élevé Précision et rugosité inférieures aux autres technologies
Frittage laser sélectif (<i>Selective Laser Sintering – SLS</i>)	Polymère (surtout PA et dérivés) Métaux (plutôt en SLM) Céramique	Supports non nécessaires (polymère) Matériaux identiques (ou proches) des matériaux utilisés classiquement	Porosité des pièces Traitement thermique nécessaire Rugosité importante
Fusion Laser Sélective (<i>Selective Laser Melting SLM</i>)	Métaux uniquement	Matériaux identiques (ou proches) des matériaux utilisés classiquement	Nécessité d'utiliser des supports compliqués à retirer Prix des machines élevé (le plus élevé)
Fusion par faisceau d'électrons (<i>Electron Beam Melting – EBM</i>)	Métaux uniquement (surtout titane et chrome cobalt)	Fusion sous vide (peu ou pas d'oxydation) Supports mécaniques non nécessaires	Rugosité importante des pièces Porosité résiduelle (mais possibilité HIP)
Projection de poudres dans un flux d'énergie (DLMD/CLAD)	Métaux uniquement	Possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions Possibilité de combiner les matériaux Vitesses de construction élevées	Prix des machines élevé Formes avec peu (ou pas) de détails
Dépôt de fil fondu (<i>Fused Deposition Modeling</i>)	Polymères	Procédé bon marché Nombreux polymères disponibles	Faibles propriétés mécaniques des pièces Vitesse de fabrication peu élevée Rugosité importante des pièces
Assemblage de couches/ Stratoconception/LOM	Tous matériaux en plaques	Possibilité de réaliser des pièces de grandes dimensions Possibilité de combiner les matériaux	Nécessité d'assembler les couches Pertes dues à la découpe (ou usinage) des différentes strates

Tableau 5 : Synthèse des procédés de fabrication

Cartographie de l'offre française : des compétences à tous les niveaux de la chaîne de valeur

Comme expliqué tout au long de ce rapport, la fabrication additive mobilise une chaîne de valeur très étendue allant des machines aux matériaux, en passant par la fabrication de pièces ou le développement d'outils logiciels. Devant cet enjeu industriel, la France doit s'interroger sur son positionnement dans un contexte mondial dans la mesure où l'écosystème national comporte des acteurs à tous les niveaux de la chaîne de valeur mais doit franchir un cap en termes de structuration. La cartographie de l'offre française en fabrication additive présentée dans cette partie n'a pas pour vocation à mettre en valeur des acteurs en particulier. L'objectif

consiste à identifier les forces et les faiblesses de l'écosystème national, afin de mieux appréhender sa capacité à se positionner dans un environnement mondial.

On observe des différences significatives entre les chaînes de valeur grand public et industrielle (respectivement BtoC et BtoB). En effet, la chaîne est beaucoup plus directe du côté du grand public, avec un lien direct entre les fabricants d'imprimantes 3D et les utilisateurs. Les collaborations avec d'autres prestataires de services sont minoritaires, et les particuliers se forment essentiellement par eux-mêmes à l'utilisation de ces dispositifs. La situation est très différente du côté industriel, avec un besoin beaucoup plus important en prestataires de services et bureaux d'études, qui viennent ainsi répondre aux besoins d'adaptation des industriels afin d'appréhender l'ensemble du potentiel offert par ces nouvelles technologies.

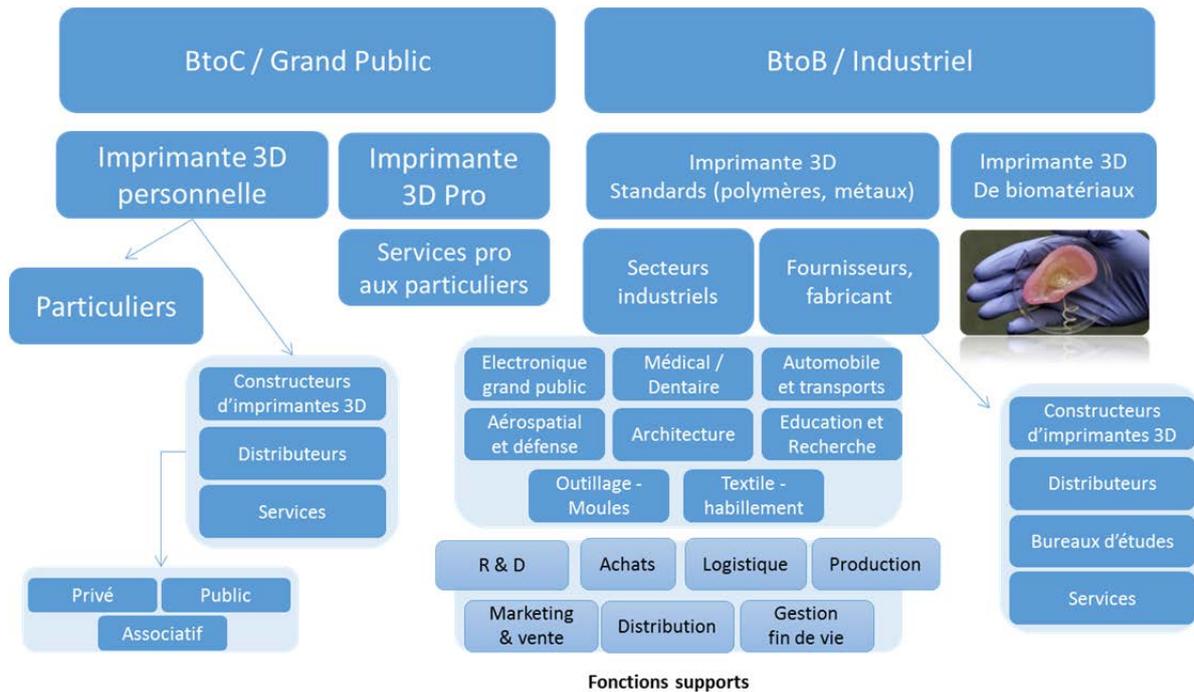


Figure 21: Représentation comparative de la chaîne de valeur de la fabrication additive entre les applications industrielles ou grand public

Animé par une volonté de structurer la filière française de fabrication additive dès 2014, le pôle ECM2 est arrivé au constat que la chaîne de valeur nationale se présentait sous la forme de « sablier ». Cette notion sous-entend que le territoire comporte des acteurs importants aux deux extrémités de la chaîne de valeur avec de grands donneurs d'ordres et utilisateurs de pièces produites par fabrication additive d'un côté et une recherche de haut niveau combinée à une expertise dans le domaine des matériaux de l'autre côté. Cependant, les structures à l'intérieur de la chaîne de valeur restent peu nombreuses ou peu consolidées et nécessitent d'être développées davantage (contrôle et normalisation, conception et fabricants de machines, biens d'équipements).

Renforcer et équilibrer la filière à des niveaux de la chaîne de valeur porteurs de valeur ajoutée et créateurs d'emplois est un enjeu majeur souligné par le pôle ECM2 depuis 2014. En effet, il semble important, *a minima*, d'informer, de mettre en relation les acteurs et d'explicitier l'écosystème.

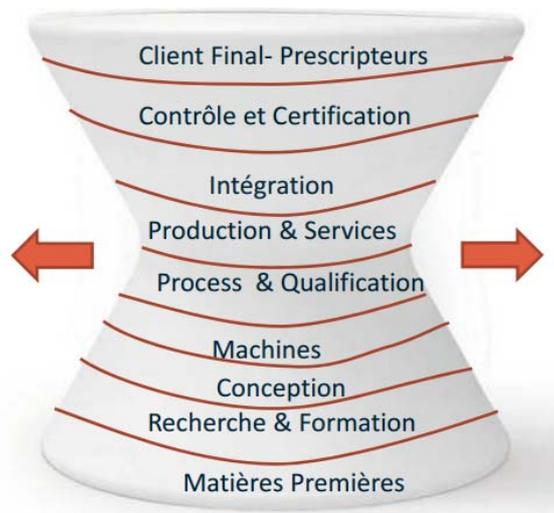


Figure 22 : Constat : une chaîne de valeur française en sablier¹²⁸

Les fabricants de machine

Impression 3D Grand Public : une multitude de fabricants de machines mais un besoin de structurer la distribution et le service après-vente

Souvent proposées à des prix très accessibles, les imprimantes 3D en kit représentent un segment de marché dynamique en France qui a contribué à l'émergence d'une multitude d'acteurs sur le territoire à l'image de Tobeca, Spider Bot, 3D Modular Systems ou E-motion Tech. La plupart des solutions utilisent le dépôt de fil fondu et se basent sur un modèle *open source* mais, avec l'expiration des brevets de frittage et de stéréolithographie, de nouvelles machines grand public sont attendues dans les prochaines années. On peut également citer d'autres jeunes fabricants d'imprimantes 3D personnelles tels que Volumic, Obro ou Dood dont certains visent déjà l'international. En parallèle de cette multitude de fournisseurs de machines, on observe une structuration du réseau de distribution et du service après-vente, tirée par une demande du consommateur qui souhaite davantage de proximité. Dans une dynamique d'économie de partage, les sociétés de services dans l'impression 3D à la demande, la mise en relation entre designers, possesseurs d'imprimantes et utilisateurs ou encore l'échange de modèles 3D en ligne font également partie du paysage français. Il s'agit là d'un créneau prometteur dans la mesure où ces acteurs devraient permettre d'accélérer l'adoption de l'impression 3D dans les territoires en simplifiant l'accès à la 3D, à l'image de l'éditeur 3D Slash. Cependant, aucun de ces acteurs ne possède actuellement une masse critique d'utilisateur lui permettant d'envisager un développement à plus grande envergure¹²⁹. En conclusion, la filière grand public est composée d'acteurs de taille modeste à tous les niveaux de la chaîne de valeur. Elle se distingue de la filière industrielle par une très forte intensité concurrentielle qui conduit à une haute fragmentation du marché.

¹²⁸ « Fabrication additive : Structuration d'une filière » présentation P. Villard Pôle EMC2.

¹²⁹ Notamment à l'international.



Figure 23 : Principaux acteurs de la filière française de l'impression 3D grand public¹³⁰

Les machines industrielles : une nouvelle dynamique lancée par Fives-Michelin

Sur un marché dominé par Stratasys, 3D Systems et EOS, le développement de machines spécifiques et innovantes se trouve relativement freiné par la présence d'un grand nombre de brevets et fait face à une stratégie d'acquisition des nouveaux acteurs innovants relativement poussée. Cette véritable course aux brevets permet de conserver un certain *leadership* et de bloquer l'apparition de nouveaux entrants : ainsi, le Français Phenix Systems, qui avait déposé une soixantaine de brevets sur le frittage, a été racheté en 2013 par 3D Systems, mais maintient ses activités à Riom, en Auvergne-Rhône-Alpes. Alors que certains experts considèrent que « la bataille des machines est perdue dans la mesure où les constructeurs français les plus prometteurs ont été acquis par des acteurs concurrents ou font face à de nouveaux entrants puissants à l'image de Google ou de Hewlett Packard¹³¹ », la France compte aujourd'hui trois fournisseurs de machines qui affichent une volonté de se développer sur la fabrication additive métallique (très précisée par l'aéronautique) et de s'orienter rapidement vers l'international :

- Spin-off de l'IREPA Laser Strasbourg, BeAM développe avec Fives une technologie de fusion directe par projection de poudres depuis sa création en 2012 et offre la possibilité de réparer, d'améliorer une pièce existante ou de créer un objet complet. Son développement est poussé par la demande de l'industrie aéronautique : en 2013, la *start-up* faisait sensation réparant des pièces de moteurs d'avions pour le compte de Chromalloy pendant que ce dernier accentuait ses efforts pour convaincre Pratt & Whitney et obtenir les qualifications nécessaires. À ce jour, Chromalloy a atteint un volume de commandes suffisant pour internaliser la production, ce qui a justifié l'achat d'une machine dédiée. En 2015, Safran a également officialisé une commande de machine à BeAM après une année d'études de faisabilité avec le constructeur afin d'industrialiser le procédé au sein du centre de recherche et de technologies Safran Tech¹³². Premier constructeur Européen pour ce type de machines, Beam cible les acteurs de cinq segments cibles (universités et centres de recherche, industrie, aérospatiale, énergie et défense) aussi bien dans l'acquisition de ses machines, que dans leur

¹³⁰ Source : Tech2Market.

¹³¹ Pour une impression 3D « Made in France », Arnaud Coulet, Industrie et Technologies, juillet 2015.

¹³² Le Groupe Safran commande une machine à BeAM, Primante3d.com, Juin 2015.

- utilisation allant de la fabrication de pièces métalliques neuves à la réparation ou la transformation de pièces existantes ;
- Repris *in extremis* par le groupe Gorgé en 2013, notamment grâce au soutien du ministère de l'Industrie, Prodways se développe à vive allure grâce à sa technologie brevetée de photopolymérisation par rayons UV DLP MOVINGLight® et à une gamme de machines de frittage laser polymère. Le premier marché de ce fleuron national est le dentaire mais sa stratégie vise à étoffer son offre multitechnologie en développant des services nouveaux pour devenir *leader* mondial. Dans la continuité de son accord stratégique signé en 2015 avec le Chinois Hunan Farsoon, Prodways annonçait pour 2016 la commercialisation d'une machine dédiée à la fabrication de pièces métalliques pour élargir son offre et s'imposer sur le marché mondial. Le développement de matériaux innovants étant au cœur de la stratégie du fabricant, Prodways a notamment signé un partenariat avec le CEA Liten et plus récemment avec l'Allemand BASF pour la commercialisation de la nouvelle poudre de frittage laser PA6¹³³. Une annonce qui fait écho avec l'annonce de collaboration entre Arkema et HP sur la nouvelle technologie d'impression Multi Jet Fusion ;
 - Après plus d'une dizaine d'années à développer la fabrication additive pour ses besoins internes (fabrication de lamelles aux formes originales utilisées dans les moules pour dessiner les sculptures des pneus), Michelin s'est associé au groupe Fives au sein d'un *joint-venture* à 50-50 afin de proposer des machines de fabrication EBM et LBM et des unités de production clés en main à l'horizon 2017-2018.

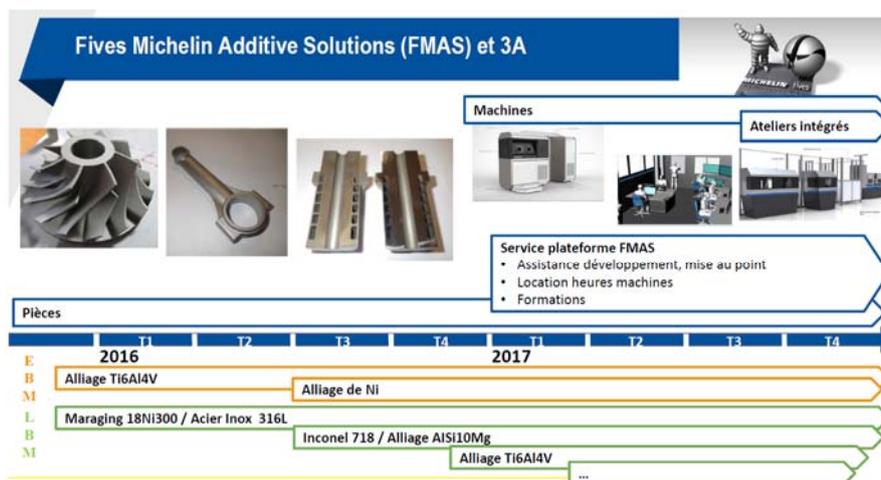


Figure 24 : Évolution de l'offre Five Michelin Additive Solutions - 3A (Présentation Rafam 2016)

Moins connue du fait d'une utilisation moins importante de la céramique en fabrication additive, la société 3D Ceram a capitalisé sur dix années d'expérience et de production régulière pour développer et commercialiser sa propre machine : la Ceramaker. Basée sur une technologie laser et destinée à répondre au manque de systèmes fiables dans le domaine des céramiques, la solution a connu en 2015 des améliorations afin de simplifier les étapes de chargement de la pâte céramique et ainsi réduire la consommation de matière et augmenter la qualité de la pièce. Il est important de souligner que ces acteurs ne sont plus seulement des fournisseurs de machines mais sont fournisseurs également de solutions. En effet, comme le démontre la prise de participation majoritaire de Michelin chez 3A en 2015 dans la foulée de l'acquisition d'Initial par Gorgé/Prodways, les machinistes entendent développer le marché en produisant des pièces à destination des grands donneurs d'ordres et des PME à l'aide d'un parc de machines important. Ces rapprochements attestent d'une consolidation de l'offre et du savoir-faire procédé/matière/produit à la manière des *leaders* Stratasys et 3D Systems qui lient systématiquement machines et matériau.

¹³³ Prodways présente la promaker P100 et signe un partenariat avec BASF, mai 2016.

En conclusion, l'offre française en termes de machines de fabrication additive industrielle semble complète avec des positionnements multitechnologies et multimarchés et des acteurs *leaders*

La fabrication de matériaux

Fournisseurs de matériaux

Les matériaux¹³⁴ sont au cœur des technologies de fabrication additive et sont destinés à rester des productions à forte valeur ajoutée technologique, souvent sur demande. Ils se vendent à des prix très élevés (10 à 40 fois plus élevés que les matériaux traditionnels équivalents) et présentent des enjeux de recherche décisifs, qu'il s'agisse des entreprises dominantes pour la formulation des polymères ou de laboratoires de recherche fondamentale comme le CEA pour les matériaux architecturés. La France, reconnue pour sa recherche en matériaux, à la fois industrielle et fondamentale, a une carte à jouer. Arkema (polymères avancés) et ERASTEEL (poudres métalliques) peuvent prétendre à un rôle de *leader* mondial. La métallurgie des poudres est un secteur où la France possède de réelles compétences (Sintertech, ERASTEEL avec Eurotungstène, Aubert & Duval, ERASTEEL) et où l'innovation produits/process joue un rôle primordial. Un autre exemple de fournisseur de poudres est Poudmet (France), qui produit des poudres de cuivre et d'alliages non ferreux, destinées à la fabrication de pièces pour le secteur des transports.

Focus sur les fournisseurs de matière polymère pour la fabrication additive ¹³⁵:

En termes de fournisseurs de photopolymères, les entreprises clés sont : 3DSystems, Asiga, B9Creator, Bucktown Polymers, Carima, DSM, DWS, Envisiontech, Kevvox, Makerjuice labs, Rahn, **Sartomer**, **Arkema (France)**, Stratasys. Les entreprises clés pour les filaments thermoplastiques sont : 3D Systems, Airwolf3D, Colorfabb, Esun, Faberdashery, KDI, Markforg3D, Inventables, Madesolid, Stratasys and Taulman 3D. Tandis que les fournisseurs de produits chimiques connexes sont : Evonik, LG Chem, Natureworks LLC and Solvay. Les principaux producteurs de poudres thermoplastiques, principalement utilisées par frittage sélectif laser sont : 3D Systems ALM, **Arkema (France)**, Arzauno, CRP, EOS, **EXCELTEC (France)**, Graphite, OPM and Taulman 3D.

La qualité des poudres est un paramètre important, leur aspect sphérique, leur pureté, leur densité, le fait que lors de la fusion les grains de poudres puissent ou non piéger des molécules de gaz, etc. La France dispose de plusieurs centres de recherche ou de production avec des tours d'atomisation, par exemple le laboratoire d'études et de recherche sur les matériaux à Montbéliard ou l'Onera en région parisienne. D'autres moyens de production sont en projet ou en développement par exemple dans l'est de la France ou dans la région de Bordeaux. Du point de vue des fournisseurs de poudres, l'offre adaptée à fabrication additive est encore embryonnaire.

Cependant compte tenu du faible nombre d'acteurs nationaux, la fabrication additive à partir de poudres de métaux pourrait entraîner la captation de ce marché par des importations. Selon la Fédération forge fonderie, il serait nécessaire, pour les fondeurs français, d'acquérir la technologie de fabrication des poudres, en raison de l'impact de la fabrication additive sur leurs activités traditionnelles.

La grande majorité de ces poudres est importée et le marché est partagé entre ERASTEEL (France), Hogänäs (Suède), LPW (Royaume-Uni), Tekna (Canada) et quelques autres producteurs. Le marché des poudres métalliques utilisables pour la fabrication additive de pièces métalliques est en croissance. Les fabricants de métaux en poudres fournissent la matière première. Ces

¹³⁴ L'analyse des différents matériaux existants est également disponible en annexe.

¹³⁵ A3DM Magazine « Les matériaux – Chiffres, descriptif et standardisation » <http://www.a3dm-magazine.fr/les-materiaux-chiffres-descriptif-et-standardisation/>

poudres métalliques existent depuis plus de quarante ans, mais il a fallu les adapter, en modifiant la taille des grains. Il y a peu d'acteurs français en amont de la filière, ERASTEEL (filiale d'ERAMET) est probablement le seul, selon Adeline Riou, responsable des ventes et du marketing des poudres métallurgiques de ce groupe. La branche Alliages du Groupe ERAMET, constituée par les deux sociétés Aubert & Duval et ERASTEEL dispose de la plus grande capacité mondiale de poudres atomisées au gaz (tous métaux, sauf le titane), pour les différentes technologies de fabrication additive, par laser (LBM), faisceau d'électron (EBM) ou par projection de poudres (LMD). Le procédé de fabrication d'ERASTEEL est particulièrement adapté aux poudres de superalliages base nickel de grande pureté. Elle dispose de trois sites de production de poudres métalliques, localisés en France, en Espagne et en Suède et de six unités de production de poudres. Le seul site à fournir des produits adaptés à la fabrication additive est situé à Irùn, dans le Pays basque espagnol, où les alliages sont élaborés sous vide puis atomisées à l'argon (sous forme de poudres). Les poudres d'aciers sont élaborées en Suède, les poudres de superalliages Ni ou Co le sont en France et en Espagne, et les poudres d'alliages de Ti le sont en France. Les poudres fines d'alliages de Ti pour la fabrication additive sont en cours de développement en France. En 2015, il y a eu une croissance plus forte avec un passage progressif des clients de la R & D à la production de série, ce qui amène ce fabricant de poudres à augmenter ses capacités de production. Pour ERASTEEL, le mouvement est bien lancé, et il était indispensable de proposer aux clients de la branche alliages d'ERAMET une gamme complète de métaux d'alliages, y compris en poudres. Les clients sont divers : l'aéronautique, l'énergie, le médical, l'outillage.

Un marché des matériaux encore immature

Pour les transformateurs qui démarrent dans la fabrication additive, le marché des matières reste opaque. Les prix vont du simple au double, voire au triple lorsque les poudres sont vendues par le fournisseur de la machine. Ces transformateurs sont consultés par tous les secteurs, de l'aéronautique à la bijouterie, mais reçoivent encore peu de commandes fermes. On note sur un exemple que le segment de la fabrication additive ne représente aujourd'hui que 5 % du chiffre d'affaires de l'un de ces transformateurs utilisant aussi les procédés conventionnels.

Les fabricants d'imprimantes 3D cherchent un relais de croissance en intégrant en amont une ou plusieurs sources de matériaux. Par exemple, le fabricant suédois Arcam a acheté pour 35 millions de dollars canadiens, début 2014, la société canadienne AP&C spécialisée en production de poudres métalliques, notamment de titane. Cette intégration en amont était vue par l'entreprise suédoise comme un levier de très forte croissance pour commercialiser les matériaux utilisés dans leurs machines. Certains fabricants de machines tentent d'imposer leurs matériaux en menaçant de ne pas donner de garantie sur leurs imprimantes 3D si des matériaux autres que ceux fournis par eux-mêmes sont utilisés sur leurs machines. Cependant, la majorité des grands industriels préfèrent avoir le choix de leur filière d'approvisionnement en prenant ou en maîtrisant ainsi le risque d'adaptation des poudres.

Le développement de solutions logicielles

Une expertise française et un *leader* mondial sur le segment des solutions logicielles

Que ce soit au niveau de la conception, de la simulation ou de préparation de la fabrication, les solutions logicielles destinées à faciliter l'utilisation de la fabrication additive foisonnent sur le plan international et sont souvent développées par de petits éditeurs. Deux *leaders* du domaine se démarquent sur le segment de l'impression 3D avec des stratégies pourtant bien différentes. En effet, si l'Américain Autodesk et le Français Dassault Systèmes affichent tous deux une volonté de développer des solutions complètes et intégrées pour valider virtuellement les processus de fabrication additive (conception, simulation, optimisation...), l'éditeur américain investit massivement dans les machines et les procédés de fabrication à l'image de la

technologie CLIP¹³⁶ ou de l'imprimante 3D Ember. Par ailleurs, il convient de souligner que l'absence de normalisation des formats de fichiers ou encore de méthodes pour réaliser l'hachurage¹³⁷ provoque un flou relatif dans le domaine du logiciel. Cependant, Dassault Systèmes est bien positionné pour défendre les intérêts nationaux puisqu'il participe au consortium 3MF piloté par Microsoft et qui vise à remplacer le format STL¹³⁸ par un nouveau format capable de retranscrire de manière précise et complète un plus grand nombre d'informations entre un logiciel de CAO et une machine de fabrication additive¹³⁹. Parmi d'autres initiatives d'intérêt, sans vocation à être exhaustif, on peut également citer la PME Sokaris Ingénierie ou le centre DINCCS de MICADO qui développent de nouvelles méthodologies d'optimisation à travers des modules logiciels innovants.

Focus sur la localisation des fabricants de machines, fournisseurs de matériaux et éditeurs de logiciels :

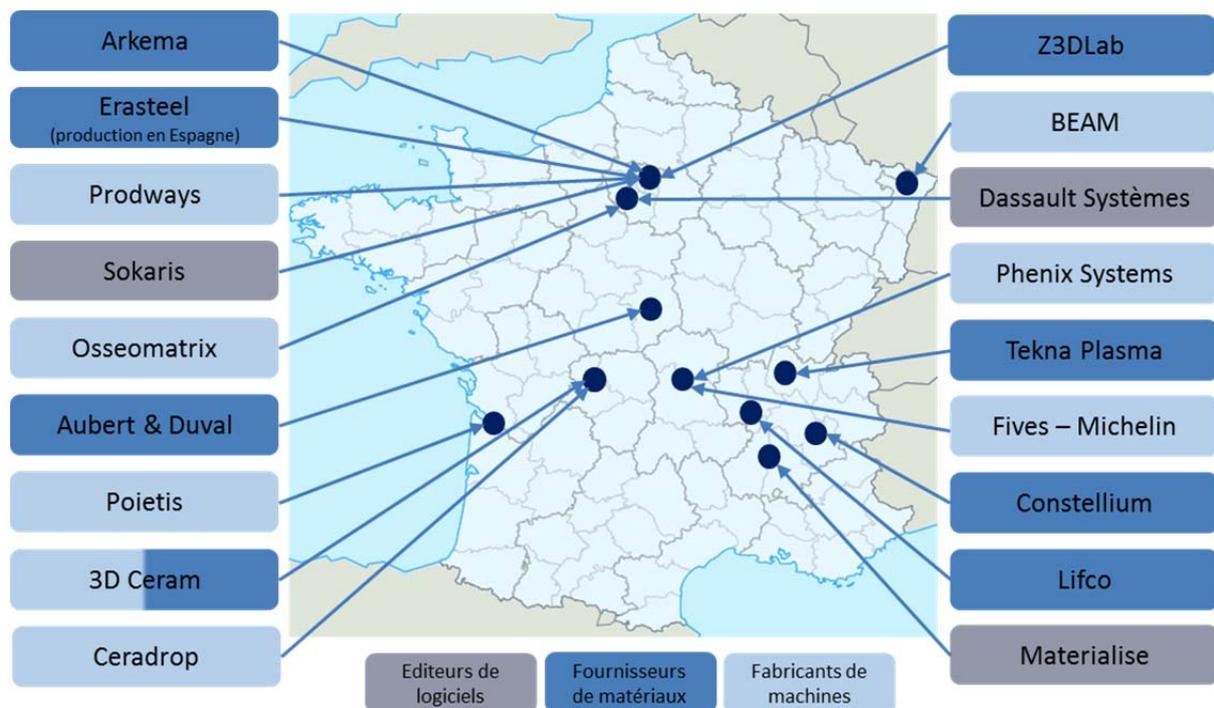


Figure 25: Fabricants de machines, fournisseurs de matériaux et éditeurs de logiciels à vocation industrielle¹⁴⁰

L'écosystème de la recherche

Une recherche française de haut niveau mais qui reste éclatée

Située au sixième rang mondial en 2012¹⁴¹, la recherche scientifique française est reconnue internationalement et dispose de sérieux atouts à tous les niveaux de la chaîne de valeur. Cela représente une véritable opportunité dans la mesure où les verrous technologiques qui restent à lever vont dynamiser les efforts de R & D, aussi bien au niveau de la simulation, des procédés, des post-traitements ou encore des matériaux. Cependant, la recherche française reste éclatée

¹³⁶ Autodesk Backs Carbon3D With \$10 Million From Spark Investment Fund, Communiqué de presse, Autodesk.com, Avril 2015

¹³⁷ Méthode consistant à hachurer la pièce en différentes strates, compatibles avec le procédé additif.

¹³⁸ Format utilisé dans les logiciels de stéréolithographie, développé par la société 3D Systems.

¹³⁹ Un consortium et un nouveau format pour améliorer l'impression 3D, Les numériques.com, Avril 2015

¹⁴⁰ Source : Tech2Market

¹⁴¹ Le positionnement de la France dans le monde par ses publications scientifiques, http://publication.enseignementsup-recherche.gouv.fr/eesr/8/EESR8_R_47-le_positionnement_de_la_france_dans_le_monde_par_ses_publications_scientifiques.php

et ne possède que très peu d'acteurs de taille critique, une faiblesse qui pourrait justifier le peu de représentants nationaux au sein de projets collaboratifs européens. En effet, les laboratoires disposent généralement de petites équipes avec une vision sur un ou plusieurs maillons de la chaîne de valeur, ce qui peut limiter l'attractivité et la capacité d'investissement de ces structures. Faciliter l'accès aux financements européens grâce à un guichet unique pourrait permettre d'augmenter le nombre de dossiers déposés et augmenter la visibilité de l'offre française à l'international. Développer un procédé multitechnologie et multiscience au sein d'un laboratoire n'est pas chose aisée et nécessite de travailler sur tous les aspects, c'est ce constat qui a en partie motivé la création du Cirtes¹⁴² en 1991. Certains acteurs interrogés ont pu souligner le fait qu'il n'existe pas aujourd'hui de pôle d'excellence pour la recherche en fabrication additive plastique et qu'il est souvent plus facile de se tourner vers l'Allemagne ou l'Angleterre qui disposent d'une recherche plus concentrée. Afin de répondre au besoin exprimé par les personnes consultées pour simplifier l'identification des bonnes compétences, une cartographie des centres de recherche travaillant sur la fabrication additive est présentée ci-dessous.

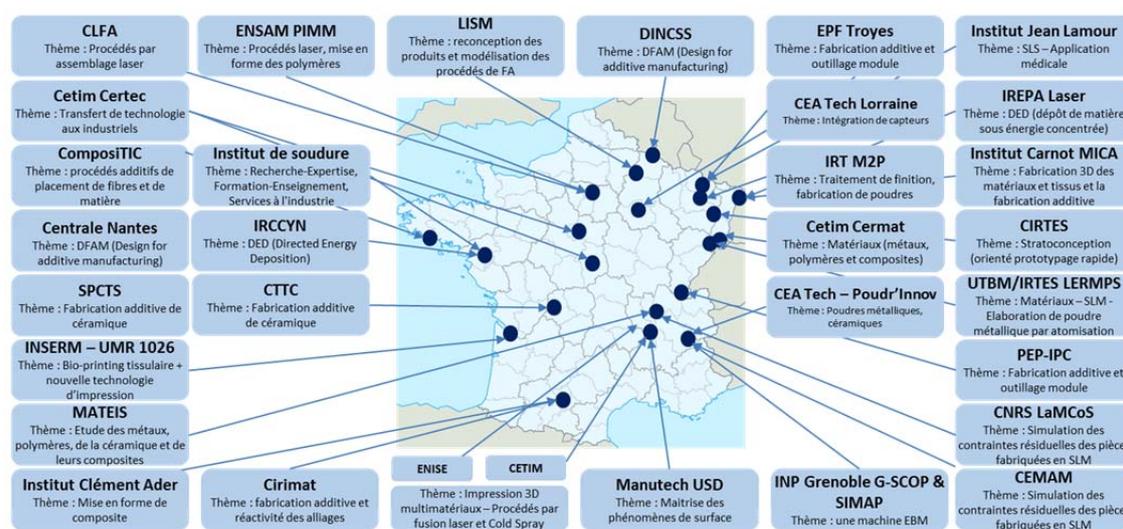


Figure 26: Répartition géographique des principaux centres de recherche actifs sur le sujet de la fabrication additive en France

La structuration des instituts Carnot au sein de la filière « Manufacturing » en 2016 va dans le sens d'un regroupement et de la création d'un ensemble de moyens et de compétences, même si la fabrication additive ne constitue qu'un des six piliers de la filière. Elle bénéficie d'un budget de 12,5 millions d'euros sur six ans apportés par l'Agence nationale de la recherche au titre des investissements d'avenir, réparti au sein de 11 instituts Carnot et de 40 plateformes technologiques¹⁴³. C'est aussi un exemple qui illustre bien le retard de la France en termes de structuration puisque la création de l'alliance Fraunhofer pour la fabrication additive date de 1999.

¹⁴² Cirtes SA est une société labellisée Structure de Recherche Contractuelle (SRC). Cirtes est à l'origine et au cœur du pôle VirtuReal, le Pôle du Développement Rapide de Produit, à Saint-Dié-des-Vosges, en France, en région Grand Est.

¹⁴³ http://www.instituts-carnot.eu/sites/default/files/images/F_Manufacturing.pdf

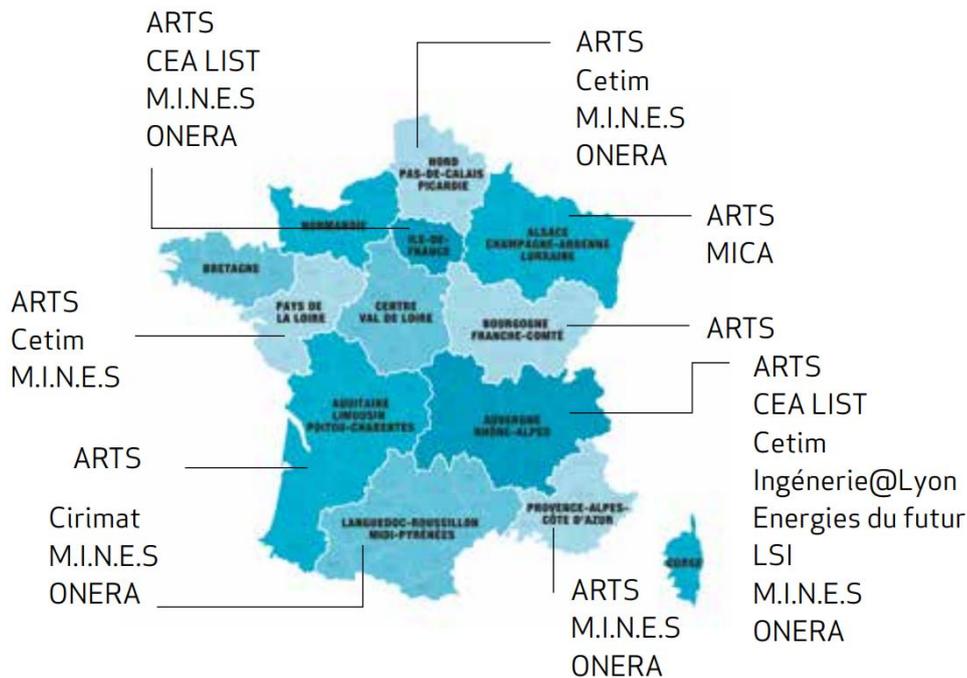


Figure 27: Cartographie des Instituts Carnot impliqués dans la filière Manufacturing

Une cartographie des acteurs de la fabrication additive en France a été réalisée par le cabinet CMI pour le compte du Cetim¹⁴⁴. Cette étude évalue l'implication des différents acteurs clés du territoire, avec la mise en avant de plusieurs chiffres clés :

- 32 M€ de budget annuel estimé en R & D pour la fabrication additive (dont 9,6 M€ provenant de partenariats industriels directs) ;
- 33 M€ de matériel dédié à la R & D en fabrication additive ;
- Près de 250 emplois temps plein (ETP) sur le territoire ;
- 350 publications scientifiques et technologiques ;
- 45 brevets déposés (dont 20 au Cirtes).

Une structuration déséquilibrée entre donneurs d'ordres et sous-traitants

De grands donneurs d'ordres sur les secteurs utilisateurs et un écosystème numérique dynamique

La France possède de grands donneurs d'ordres sur les secteurs utilisateurs de la fabrication additive (Vinci et Bouygues dans le bâtiment, Renault, PSA, Valeo, Faurecia, Michelin dans l'automobile, Thales Alenia Space, Airbus et Safran dans l'aéronautique et spatial). Ils jouent également un rôle fort dans le développement de l'offre française, notamment *via* leurs bureaux d'études. Cependant, il a été souligné lors des entretiens un manque de mutualisation des essais et des bases de données ayant pour effet de freiner le développement de la filière. On peut souligner la présence de nombreuses petites structures d'accompagnement, agences de conseil ou de design spécialisées dans l'impression 3D, démontrant une nouvelle fois que tous les niveaux de la chaîne de valeur sont présents sur le territoire. Afin de rapprocher toutes ces compétences, simplifier l'identification de partenaires et lancer des collaborations qui impliqueraient toute la chaîne de valeur, on observe des initiatives régionales à l'image de la communauté Rhône Alpes Fabrication Additive Métallique ; ou la mission menée en continu par

¹⁴⁴ Étude Carnot FIMP – Cartographie des compétences de la fabrication additive en France, Cetim/CMI, 2016.

l'Association Française de Prototypage Rapide depuis des années en tant que structure associative.

Une consolidation de la sous-traitance accompagne la croissance des donneurs d'ordres.

La filière française de la sous-traitance en fabrication additive est composée de plusieurs typologies d'acteurs aux offres souvent complémentaires : prototypistes de métier, sous-traitants historiques qui voient à travers la fabrication additive une opportunité pour diversifier ou compléter leurs procédés de fabrication traditionnels sur des pièces spécifiques ou encore des nouveaux entrants qui font de la production de série par fabrication additive leur cœur de métier. Cependant, alors que les donneurs d'ordres sont de plus en plus cohérents dans leurs demandes et utilisent de plus en plus de pièces fabriquées de façon additive, les sous-traitants admettent ne pas ressentir une augmentation significative du nombre de commandes. Cela peut s'expliquer par le fait que l'écosystème français se compose de nombreux très petits acteurs, une absence de taille critique qui les empêche bien souvent d'accompagner la croissance de leurs clients en termes de fabrication additive. Les donneurs d'ordres se tournent ainsi plus facilement vers des acteurs étrangers.

Il est important de noter que la conséquence directe de cette faiblesse est la perte de parts de marché au profit d'acteurs belges ou allemands qui récupèrent une partie de l'activité. En effet, le tissu industriel semble trop horizontal et éparpillé pour répondre à une demande de plus en plus forte et contrer les stratégies verticales d'acteurs étrangers qui ouvrent des usines équipées de centaines de machines. Enfin, la diversification des principaux fabricants de machines sur le segment de la production de pièces à l'image de QuickParts (3D Systems) ou de Redeye (Stratasys) entraîne une concurrence supplémentaire.

La sous-traitance en fabrication additive est aujourd'hui une activité très capitalistique avec des outils de production très difficiles à rentabiliser, ce qui justifie le faible nombre moyen de machines par acteur. Par ailleurs, le design, la gestion des matériaux ou les post-traitements sont des opérations très importantes qui nécessitent des compétences et des moyens spécifiques qu'il faut parfois aller chercher à l'extérieur. Cependant, le gain de temps de fabrication ou d'approvisionnement d'une pièce ou d'un outillage grâce la fabrication ne doit pas être perdu par des étapes de sous-traitances multiples et les donneurs d'ordres et utilisateurs attendent que la chaîne de la fabrication additive soit complète.

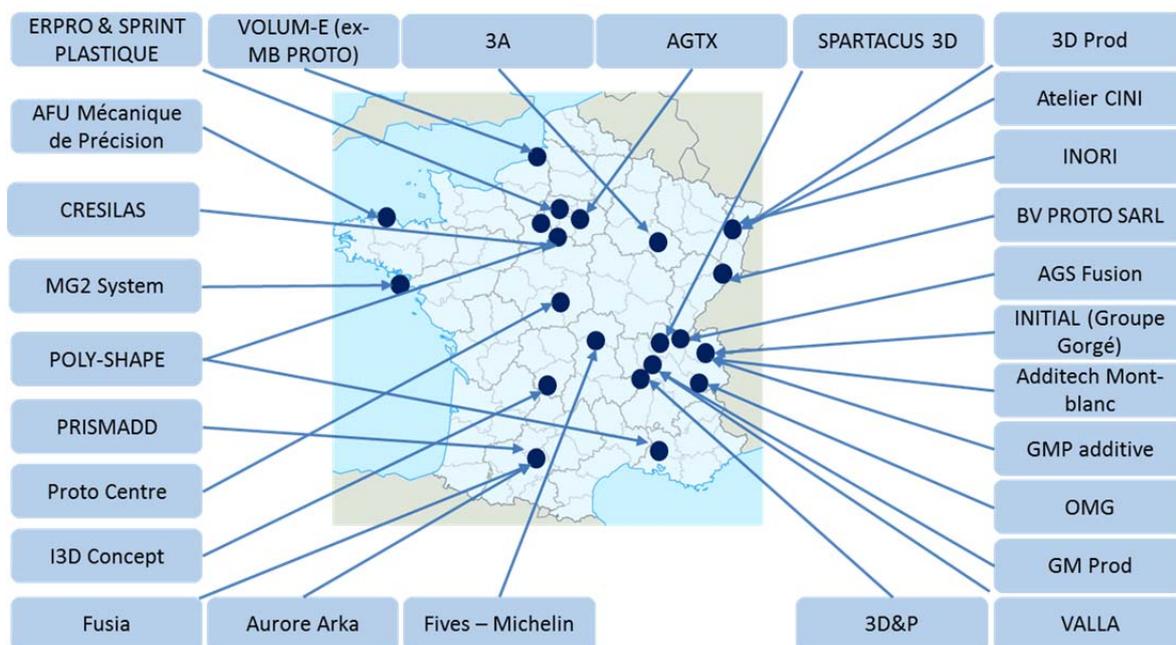


Figure 28 : Paysage français de la sous-traitance en fabrication additive¹⁴⁵

S'il est certain que de nombreuses structures risquent de disparaître dans les années à venir, on observe aujourd'hui une consolidation du tissu industriel en place qui cherche à enrichir son offre de services et à grossir en taille. Il manque en effet aujourd'hui un réseau d'ETI capables de suivre la croissance du marché, tant au niveau des investissements que des compétences multiples nécessaires à la réalisation de pièces.

En conclusion, si le tissu industriel s'étoffe en consolidant son offre *via* des partenariats ou des investissements pour couvrir l'ensemble des compétences (design, matériaux, postprocess), le manque de taille critique des acteurs en place constitue une véritable faiblesse qui place le territoire en difficulté et offre des opportunités à des sociétés étrangères capables de mieux répondre aux demandes des donneurs d'ordres.

¹⁴⁵ Source : Tech2Market

UNE DYNAMIQUE INTERNATIONALE

Bien que la France dispose d'atouts certains pour le développement de sa filière de la fabrication additive, notre pays reste en retrait sur le plan international. Dans cette partie, nous proposons une analyse de la dynamique internationale autour des technologies de la fabrication additive comportant trois niveaux : une étude de la normalisation internationale, une analyse des brevets internationaux, ainsi qu'une réflexion sur la dynamique internationale et le positionnement de la France au sein de cette dynamique.

Feuille de route de la normalisation internationale

Reconnue par l'ensemble de la filière comme vecteur de diffusion de l'innovation pour une utilisation en production, la normalisation favorise l'interopérabilité des équipements et renforce le niveau de confiance des utilisateurs et des clients vis-à-vis des produits et des technologies associés à la fabrication additive. Les enjeux pour les différents acteurs de la filière consistent non seulement à faciliter les échanges entre les parties prenantes d'un projet mais aussi à intégrer leurs innovations dans les normes internationales en participant à leur développement. En France, la première initiative en ce sens apparaît en 2005 avec la création de la Commission Fabrication directe au sein de l'Association française de prototypage rapide (AFPR). L'objectif était de réunir les principaux acteurs de la filière et les sensibiliser à la normalisation en fabrication additive. En septembre 2009, le Cetim et l'École nationale d'ingénieurs de Saint-Étienne (Énise) organisent conjointement avec les pôles Viameca, EMC2 et l'AFPR des universités européennes d'été sur la normalisation qui vont permettre de faire émerger une communauté française autour la normalisation pour la fabrication additive. Ils demandent officiellement à l'Union de normalisation de la mécanique la création d'un Comité dédié à la fabrication additive. Créée en Juin 2010, la Commission UNM 920 « Fabrication additive » regroupe aujourd'hui une cinquantaine d'experts (fournisseurs de poudres, fabricants de machines, sous-traitants, utilisateurs, institutionnels) qui participent à l'élaboration de normes françaises et contribuent aux travaux du Comité technique international ISO/TC 261. En cherchant à définir un langage et un format d'échange commun et à garantir le niveau de qualité dans la chaîne de production, l'UNM 920 favorise la diffusion des produits et de la technologie tout en veillant à ne pas laisser l'exclusivité de la normalisation dans le domaine aux concurrents.



Figure 29 : Analyse du système normatif français dans l'écosystème européen et international

Si trois normes purement nationales ont été rédigées par l'UN920 depuis 2011, cette Commission constitue l'interface privilégiée avec la normalisation européenne (Comité européen de normalisation, CEN) et internationale (Organisation internationale de normalisation, ISO). Les trois normes publiées visent notamment à améliorer la compréhension mutuelle des différents acteurs de la filière avec un premier ensemble de termes communs (NF E 67-001), des

indications sur les informations à fournir par le producteur de poudres (XP E 67-010) ou encore des conditions de réception de pièces réalisées par fabrication additive (XP E 67-030)¹⁴⁶.

Nom	Description	Publiée le
NF E 67-001	Fabrication additive - Vocabulaire	01/10/2011
XP E 67-010	Fabrication additive - Poudres - Spécifications techniques	19/12/2014
XP E 67-030	Fabrication additive - Pièces réalisées par fabrication additive - Cahier des charges et conditions de réception	15/05/2013

Tableau 6 : Normes nationales publiées par l'UNM 920

Prenant peu à peu conscience des enjeux de la fabrication additive, la Commission européenne a décidé de s'impliquer davantage en finançant un programme de recherche collaborative de 18 mois baptisé Sasam (*Standardization in Additive Manufacturing*) et qui s'est déroulé du 1^{er} septembre 2012 au 1^{er} mars 2014. Ces travaux, qui ont mobilisé notamment l'Union de normalisation, le Cetim, l'Énise ou encore le pôle de compétitivité ViaMeca, ont permis de poser les bases d'une normalisation européenne et d'identifier les leviers d'actions prioritaires dans plusieurs catégories (répétabilité du procédé et qualité du produit, matériaux et productivité) à l'horizon 2022¹⁴⁷. Le projet Sasam a également contribué à la création en janvier 2015 du Comité technique européen CEN/TC 438, une Commission approuvée par 22 pays et dont la présidence et le secrétariat ont été attribués à la France. L'objectif du CEN/TC 438 est triple : reprendre les normes ISO en normes européennes pour éviter la multiplication des référentiels, orienter les programmes de recherche européens, promouvoir l'innovation et coordonner toutes les actions de normalisation en Europe¹⁴⁸.

Dès 2014, le projet Sasam a mis l'accent sur le besoin de mettre en place des priorités sur les travaux de normalisation à venir.

Suite aux recommandations et aux priorisations recueillies auprès d'une centaine d'acteurs de la filière, les efforts de normalisation européenne devraient se concentrer à court terme sur le post-traitement, le contrôle du processus, les matériaux tels que les alliages titane, aluminium, les Inconel 635 & 718, les PA 12 et 11 ou encore sur les tests en fatigue. De façon surprenante, le consortium a jugé la maturité de la fabrication additive céramique trop faible pour lancer une quelconque action de normalisation.

Par ailleurs, l'UNM représente la France à l'ISO/TC 261 « Fabrication additive », une commission internationale créée en 2011 à l'initiative de l'Allemagne et composée de vingt autres pays participants (Allemagne, Belgique, Canada, Chine, Danemark, Espagne, États-Unis, Finlande, Irlande, Italie, Japon, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Corée du Sud, Royaume-Uni, Russie, Singapour, Suède et Suisse) et de cinq pays observateurs (Afrique du Sud, Israël, Nouvelle-Zélande, Roumanie, République tchèque). Le Comité ISO/TC 261 propose quatre groupes de travail qui élaborent les normes internationales sur les axes suivants :

- ISO/TC 261/ WG 1 Terminologie : animation par la Suède
- ISO/TC 261/ WG 2 Méthodes, processus et matériaux : animation par l'Allemagne
- ISO/TC 261/ WG 3 Méthodes d'essai : animation par la France
- ISO/TC 261/ WG 4 Traitement des données : animation par le Royaume-Uni.

¹⁴⁶ AFNOR Fabrication additive UNM/920 Normes Publiées <http://norminfo.afnor.org/structure/2860>.

¹⁴⁷ Sasam : Roadmap for standardisation activities June 2015 <http://www.sasam.eu/index.php>

¹⁴⁸ Brève : Fabrication additive – Création d'un comité technique européen, http://www.unm.fr/main/core.php?pag_id=982

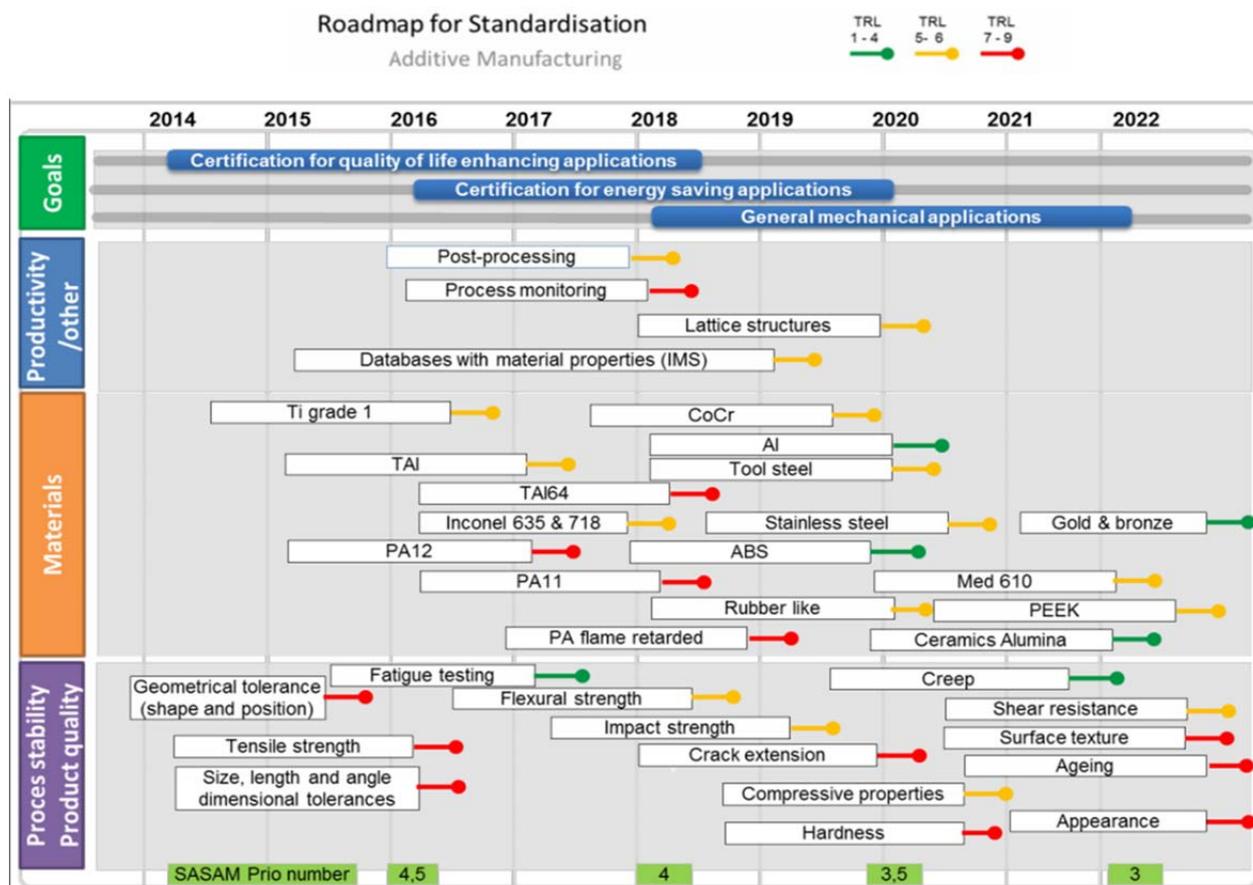


Figure 30 : Plan d'actions pour une normalisation européenne de la fabrication additive (Sasam Standardisation Roadmap - Frits Feenstra TNO)

En animant le groupe de travail en charge des méthodes d'essai, la France fait partie des principales forces de proposition avec les Américains et les Allemands et est très bien positionnée pour défendre les différentes avancées technologiques dans le domaine de la fabrication additive.¹⁴⁹

Nom	Description	État
ISO 17296-1	Principes généraux - Partie 1 : Terminologie	Annulée
ISO 17296-2	Principes généraux - Partie 2 : Vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières	Publiée le 15/01/2015
ISO 17296-3	Principes généraux - Partie 3 : Principales caractéristiques et méthodes d'essai correspondantes	Publiée le 01/09/2014
ISO 17296-4	Principes généraux - Vue d'ensemble des échanges de données	Publiée le 01/09/2014

Tableau 7 : Projets de normes de la commission internationale ISO/TC 261 « Fabrication additive »

À ce jour, le Comité ISO/TC 261 a travaillé sur quatre projets de normes portant sur les axes de réflexion pris en charge par les différents groupes de travail. En consultant le site de l'ISO, on peut cependant observer que le projet de norme ISO 17296-1 sur la Terminologie a été annulé du fait de l'harmonisation avec l'organisme américain ASTM (Société américaine pour les essais et les matériaux). À noter également que les trois autres normes ont été transposées pour le

¹⁴⁹ Fabrication additive : Du prototypage rapide à l'impression 3D, C. Barlier, A. Bernard, Dunod 2015, p.365.

marché français en 2015 sous la forme NF ISO 17296 et que leur transcription pour la filière européenne est à l'étude.

Parallèlement, un accord de coopération a été signé entre l'ISO et l'ASTM afin de renforcer leur coopération dans l'élaboration des normes internationales et ainsi éviter les redondances de documents. Fondée en 2009 soit deux années plus tôt que l'ISO/TC 261, la commission ASTM F 42 avait déjà commencé à élaborer des normes indépendantes, ce qui a conduit les deux commissions à se mettre d'accord sur les principes directeurs à suivre, une feuille de route commune et une structure organisationnelle pour les standards en fabrication additive. Cette structure propose une hiérarchisation des normes selon trois niveaux : normes générales (concepts généraux et exigences communes), normes intermédiaires et normes spécifiques. Dans cette dynamique, des groupes de travail conjoints auxquels participent depuis peu les représentants du CEN TC/438 ont été créés sur les thèmes suivants, jugés prioritaires :

- Harmonisation de la terminologie et pièces types normalisées ;
- Définition des lignes directrices de conception et des exigences pour l'achat d'une pièce ;
- Spécifications pour les matériaux plastiques pour l'extrusion et les pièces métalliques réalisées par fusion sur lit de poudres ;
- Contrôle non destructif pour les pièces en fabrication additive.

Les normes déjà publiées par l'ASTM indépendamment de la commission ISO sont les suivantes :

- F2971 : Procédure d'échange de données sur les éprouvettes de tests ;
- F3122 : Procédure d'évaluation des propriétés mécaniques des pièces métalliques ;
- F2924 : Norme spécifique à l'alliage Ti 6Al-V pour la fusion sur lit de poudres ;
- F3001 : Norme spécifique à l'alliage Ti 6Al-V à faible teneur en éléments interstitiels pour la fusion sur lit de poudres ;
- F3049 : Procédure de caractérisation de poudres métalliques utilisées ;
- F3055 : Norme spécifique à l'alliage de nickel UNS N07718 pour la fusion sur lit de poudres ;
- F3056 : Norme spécifique à l'alliage de nickel UNS N06625 pour la fusion sur lit de poudres ;
- F3091 : Spécifications pour la fusion sur lit de poudres de matériaux plastiques.

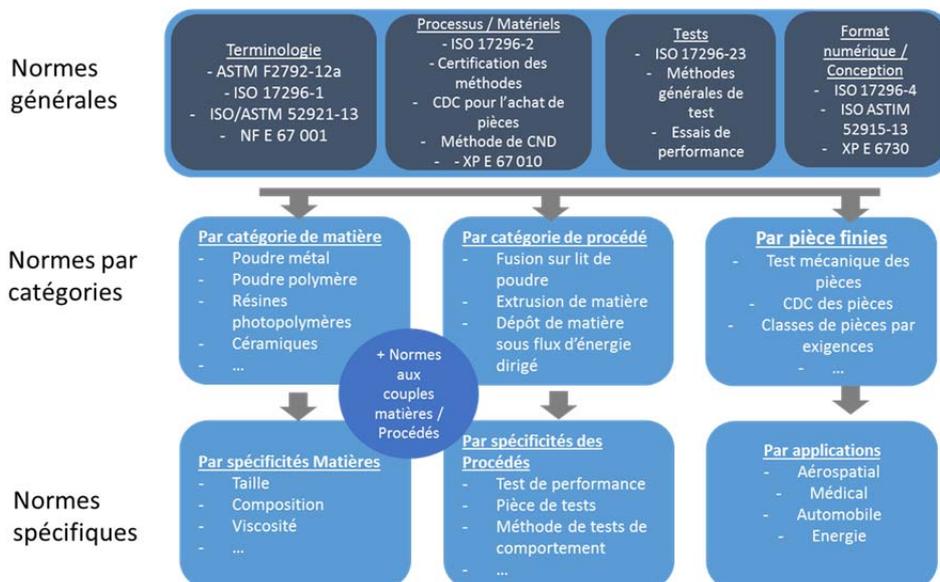


Figure 31 : Organisation de la normalisation définie par l'accord ASTM ISO

Enfin, l'ISO a déjà publié sous double logo trois normes américaines ASTM dont deux qui ont été reprises en normes françaises en 2013. Les différents échanges menés au sein des groupes de

travail dans le cadre de l'accord de coopération devraient faire émerger de nombreux autres projets de normes communes.

Nom	Description	État
ISO/ASTM 52900	Principes généraux -- Terminologie	Publiée le 15/12/2015
ISO/ASTM 52915	Spécification normalisée pour le format de fichier pour la fabrication additive (AMF) Version 1.2	Publiée le 15/02/2016
ISO/ASTM 52921	Terminologie normalisée pour la fabrication additive -- Systèmes de coordonnées et méthodes d'essai	Publiée le 01/06/2013
ISO/ASTM 52901	Principes généraux - Exigences pour l'achat de pièces	En projet
ISO/ASTM 52902	Principes généraux - Artefacts d'essais	En projet
ISO/ASTM 52910	Guide de conception en fabrication additive	En projet
ISO/ASTM 52903-1	Spécification normalisée pour la fabrication additive de matériaux plastiques à base d'extrusion -- Partie 1 : Matières premières	En projet
ISO/ASTM 52903-2	Spécification normalisée pour la fabrication additive de matériaux plastiques à base d'extrusion -- Partie 2 : Procédés et équipements	En projet

Tableau 8 : Projets et normes publiées dans le cadre de la collaboration ASTM/ISO

Analyse internationale des brevets

Analyse statistique des brevets en fabrication additive à travers le monde

Face à la croissance d'une nouvelle technologique comme celle de la fabrication additive, il est possible de mesurer et d'analyser la dynamique d'innovation à travers l'étude des dépôts de brevets. En effet, les brevets sont un bon indicateur de l'intensité et de la typologie des innovations affectant un domaine particulier. Cette méthode n'est cependant pas exhaustive puisque l'innovation peut être protégée par d'autres méthodes, et notamment par des questions de confidentialité. L'approche statistique par les brevets ne représente ainsi qu'un axe d'analyse du sujet. Par ailleurs, il y a actuellement dans le monde plus de 3 000 brevets accordés et en vigueur qui concernent la fabrication additive, ce qui rend délicate l'identification des brevets étrangers les plus importants et/ou contraignants pour les nouveaux entrants.

Les différentes familles de brevets associées aux technologies de la fabrication additive ont ainsi été étudiées, sur le modèle de l'étude « 3D Printing – A Patent Overview » de novembre 2013, éditée par Intellectual Property Office. Il a ainsi été possible d'étudier les différents contextes inhérents aux différents pays, ainsi que d'analyser le positionnement de la France et de ses acteurs dans l'écosystème mondial de la fabrication additive, et notamment par rapport aux principaux autres pays déposants dans ce domaine.

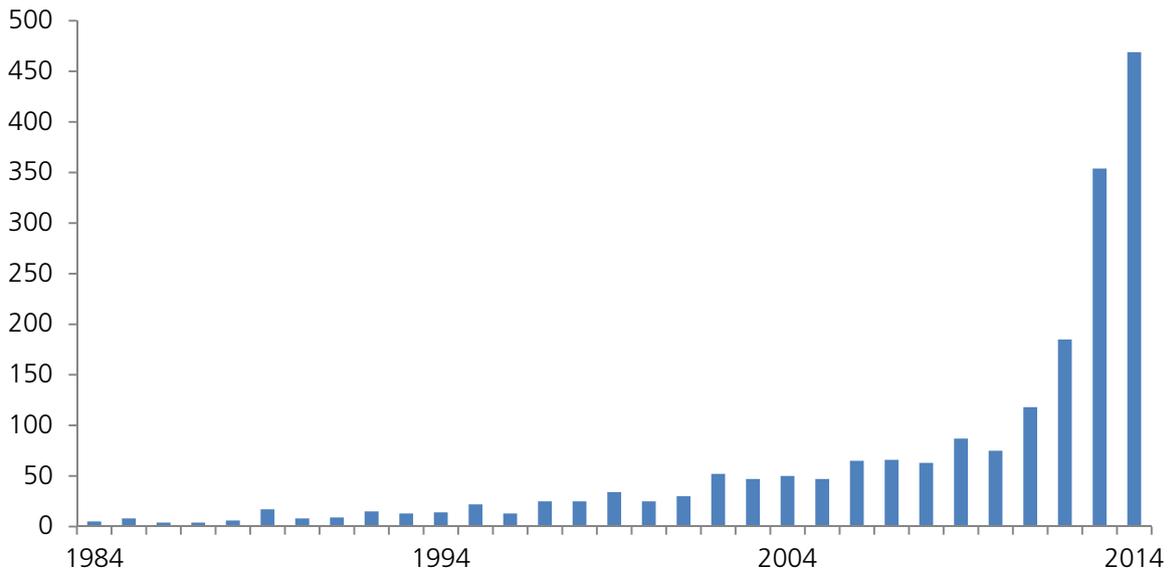


Figure 32 : Évolution par année du nombre de brevets déposés en fabrication additive (cumul de tous les pays)

Le premier brevet historique reconnu sur la fabrication additive date de 1984. Avant cela, d'autres brevets avaient été déposés et étaient précurseurs de la technologie, mais ne correspondaient pas totalement à la définition stricte de la fabrication additive. Entre 1984 et 2010, on observe une croissance lente du nombre de dépôts de brevets dans le monde sur le sujet, en comparaison du nombre de dépôts de brevets tout domaine confondu.

Depuis 2010, les dépôts de brevets dans le monde sur la fabrication additive se sont accélérés. La part du nombre de brevets déposés en priorité en France est marginale. La fabrication additive est donc une technologie qui se développe fortement depuis seulement cinq ans, soit plus de vingt ans après le dépôt du premier brevet, et après que celui-ci soit tombé dans le domaine public.

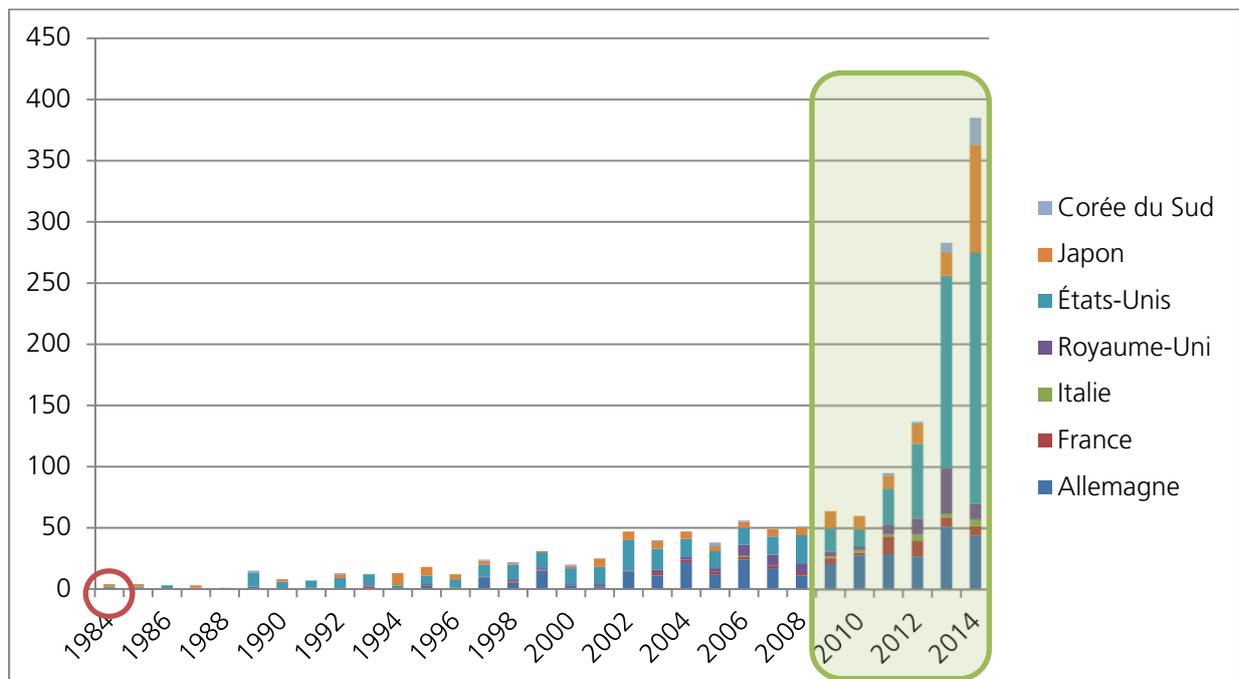


Figure 33 : Évolution par année du nombre de brevets déposés en fabrication additive dans les principaux pays

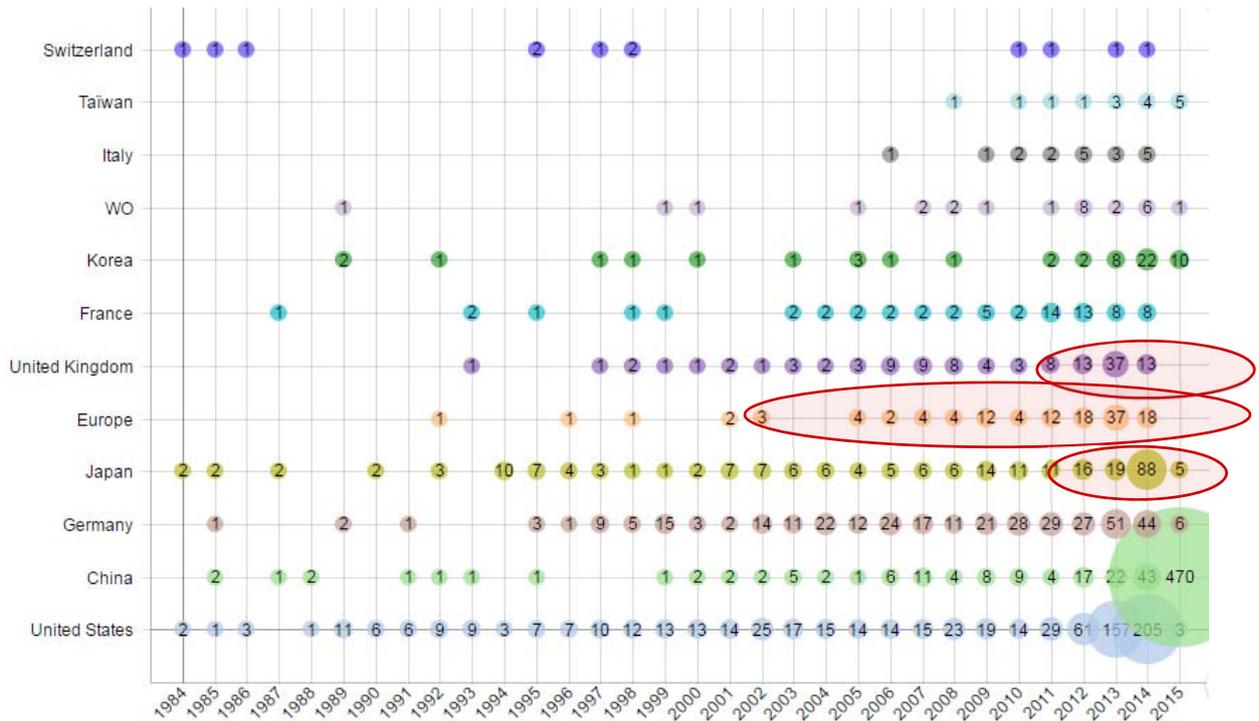


Figure 34 : Évolution temporelle des brevets selon le pays d'origine

Les pays d'origine des brevets sont un bon indicateur de l'origine de l'innovation. En effet, les acteurs de la technologie auront plutôt tendance à protéger leur innovation en priorité dans le pays où elle a été développée. La dynamique chinoise est particulièrement remarquable, puisqu'elle passe de 43 familles de brevets déposées en 2014 à 470 en 2015. Cependant, la propriété intellectuelle chinoise ne semble pas être une menace de premier ordre mais plutôt une faiblesse (les brevets chinois sont en effet rarement étendus à l'étranger). La Chine devient alors le deuxième pays le plus actif dans la fabrication additive avec 633 familles de brevets cumulées, derrière les États-Unis, qui comptent 745 familles de brevets. La totalité des brevets demandés en 2015 ne sont cependant pas encore tous disponibles, les brevets n'étant publiés qu'environ 18 mois après la demande effectuée.

Les États-Unis, le Japon et l'Allemagne sont des pays présents historiquement dans la fabrication additive. En effet, le nombre de familles de brevets déposées en priorité dans ces trois pays est très important ; ces pays sont ainsi actifs dans le domaine de la fabrication additive depuis longtemps. La France et l'Angleterre sont également actives sur ce domaine technologique, et s'illustrent par un réel effort de recherche depuis la fin des années 1990. Deux nouveaux pays – l'Italie et Taïwan – peuvent être considérés comme des suiveurs de la technologie, puisqu'ils brevettent peu en comparaison et seulement depuis 2005.

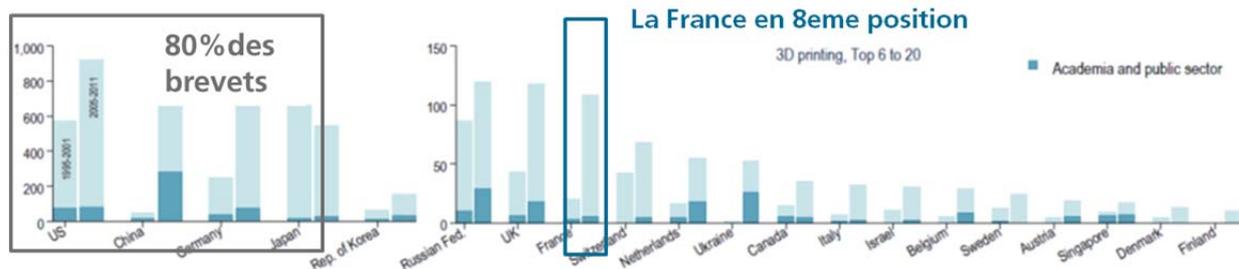


Figure 35 : La France en 8^e position en termes de dépôts de brevets

Sur la période 2005-2011, en nombre de premiers dépôts de brevets, la France se situe en 8^e position après les États-Unis, la Chine, l'Allemagne, le Japon, la Corée du Sud, la Russie et le Royaume-Uni. Une analyse qui se confirme tant au niveau de l'industrie que de la recherche.

Entreprise	Pays d'origine de l'entreprise	Nombre de familles de brevets
3D Systems	US	200
Stratasys	US	200
Siemens	Allemagne	145
General Electric	US	131
Mitsubishi Heavy Industries Ltd	Japon	120
Hitachi	Japon	117
MTU Aero Engines	Allemagne	104
Toshiba	Japon	103
EOS	Allemagne	102
United Technologies	US	101

Université	Pays	Nombre de familles de brevets
Fraunhofer	Allemagne	89
Chinese Academy of Sciences	Chine	79
Huazhong University of Science & Technology	Chine	46
MIT	Etats-Unis	37
Xi'an Jiaotong University	Chine	34
University of Southern California	Chine	31
South China University of Technology	Chine	27
Harbin Institute of Technology	Chine	24
TNO	Pays Bas	24
Beijing University of Technology	Chine	17

Tableau 9 : Principaux déposants industriels et universitaires de brevets sur la fabrication additive depuis 1995¹⁵⁰

L'OMPI a classé les entreprises possédant le plus de familles de brevets dans la fabrication additive dans le monde. Les deux premières entreprises de ce classement sont des entreprises américaines et spécialisées dans la fabrication de machines d'impression 3D (3D Systems et Stratasys). On retrouve également des entreprises spécialisées dans l'électronique dans ce classement, avec Siemens, Hitachi, Toshiba et United Technologies. Ces éléments corroborent ainsi bien notre analyse des pays les plus actifs en matière de dépôt de brevets sur le sujet de la fabrication additive.

¹⁵⁰ Source : OMPI, basé sur les données de Patstat.

Acteurs français et place de la France comme terrain de jeu en fabrication additive

Cette approche, à la fois nationale et territoriale, vise à montrer d'une part l'intérêt des acteurs français pour la fabrication additive et, d'autre part l'intérêt du territoire national pour les acteurs en fabrication additive.

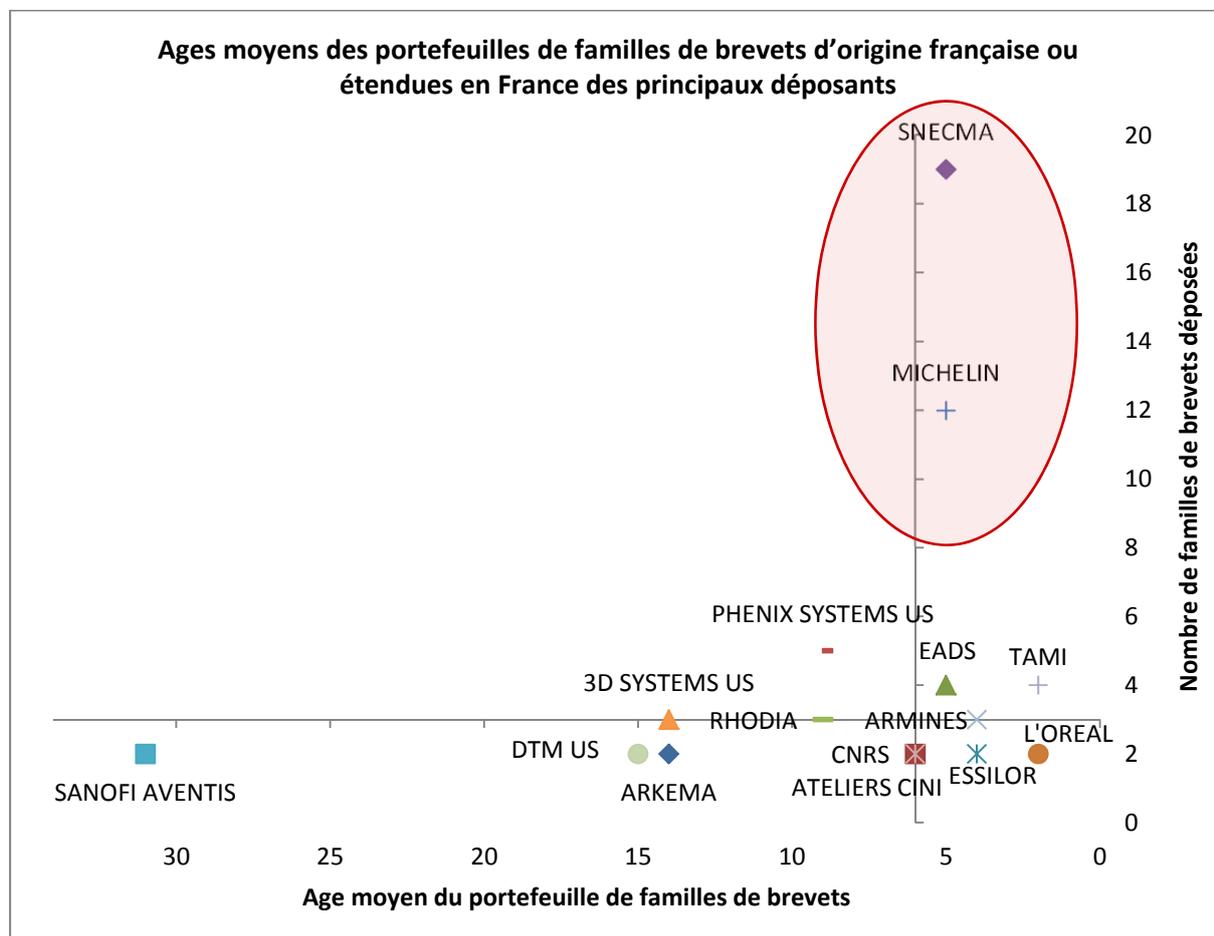


Figure 36 : Âge moyen des portefeuilles de familles de brevets d'origine française ou étendues en France des principaux déposants

Snecma et Michelin sont deux acteurs émergents dans la fabrication additive et sont à présent les acteurs français ayant les plus grands portefeuilles de familles de brevets dans cette technologie. Phénix Systèmes, racheté par 3D Systems, a également un portefeuille important en comparaison des autres acteurs mais son portefeuille de brevets n'est pas particulièrement récent. L'Oréal et Technologies Avancées Membranes Industrielles (TAMI) sont deux acteurs qui ont déposé dans la fabrication additive il y a seulement deux ans, et sont donc à surveiller. Le groupe EADS dépose en France par la voie européenne (procédure communautaire EP). Sa stratégie ne vise donc *a priori* pas spécifiquement la France. Sanofi-Aventis est un acteur historique mais son portefeuille comprend seulement deux brevets.

Analyse des domaines technologiques en France

Après avoir analysé le contexte concurrentiel de la fabrication additive en France, nous avons essayé de comprendre les domaines technologiques des entreprises présentes en France. Ainsi,

la suite de notre réflexion s'appuie principalement sur une cartographie¹⁵¹ des technologies des acteurs français travaillant sur la fabrication additive.

Pour construire cette cartographie, nous avons représenté les acteurs qui déposent ou étendent leurs brevets en France, et les avons mis en relation avec les codes de la Classification internationale des brevets (CIB) utilisés dans leurs brevets. Basée sur le traitement de notre corpus d'environ 2 500 familles de brevets, cette cartographie se limite aux familles de brevets étendues ou déposées en France. Seuls les acteurs possédant au moins deux familles de brevets ont été représentés, afin d'améliorer la lisibilité.

Enfin, les codes CIB correspondent tous à des types de technologies déterminés par l'Organisation mondiale de la protection industrielle (OMPI). Ces codes permettent de comprendre rapidement l'objet et la technologie d'un brevet.

La Classification internationale des brevets est mise à jour régulièrement. Cependant, elle n'a intégré la fabrication additive qu'en janvier 2015 sous le code B33 ou B33Y. Ainsi, l'ensemble des brevets dont la demande a été faite précédemment utilisent d'autres codes de la classification. Des brevets plus récents peuvent également ne pas utiliser cette classe, notamment par manque de connaissance sur les mises à jour. De plus, les brevets n'étant publiés que dix-huit mois environ après leur demande, la quasi-totalité de notre corpus n'a pu utiliser la classe B33Y.

À travers cette cartographie, qui figure en annexe, nous avons donc cherché à identifier les domaines technologiques sur lesquels travaillent les acteurs qui déposent ou étendent leurs brevets en France. Par exemple, parmi les 19 familles de brevets déposées ou étendues en France par Safran, deux concernent une technologie à arc électrique et deux autres pour le soudage par faisceau d'électron. En revanche, un brevet peut comporter plusieurs codes CIB (pas de restriction en nombre), ce qui explique la présence sur ce graphique de plus de points que de familles de brevets. Les acteurs et les codes CIB sont différenciés par leurs couleurs : en vert, on retrouve les acteurs de la fabrication additive, et en violet les codes CIB qu'ils ont utilisés pour décrire leurs brevets.

Finalement, cette cartographie nous a permis de détecter à la fois des signaux forts, pour la plupart déjà connus, mais également des signaux faibles, notamment les particularités technologiques de chacun de ces acteurs.

Signaux forts

En France, on observe six domaines industriels majeurs d'application de la fabrication additive :

- aéronautique,
- caoutchouc,
- céramiques,
- chimie,
- cosmétique,
- optique.

Chacune de ces applications est portée par un acteur particulier (Safran avec sa filiale Snecma pour l'aéronautique, Michelin pour le caoutchouc, Technologies Avancées Membranes Industrielles pour les céramiques, Rhodia – filiale du groupe Solvay - en chimie, L'Oréal pour les cosmétiques et Essilor en optique).

Ces six applications industrielles se recoupent principalement autour de trois technologies utilisées en fabrication additive : le rayon laser, le travail des poudres et le revêtement de surfaces. Cependant, on note que plusieurs acteurs utilisent des technologies qui leur sont propres (soudage à l'arc pour Safran par exemple). Dans une analyse plus détaillée, en annexe, on pourra alors comprendre les particularités des acteurs des six applications identifiées précédemment.

De plus, cette représentation confirme l'émergence de deux groupes industriels français présents sur le marché international, l'un pour le marché de la motorisation aéronautique et la

¹⁵¹ Disponible en annexe

production de pièces (Safran dont fait partie Snecma), l'autre sur celui de la fabrication d'éléments de moules pour pneumatiques par le biais de la fabrication de machines de fabrication additive (Michelin).

Par ailleurs la présence d'acteurs de l'industrie chimique (Rhodia, Arkema) est liée vraisemblablement à la production de polymères destinés à la fabrication additive.

Signaux faibles

Cette cartographie¹⁵² met en avant deux applications industrielles majeures de la fabrication additive en France : l'optique et les cosmétiques. L'Oréal et Essilor sont ainsi actifs dans la fabrication additive. Cependant, ils ont peu de liens avec les trois technologies centrales. On peut donc s'attendre à ce qu'ils posent des brevets sur les produits de la fabrication additive, et non sur les procédés.

Plusieurs pistes peuvent être évoquées sur l'émergence dans les cosmétiques : le remplacement des tests sur les animaux par des tests sur des cellules de peau bio-imprimées, ou bien la fabrication de cosmétiques (produits, emballages). De même dans le domaine de l'optique, l'apparition d'Essilor pourrait s'expliquer par la recherche de procédés de fabrication additive pour des verres correcteurs ou des lentilles ophtalmiques, et éventuellement la fabrication de montures de lunettes à verres intégrés.

Enfin, l'un des derniers signaux faibles remarquables est l'émergence d'une PME française qui se positionne depuis deux ans seulement sur la fabrication de filtres céramiques à hautes performances sur un marché mondial (Technologies Avancées Membranes Industrielles).

Évolution dans le temps : une piste pour la prospective

Les familles de brevets de la cartographie précédente n'ont pas toutes été publiées au même moment. Il est donc important de compléter cette analyse des technologies en les comparant dans le temps. Ainsi, on peut analyser l'évolution de ces technologies et distinguer les technologies récentes des technologies plus anciennes, et moins utilisées aujourd'hui. Nous avons donc représenté l'évolution des codes CIB nous paraissant les plus pertinents depuis 1993. Cette analyse est basée sur une sélection de codes de la classification internationale, indexant le corpus des brevets pertinents et représentatifs des principales technologies de fabrication additive (modes d'apport de la matière ou de l'énergie, catégorie de matériaux mis en œuvre, typologie de procédés). Sur le graphique 5 ci-dessous, nous remarquons alors que le soudage à l'arc n'a pas été l'objet de demandes de brevets en France depuis 2007. À l'inverse, le soudage par faisceau d'électrons est l'objet de brevets en fabrication additive en France depuis 2007. En revanche, le travail par rayon laser est une technologie dont les dépôts de familles de brevets ont accéléré depuis 2011. En combinant ce constat avec la cartographie, il semblerait que Safran, qui avait misé sur le soudage à l'arc au début des années 2000 a choisi quelques années plus tard de se tourner vers le soudage par faisceau d'électrons, et de diminuer, voire d'abandonner, la R & D dans le soudage à l'arc.

Une autre technologie semble émerger depuis peu : le frittage dans la fabrication de couches de composites à partir de poudres métalliques. En France, cette technologie a été brevetée principalement autour d'une collaboration entre l'INP Lorraine (Institut national polytechnique), les Ateliers CINI¹⁵³, le CNRS et l'université de Nancy, visible sur la cartographie précédente.

Deux groupes de technologies sont apparus comme très émergents et ont alors été séparés dans le graphique 7. Ces technologies apparaissent en 2010. Il s'agit des brevets de Technologies Avancées Membranes Industrielles et de L'Oréal, dont plusieurs domaines technologiques leur sont propres. Technologies Avancées Membranes Industrielles utiliserait des procédés physiques ou chimiques de séparation dans la fabrication additive, notamment pour des membranes semi-perméables. L'application en serait la filtration à haute performance.

¹⁵² Une analyse fine de cette cartographie est commentée en annexe.

¹⁵³ Société privée/bureau d'études spécialisé dans le prototypage rapide, l'usinage et le montage de contrôle pour les technologies de fabrication additive.

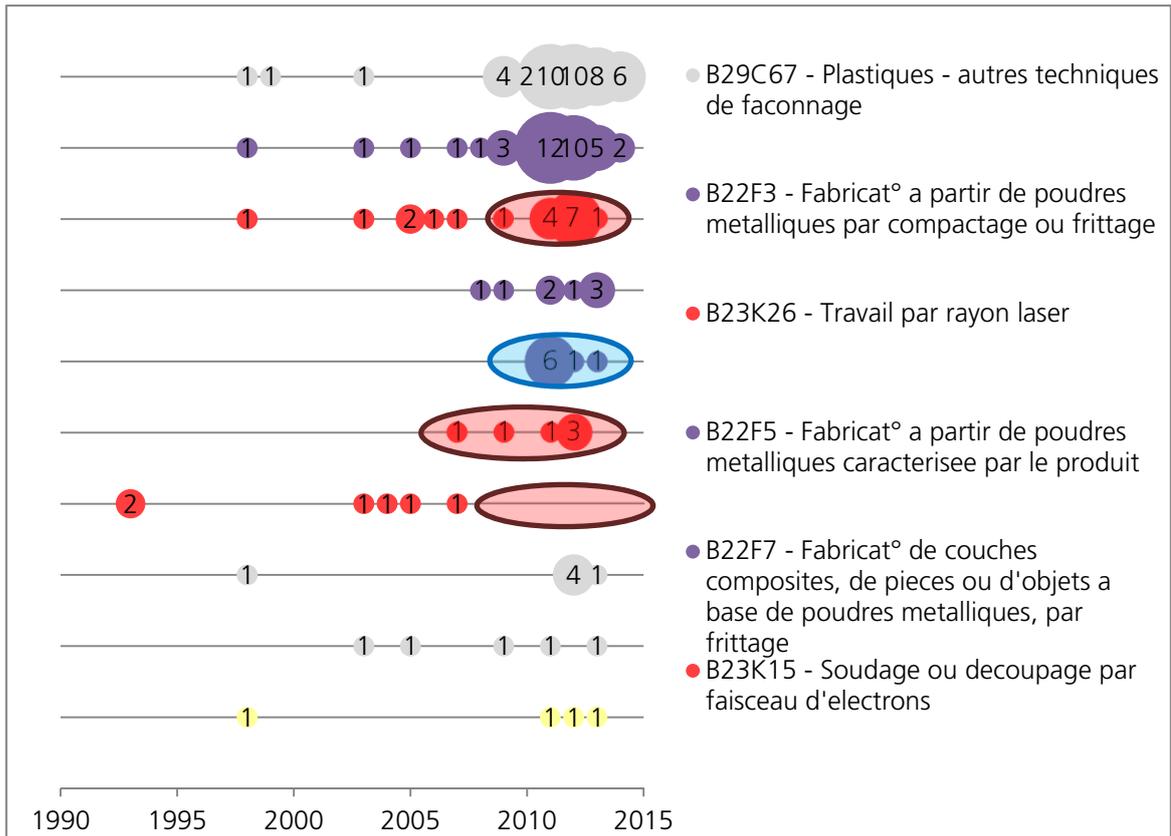


Figure 37 : Codes CIB en France (pays d'origine ou d'extension) de 1993 à 2014 - Les technologies principales

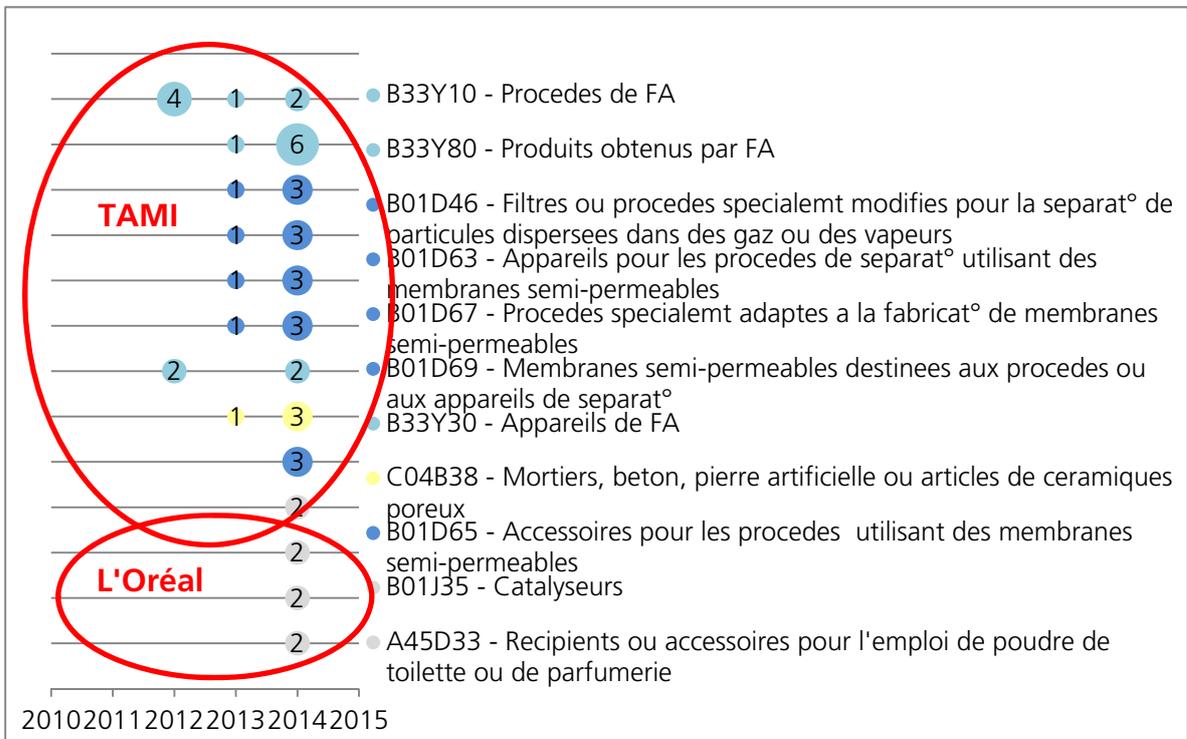


Figure 38 : Codes CIB en France de 2010 à 2015 - les technologies très émergentes

A45D	Articles pour la coiffure ou le rasage ; soins des mains ou autres traitements cosmétiques
A61K	Préparations à usage médical, dentaire ou pour la toilette
A61Q	Utilisation spécifique de cosmétiques ou de préparations similaires pour la toilette
B01D	Procédés ou appareils physiques ou chimiques – séparation
B01J	Procédés chimiques ou physiques, chimie des colloïdes; appareillage approprié
B22F	Travail des poudres métalliques
B23K	Brasage ; soudage; découpage par chauffage localisé; travail par rayon laser...
B28B	Façonnage de l'argile ou d'autres compositions céramiques...
B29C	Façonnage ou assemblage des matières plastiques...
B33Y	Fabrication additive (classification de 2015)
C04B	Chaux ; magnésie ; scories; ciments; leurs compositions; pierre artificielle; céramiques ; réfractaires; traitement de la pierre naturelle
F01D	« Machines » ou machines motrices à déplacement non positif

Tableau 10 : Titres des classes de brevets et codes couleur des figures

À travers ces derniers graphiques, nous pouvons finalement différencier les nouvelles technologies de fabrication additive (soudage par faisceau d'électrons, rayon laser...) des technologies affiliées à des acteurs en particulier (soudage à l'arc par exemple) mais non innovante.

Conclusion de l'analyse des brevets

Le brevet historique en fabrication additive date de 1984 : or, des acteurs français travaillent sur la fabrication additive depuis la fin des années 1980. La France peut ainsi être considérée comme un des pays présents historiquement sur cette technologie, tout comme le Royaume-Uni, les États-Unis, l'Allemagne ou le Japon. Cette ancienneté lui permet d'accumuler une base de connaissances et donc de continuer à innover dans cette technologie. Cependant, le nombre de familles de brevets en France est très faible en comparaison des autres pays historiquement actifs sur ces technologies. La technologie est surtout développée aux États-Unis, en Allemagne et au Japon. En effet, avec respectivement 45 et 74 brevets déposés sur le sujet depuis 2010, la France et l'Angleterre apparaissent actuellement plutôt comme des pays suiveurs dans l'innovation (les pays *leaders* tels que l'Allemagne ou le Japon en ont respectivement 195 et 150), même si la France n'a pas une politique d'encouragement à la protection industrielle aussi forte que les trois pays *leaders* de l'innovation.

La France se dote également d'une diversité d'acteurs dans ce domaine. Ainsi, des acteurs des secteurs des cosmétiques côtoient des acteurs de l'aéronautique, de l'optique... Ces acteurs ne sont pas des entreprises spécialisées dans la fabrication additive, mais des industriels envisageant d'intégrer cette technologie à leur système de production ou de se réserver une possibilité d'action dans ce domaine.

Deux grands acteurs français se démarquent particulièrement aujourd'hui : Michelin et Safran. Leurs portefeuilles de familles de brevets sont beaucoup plus importants que les autres acteurs identifiés, et leurs implications dans le domaine datent de cinq ans environ. Ils semblent s'intéresser actuellement à une technologie d'apport d'énergie : le soudage par faisceau d'électrons. D'autres acteurs, plus petits, sont actifs dans d'autres domaines d'application de la fabrication additive depuis plus récemment, à l'exemple de Technologies Avancées Membranes Industrielles qui a commencé à breveter ses innovations en 2012 et semble vouloir percer dans le domaine de la céramique.

Néanmoins, les acteurs français doivent faire face à des acteurs de pays émergents, notamment originaires de Taïwan ou de Chine, dont l'activité est de plus en plus dynamique. Le nombre de brevets dans le domaine en Chine en 2015 a explosé, ce qui présage une arrivée massive d'acteurs chinois dans ce secteur. La France se doit donc d'accompagner les acteurs français dans ses politiques pour permettre à ses industriels de ne pas être en perte de vitesse et de rester concurrentiels dans un environnement évoluant de plus en plus vite.

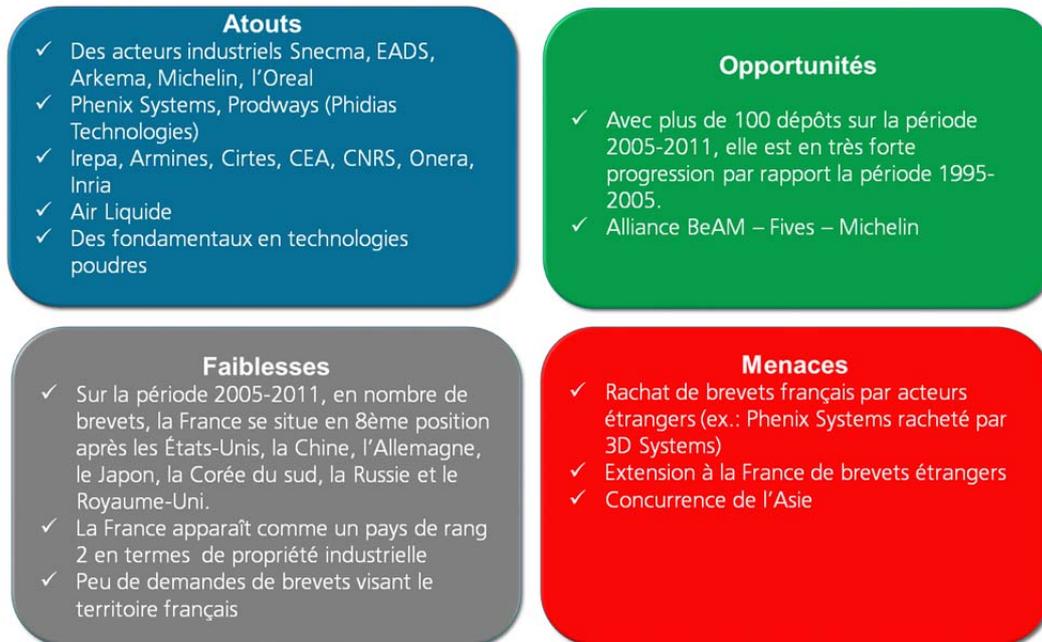


Figure 39 : Analyse SWOT sur le plan des brevets

Principaux écosystèmes internationaux de la fabrication additive

La fabrication additive à travers le monde

Au cours des dernières années, de nombreux pays ont multiplié les projets et initiatives d'intérêt pour favoriser le développement de pôles d'excellence associés à la fabrication additive. La course mondiale est ainsi véritablement lancée, avec une volonté forte de favoriser l'intégration industrielle de ces nouvelles technologies. Le discours de Barack Obama sur l'État de l'Union en 2013 a représenté en cela un signal fort, lançant officiellement la stratégie de la première économie mondiale au travers de son guichet unique, « America makes ». Nombreux sont ainsi les pays qui investissent massivement dans ce domaine, avec un large panel d'initiatives qui émergent au sein des principaux pays de la recherche et des nouvelles technologies.

Les États-Unis s'illustrent ainsi au travers de plusieurs projets d'envergure, à l'image d'un centre situé dans l'Ohio doté de 89 M\$ de financement pour la recherche et la formation autour des technologies de la fabrication numérique, ou d'un investissement supplémentaire de 70 M\$ auprès du département de la Défense pour créer un *Digital Lab for Manufacturing* basé à Chicago. À ce titre, 250 M\$ supplémentaires seront apportés par l'industrie, la recherche académique, le gouvernement.

De son côté, le Japon cherche à devenir *leader* du secteur du *bioprinting*, avec une volonté d'investissement de 18,5 M€¹⁵⁴ sur le sujet entre 2015 et 2020. Ces crédits seront partagés entre cinq instituts de recherche avec une attention particulière mise sur l'impression 3D de cellules souches pluripotentes, capable de se multiplier à l'infini pour donner naissance à différents types de cellules.

À Singapour, le pays vise également une place de *leadership* dans le domaine de l'impression 3D. L'université NTU (*Nanyang Technological University*) a investi 30 M\$ pour l'ouverture d'un centre de fabrication additive¹⁵⁵. Lancé en mai 2014, ce programme s'inscrit dans le cadre du développement économique de Singapour. Le centre, équipé de technologies variées et destiné à la recherche et aux étudiants, a annoncé dès son ouverture un contrat de collaboration de 5 M\$ avec le fabricant allemand d'impression 3D SLM Solutions. Une autre initiative, portée par la société Underwriters Laboratories, vise à l'ouverture d'un centre d'excellence en impression 3D. Le projet, soutenu par le *Singapore Economic Development Board* pour un investissement total de 8 M\$, s'inscrit dans la lignée de la volonté de la ville-État pour devenir le principal *hub* de la fabrication additive en Asie. Le gouvernement affiche ainsi une volonté forte de se positionner en tant que *leader* sur cette thématique. En mars 2013, a notamment été annoncée la volonté d'investir 500 M\$ dans les technologies de fabrication additive.

La Chine développe par ailleurs un centre d'innovation dédié à l'impression 3D basé à Chengdu via un investissement d'environ 100 M\$. Ce projet, soutenu par la 3DP Alliance et par le gouvernement local de la province de Shuangliu, implique notamment les universités *United Huazhong University of Science and Technology*, *Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, et *Tsinghua University*. Par ailleurs, un centre d'innovation pour les technologies d'impression 3D¹⁵⁶ est sur le point d'ouvrir dans la municipalité de Chongqing. Ce centre est destiné à accompagner le développement des produits et des technologies pour l'industrie, de l'aviation à la santé en passant par l'automobile. Le *China's National Engineering Research Centre of Rapid Manufacturing* sera chargé d'opérer ce centre (en activité depuis janvier 2016) qui a déjà signé 15 contrats d'investissement avec des industriels et des institutions de la robotique et des équipements intelligents.

¹⁵⁴ Le Japon veut devenir *leader* dans le secteur du *bioprinting*, 3D Natives, 17 janvier 2015.

¹⁵⁵ NTU launches \$30 million 3-D printing research center, EurekAlert!, 26 mai 2014.

¹⁵⁶ China to Open Innovation Center for 3D Printing in Chongqing, Inside3DPrinting, 3 décembre 2015

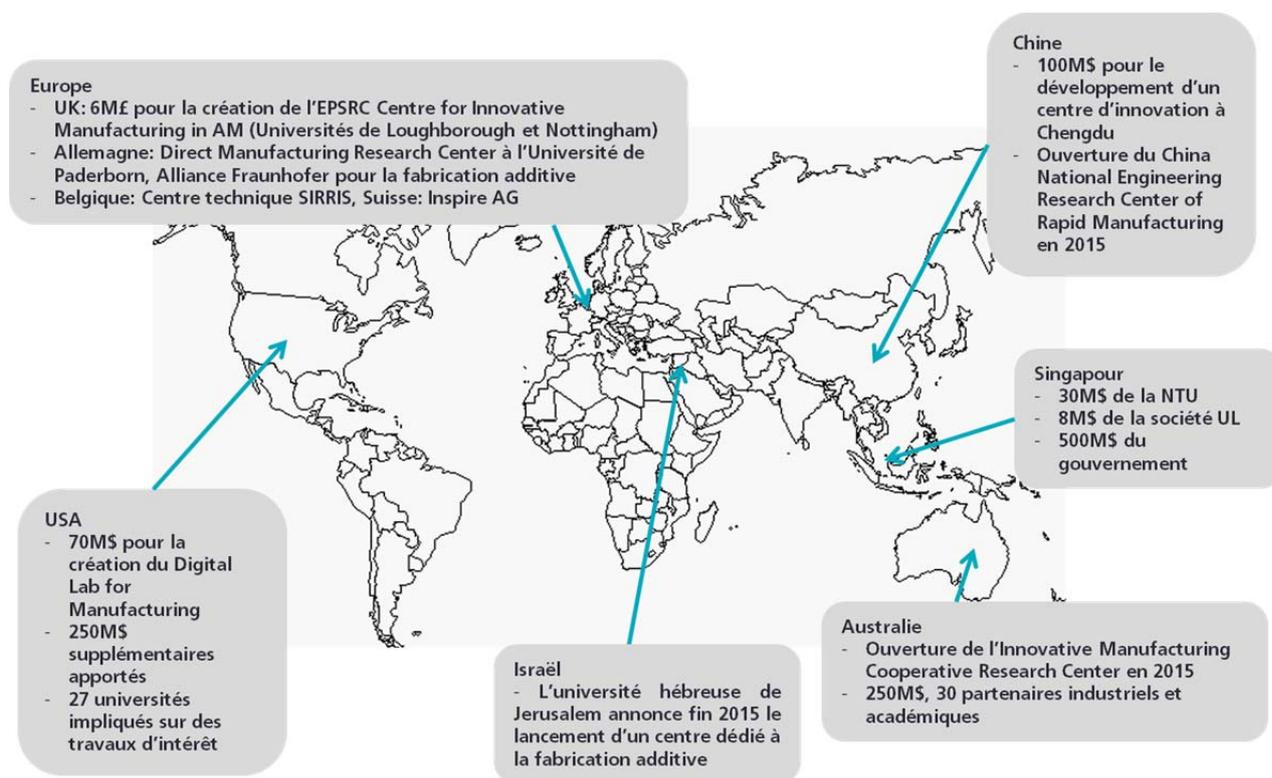


Figure 40 : Panorama des centres internationaux actifs sur la fabrication additive – Des investissements souvent concentrés sur une ou deux grosses structures nationales

L'Australie s'implique également, avec l'ouverture d'un nouveau centre de recherche¹⁵⁷ en mai 2015. Basé à Melbourne, l'IMCRC (*Innovative Manufacturing Cooperative Research Center*) a reçu un financement de 40 M\$ AU du *Commonwealth funding* ainsi que 210 M\$ AU en provenance d'industriels, d'institutions de recherche et de fonds gouvernementaux. Le projet regroupe notamment 14 sociétés manufacturières et 16 universités australiennes. De son côté, le CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*), qui est également partenaire de l'IMCRC, lance son propre laboratoire, le Lab22¹⁵⁸, pour un investissement de 6 M\$ AU. Le projet cible plus particulièrement l'adoption à l'échelle industrielle d'imprimantes 3D métalliques.

Enfin, la deuxième plus ancienne université d'Israël, *The Hebrew University of Jerusalem*, a annoncé fin 2015 le lancement d'un centre dédié à l'impression 3D¹⁵⁹, pour la recherche et le développement de nouvelles technologies. Ce nouveau centre sera partie intégrante du centre de recherche en nanosciences et nanotechnologies.

Les principales économies mondiales ont toutes pris le parti d'investissements massifs autour de projets d'envergures de recherche et développement, en lien étroit avec le monde industriel et la formation. La fabrication additive est ainsi mondialement reconnue comme ayant un potentiel d'innovation notoire et incontestable, capable de transformer aussi bien le secteur de la production industrielle que celui de la santé.

Les implications potentielles de ces nouvelles technologies justifient ainsi des investissements massifs dans cette course mondiale au développement des technologies de demain.

On constate ainsi de nombreuses initiatives dans le domaine de la fabrication additive, aussi bien pour des applications industrielles qu'en matière de *bioprinting*. Sans surprise, on retrouve les grandes nations à la tête d'initiatives de pointe (USA, Australie, Israël, Singapour, Chine). Les

¹⁵⁷ Australia's IMCRC to power ahead in manufacturing innovation, The Warren Center, 26 mai 2015.

¹⁵⁸ Australia's CSIRO Launches \$6M 3D Printing Research Facility, lab22 – Made For Me is First Partner, 3Dprint.com, 25 mai 2015.

¹⁵⁹ Hebrew University Launches Israel's First Center for 3D and Functional Printing, The Hebrew University of Jerusalem, 28 décembre 2015.

programmes s'inscrivent souvent dans des volontés institutionnelles fortes pour soutenir le développement des technologies au bénéfice de la future filière de la fabrication additive.

Structure	Activité	Localisation	Savoir-faire et projet type
Ciriac	Recherche collaborative	Canada	Nouveaux procédés, nouveaux concepts sur les composants en aérospatiale <i>Projet MANU 601 pour composants aérospatiaux</i>
Fraunhofer AM Alliance	R & D et transfert Expertise et projets collaboratifs	Allemagne	Alliance de 11 institutions allemandes pour le développement de procédés de fabrication additive <i>Outillage et pièces mécaniques complexes par fusion laser</i>
Sirris	R & D et transfert Expertise et pilotage de projet	Belgique	Stéréolithographie, frittage sélectif par laser et EBM <i>Projet TipTopLam pour pièces mécaniques complexes</i>
TNO	Recherche, expertise et conseil	Pays-Bas	Connaissances techniques et scientifiques, montage de projets <i>Projet Sasam pour la normalisation des procédés de fabrication additive</i>
DTI	Recherche, expertise et conseil	Danemark	Fabrication additive et prototypage rapide <i>Projet de fabrication rapide de composants métalliques légers</i>
Université Loughborough AMRG	Recherche, expertise et Analyse	Royaume-Uni	Fusion sélective, stéréolithographie, frittage laser, dépôt de fil <i>Prothèses médicales, pièces techniques multisecteurs</i>
INSPIRE IRPD	Recherche, expertise et ingénierie	Suisse	SLS, SLM et simulation <i>Projet Sasam pour la normalisation des procédés de fabrication additive</i>

Tableau 11 : Principaux centres étrangers de R & D impliqués en fabrication additive et premiers niveaux d'expertises

La fabrication additive en Europe

La première *Additive Manufacturing European Conference* qui a eu lieu au Parlement européen à Bruxelles en juin 2015 a permis au Cecimo, organisation de coordination européenne des constructeurs de machines-outils, d'affirmer l'importance de la fabrication additive pour l'Europe. En raison de l'économie de matière qu'elle permet (jusqu'à 90 %), de la réduction de la consommation d'énergie de 50 %, de la durabilité des produits par des conceptions plus durables (structures bioniques) et non réalisables par les procédés soustractifs, et de leur réparabilité, la fabrication additive est un enjeu stratégique. Par ailleurs, le concours de cette technologie à la relocalisation de la production est un facteur également positif.

Les principaux centres de compétences en fabrication additive en Europe sont identifiés sur la figure suivante. On recense notamment le DMRC, *Direct Manufacturing Research Center* à l'université de Paderborn en Allemagne et piloté par Boeing, l'université de Loughborough au Royaume-Uni et l'université de Louvain en Belgique, qui font figure d'exemple en la matière. En général, ces acteurs majeurs de la recherche et de la formation en Europe mettent en avant un positionnement généraliste, permettant de couvrir l'ensemble des compétences nécessaires à la maîtrise du procédé.



Figure 41 : Carte des principaux centres de compétences en Europe

On compte ainsi en Europe de nombreux centres de R & D internationalement reconnus, fréquemment associés à des universités. L'Allemagne et le Royaume-Uni semblent particulièrement actifs à ce niveau.

Le Royaume-Uni s'est en effet lancé assez tôt dans le domaine, avec près de 120 M€ investis entre 2007 et 2016, au travers de projets de recherche collaboratifs financés par des fonds publics et privés. Le pays apparaît ainsi comme un des trois *leaders* mondiaux, au côté des États-Unis et de l'Allemagne. L'écosystème semble cependant très fragmenté, avec un manque apparent concernant l'identification des opportunités et la promotion d'initiatives industrielles pour des applications économiques plus directes. Le gouvernement a par ailleurs introduit l'impression 3D dans l'enseignement primaire et secondaire.

De son côté, l'Allemagne s'est structurée autour de réseaux déjà bien établis, à l'image de la *Fraunhofer Additive Manufacturing Alliance* qui regroupe dix instituts *Fraunhofer* au sein d'une même plateforme afin d'offrir aux industriels des solutions pour favoriser l'intégration de ces nouvelles technologies.

En dehors de ces différentes stratégies nationales, la coordination européenne se structure progressivement, avec d'importants financements engagés sur le sujet, notamment au travers des programmes H2020 qui cherchent à accompagner, dans le cadre d'un axe sur les technologies de l'usine du futur, des projets à application industrielle et commerciale immédiate. Cependant, même à l'échelle européenne, le manque de coordination stratégique semble revenir sur le devant de la scène.

On constate, à travers l'Europe, moins de projets d'envergures emblématiques au rayonnement international, mais davantage de structurations locales autour de réseaux d'intérêt. Les financements sont accordés sur des projets de recherche qui émergent au sein de l'ensemble des écosystèmes existants. **Le plus faible rayonnement de l'écosystème européen n'est ainsi qu'une apparence, résultant d'un manque de consolidation des financements attribués au travers d'un guichet unique.**

Par ailleurs, l'Europe est clairement *leader* mondial sur le segment de la fabrication additive métallique. Si les États-Unis se sont positionnés sur le plastique très tôt et ont pris un peu de retard sur le métal, le gouvernement américain investit massivement sur le métal pour rattraper son retard. **Les pouvoirs publics doivent maintenir cette avance car le métal devrait devenir le principal marché d'application de la fabrication additive.**

Positionnement paradoxal français dans l'écosystème international

Il existe en France le sentiment d'un manque de stratégie et d'organisation nationale. La France a en effet pris un peu de retard dans son soutien au développement de la fabrication additive dans le cadre de sa stratégie industrielle. Le nouveau plan pour l'Industrie du futur est cependant venu affirmer cet axe de modernisation technologique comme stratégique pour nos PME et ETI industrielles, ouvrant ainsi la voie à d'importants projets collaboratifs ainsi qu'à une diffusion plus active auprès des entreprises.

La France a donc tout de même engagé des montants non négligeables dans le développement de la fabrication additive à travers de nombreuses subventions et aides à la R & D et à l'innovation¹⁶⁰. De nombreux projets FUI et ANR ont ainsi vu le jour entre les laboratoires et les entreprises, avec le soutien des collectivités et des territoires. **Le manque d'information consolidée à ce sujet ne doit pas cacher la réalité : la France investit et soutient massivement les projets de recherche et d'innovation dans le domaine de la fabrication additive.** Cependant, les investissements sont diffus à travers les territoires, et cela explique ce sentiment de désorganisation.

En effet, de manière assez contradictoire, **la force de notre territoire est aujourd'hui le reflet de ce manque de structuration initiale.** Les régions et les territoires n'ont ainsi pas attendu la publication d'une stratégie nationale pour investiguer le domaine, au même titre que les entreprises et les laboratoires. De cette manière, **les initiatives structurantes de la filière sont pilotées régionalement, et cherchent ainsi à épouser les besoins industriels locaux.** Cette démarche permet aujourd'hui aux territoires français de bénéficier de nombreux pôles, centres et initiatives d'intérêt¹⁶¹. La mise à l'échelle de ces centres ne pourra pas se faire sans l'appui et le soutien d'une stratégie nationale affirmée. Mais **toutes les bases pour construire une stratégie forte nécessitent cependant d'être consolidées.**

Il est donc bien possible de contrer cette impression de désordre partagée par la mise en place d'une stratégie affirmée. Cela devient même pressant, car ce foisonnement non coordonné, qui fait suite à l'absence de stratégie nationale et de lignes directrices, conserve de nombreux effets négatifs. Au niveau du territoire national, on note ainsi un réel besoin d'identification des compétences stratégiques, ce qui résulte en de nombreux doublons de projets de recherche. À l'international, la filière souffre d'un manque de visibilité et de reconnaissance de ses compétences développées au sein des différents territoires ayant pris le pas de ces nouvelles technologies. La régionalisation des subventions et des aides reste ainsi un facteur d'inefficience sur certains plans, même si cela permet une meilleure proximité et réactivité au niveau des projets accompagnés.

Par ailleurs, se développe également un jeu de concurrence entre régions, qui, plutôt que de chercher à faire émerger des *leaderships* nationaux et internationaux, cherchent à prendre le pas sur leurs voisines¹⁶². On note ainsi l'émergence de nombreuses initiatives sans toujours qu'il puisse y avoir de coordination ou de synergies entre elles. Il s'agit là d'un point fort d'amélioration auquel les pouvoirs publics se doivent de remédier.

Il y a également un problème de communication et de partage d'informations entre les différents organismes moteurs du développement de la filière, ce qui amène une démultiplication des études réalisées sur le sujet. En plus de ne pas pouvoir disposer d'une information centralisée, le manque de coopération entre les acteurs implique une redondance des travaux réalisés, et donc une mauvaise allocation des ressources.

¹⁶⁰ Aucune donnée financière consolidée n'existe cependant sur le sujet.

¹⁶¹ Se référer notamment à l'analyse des impacts territoriaux, et à la cartographie de l'écosystème.

¹⁶² Notamment sur le sujet de la fabrication additive métallique, traitée à la fois par le Platinium 3D (Grand Est, ex Champagne-Ardenne), par le Rafam (Auvergne-Rhône-Alpes, ex Rhône-Alpes), et par Inovsys (PACA).

Conclusion : Une offre française bien armée pour répondre à une dynamique internationale qui présente encore quelques faiblesses

- Une chaîne de valeur française en forme de sablier avec de grands donneurs d'ordres, une recherche de haut niveau et une expertise nationale dans le domaine des matériaux mais qui doit se consolider pour répondre à la croissance de la fabrication additive.
- Des compétences indéniables sont présentes dans le tissu de la sous-traitance industrielle mais l'atomisation de l'offre freine les collaborations avec les donneurs d'ordres et ouvre des opportunités aux concurrents étrangers qui viennent prendre des parts de marché sur le territoire national. On observe cependant une volonté certaine des sous-traitants de se développer en intégrant l'ensemble de la chaîne de valeur en investissant ou en s'associant avec des compétences complémentaires.
- Une absence de stratégie nationale affirmée et de réelle structuration nationale de la filière.

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> • 6^e place mondiale en termes de recherche scientifique • Tous les niveaux de la chaîne de valeur présents sur le territoire • Présence de grands donneurs d'ordres français sur les principaux segments utilisateurs • La France pilote la couche européenne de la normalisation au niveau CNE et fait partie des principaux acteurs de la commission ISO • Compétences en matériaux et notamment filière poudre 	<ul style="list-style-type: none"> • Une recherche éclatée et peu présente dans les projets européens et internationaux • Un tissu industriel de sous-traitants riche en termes de savoir-faire mais qui souffre de la faible taille critique de ses acteurs • Peu de fournisseurs de poudres métalliques ou céramiques développées spécifiquement pour la fabrication additive • Dispersion des financements (pas de gros pôles de compétences en fabrication additive)
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation de la masse critique des acteurs de la sous-traitance et de la recherche • Une tendance forte à la verticalisation des activités • La France positionnée pour défendre les différentes avancées technologiques par son rôle majeur dans la normalisation internationale • Une identification des bons pôles de compétences par rapport à un besoin précis a été exprimée par les utilisateurs • Faciliter les mises en relation et partage de connaissances 	<ul style="list-style-type: none"> • Une part importante de la demande des donneurs d'ordres en fabrication additive part à l'étranger • Peu de génération d'activités et d'emplois sur le territoire national par les acteurs étrangers qui prennent pourtant des parts de marché importantes • Un manque de coopération et de partage des connaissances qui peut bloquer le développement de la filière • Verrouillage de la filière par les constructeurs étrangers de machines • Concurrence forte avec l'Allemagne et la Belgique

Tableau 12 : Analyse SWOT de l'offre française dans un contexte international

FACTEURS DE DÉVELOPPEMENT DE LA FABRICATION ADDITIVE

Ce chapitre cherche à identifier les variables de développement des technologies de la fabrication additive, avec une analyse des capacités des entreprises françaises et de l'ensemble des acteurs de l'économie territoriale à s'approprier ces nouvelles technologies. Il s'agit ainsi d'une mise en perspective des enjeux de la confrontation de l'offre française au regard de la demande des industriels.

Les freins au développement de la filière ont été regroupés selon deux typologies : le développement et l'amélioration des outils industriels de fabrication additive, et l'intégration industrielle de ces nouvelles technologies de production.

Introduction

Une utilisation pertinente de la fabrication additive suppose de **revoir complètement les méthodologies de conception et de production : il est nécessaire d'intégrer les principes associés à ces nouvelles technologies sur l'ensemble de la chaîne de valeur** (approvisionnement et gestion de la matière, optimisation lors des phases de conception, fabrication, traitement thermique, finitions et reprises, opérations de contrôle, de qualifications ou encore homologation).

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, la fabrication additive est une évolution, et non pas une révolution, dans la mesure où les procédés associés existent depuis plusieurs décennies. Cependant, elle ne concerne aujourd'hui principalement que des applications de niche au niveau de la production série du fait de sa faible maturité. Ainsi, si la fabrication additive présente des atouts indéniables, les technologies et les systèmes associés doivent s'améliorer et d'importants verrous **restent à lever afin de généraliser l'adoption** de cette technologie.

Ce chapitre cherche à identifier les **variables de développement de l'impression 3D** au regard des évolutions possibles de la chaîne de valeur afin d'anticiper les futurs usages et d'identifier les scénarios de développement associés.

Analyse des freins et opportunités à l'adoption des technologies de la fabrication additive

Point méthodologique

Afin d'identifier les opportunités et menaces à l'adoption de la fabrication additive dans les industries et les territoires, le consortium a élaboré une grille d'analyse qui cherche à en comprendre les enjeux principaux et à dégager de premières pistes de réflexion sur les scénarios d'usages. Détaillée en annexe de ce rapport, cette grille présente une liste de critères liés aux besoins et contraintes intrinsèques des entreprises et pondérés selon le niveau d'importance accordé par les acteurs interrogés et selon la taille de l'entreprise ou de son marché d'application. **L'objectif consiste à identifier les motivations de ces acteurs ainsi que les verrous à lever en priorité de façon à faciliter le déploiement de la fabrication additive et ainsi mieux répondre aux attentes des utilisateurs.** Les critères qui présentent un impact fort ont été analysés en priorité lors de l'extraction des résultats.

Alors que certains constructeurs affichent une volonté de pouvoir, d'ici trois à cinq ans, concurrencer l'injection plastique ou la fonderie métallique en termes de volume, de coût de fabrication ou de productivité, il est important de rappeler que la fabrication additive doit être

considérée de façon complémentaire et non concurrente de ces procédés. En effet, malgré une amélioration considérable du triptyque (vitesse de fabrication – qualité – coût de production) attendue au cours des prochaines années, il semble difficile d’imaginer que la fabrication additive puisse remplacer, à court ou à moyen terme, l’injection plastique ou le MIM (Moulage Injection Métallique) sur des productions de grandes séries. Cependant, ces évolutions devraient permettre d’augmenter le seuil du nombre de pièces à partir duquel la fabrication additive peut concurrencer les autres procédés et ainsi affecter progressivement l’industrie.

Enfin, il a été soulevé, lors des entretiens, que le marché de la fabrication additive, en raison de la multiplicité de ses procédés, matériaux et applications est extrêmement difficile à appréhender dans son ensemble. De ce fait, il est délicat de dégager des conclusions générales sur les freins et les motivations à l’adoption de la fabrication additive dans la mesure où l’impact d’un critère est très différent d’un marché à l’autre, ainsi que d’une technologie à l’autre.

Principaux enjeux d’adoption de la fabrication additive

Une première extraction des grilles d’analyses récoltées tend à démontrer que les motivations qui poussent les acteurs à s’approprier la fabrication additive sont sensiblement les mêmes dans les différents secteurs industriels. En effet, on retrouve parmi les principales opportunités les critères liés :

- À la fabrication de produits complexes et personnalisés (à moindre coût) ;
- À la réduction des délais d’approvisionnement ou de réalisations de prototype ;
- À la réduction du nombre d’étapes d’assemblage ;
- Aux économies d’énergies provoquées par un allègement des pièces¹⁶³, notamment dans les secteurs associés au transport (automobile, ferroviaire et aéronautique).

La possibilité d’innover sur les matériaux a également été remontée comme une véritable motivation dans la mesure où la fabrication additive offre la possibilité de redévelopper des matériaux dans une logique de gestion des obsolescences ou de développer des matériaux architecturés ou à gradients de performance qu’il n’était pas possible de fabriquer avec les procédés conventionnels. Par ailleurs, une analyse générale et transverse de la Figure 4, qui compile les résultats remontés par une trentaine d’experts, démontre que les aspects liés à la réduction des coûts de transport et à la possibilité de délocalisation ou de relocalisation de la production semblent secondaires par rapport aux critères précédents. Ces paramètres sont en effet associés à une vision à moyen terme, et impliquent un vrai changement de modèle économique dans lequel la plupart des acteurs ne se projettent pas encore. Les principales motivations à court terme pour adopter la fabrication additive au sein des filières industrielles peuvent alors être regroupées dans les cas d’usages suivants (correspondants à chaque fois à un modèle économique bien identifié par les experts interrogés) :

- La gestion des obsolescences (pour produire des pièces dont le fournisseur ou le matériau de base n’existe plus) ;
- La fabrication rapide (pour réduire le temps d’immobilisation ou les cycles de développements) ;
- L’innovation produit (pour réaliser des économies grâce à l’allègement de la pièce, une plus grande durabilité ou une réduction des assemblages).

¹⁶³ Cependant pour l’instant atténuées par le surcoût d’énergie que nécessite le procédé d’impression 3D.

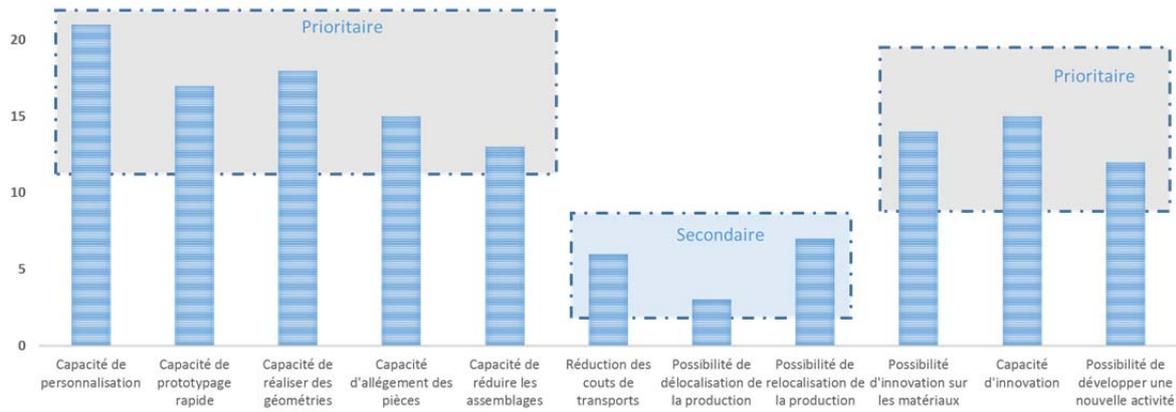


Figure 42 : Principaux enjeux d'adoption de la fabrication additive – Nombre de personnes consultées jugeant le critère comme une opportunité forte¹⁶⁴

Cependant, une recherche plus poussée démontre un intérêt marqué par les acteurs de la distribution, de l'automobile ou du ferroviaire qui voient ici une opportunité plus court terme que les autres de transformer leur activité, notamment au niveau des pièces détachées ou des pièces à faible valeur ajoutée dont le coût de transport est élevé. L'opportunité de produire de façon distribuée attire également les utilisateurs qui sont régulièrement confrontés à des zones difficiles d'accès qui entraînent des approvisionnements en pièces longs et coûteux.

Si les motivations sont assez similaires dans les différents secteurs industriels, il est évident qu'elles sont variables d'une typologie de pièce à une autre et d'un contexte de chaîne de valeur à un autre. Par ailleurs, un critère peut représenter une opportunité forte pour deux marchés mais pour des raisons bien différentes. Dans l'aéronautique et la joaillerie par exemple, si l'allègement des pièces obtenu par optimisation topologique ou *via* l'introduction de structures lattices permet de réaliser des économies de matière considérables lors de la fabrication de bijoux (un kilogramme d'or coûtant plus de 30 000€), c'est dans les économies de carburants associés à cette réduction de poids des pièces que les aviateurs et les compagnies aériennes s'y retrouvent. On peut citer également l'exemple de la personnalisation qui offre la possibilité d'obtenir des finitions particulières sur un véhicule automobile haut de gamme, une prothèse artérielle aux dimensions exactes du patient ou encore un objet grand public à l'image de son propriétaire. Cependant, le secteur du médical va plus loin dans l'approche de personnalisation en attachant beaucoup d'importance à l'utilisation d'un matériel spécialement conçu ou sélectionné en fonction de la physiologie du patient permettant de prendre en compte la variabilité du vivant.

Finalement, comme explicité par de nombreux acteurs, la fabrication additive peut également être vue comme une technologie d'avenir qui a pour principal avantage de « concevoir par rapport à une performance attendue et non plus par rapport aux techniques de fabrication et/ou d'assemblage ». En permettant de prendre de la distance par rapport aux contraintes imposées par les procédés de fabrication traditionnels, il est possible de se recentrer sur le cahier des charges de la pièce à produire, voire de le repenser, avec davantage de liberté dans sa conception dans la recherche des fonctionnalités d'intérêt. La fabrication additive ne doit ainsi pas devenir une solution globale en concurrence des procédés traditionnels : si le procédé est considéré comme alternatif pour une production à iso-design¹⁶⁵, en l'état actuel des connaissances, il devrait, pendant longtemps encore, être possible de trouver une technologie plus intéressante sur le plan économique.

¹⁶⁴ L'exploitation exhaustive des grilles de réponse par secteurs permettant de prioriser de manière indépendante les facteurs clés de développement dans chaque domaine est disponible en annexe.

¹⁶⁵ Le terme iso-design signifie dans l'ensemble de ce document « à conception identique », excluant ainsi toute reconception et modification de la forme, de la structure, ou des matériaux utilisés.

Freins et leviers de développement de la fabrication additive

Si la technologie est connue depuis plusieurs décennies, l'adoption massive de ces procédés au sein des industries et des territoires reste freinée par des verrous technologiques, économiques ou réglementaires. Les différents critères n'ayant pas le même impact sur le développement de la filière ni la même temporalité, cette partie vise à apporter des clés d'analyse aux acteurs intéressés par ces nouvelles technologies de production sur les différentes barrières à lever pour bénéficier pleinement des avantages des procédés de fabrication.

À l'avenir, les machines de production seront intégrées dans des environnements complets et complexes, comme c'est actuellement le cas pour certaines unités pilotes qui combinent différentes étapes d'apport et de soustraction de matière, avec une réelle combinaison des matériaux pour l'ajout de différentes typologies de fonctionnalités. La clef du développement de ces technologies reste actuellement autour du matériau et de la maîtrise des transformations physico-chimiques associées. **Personne n'est capable de prédire aujourd'hui quelles seront les typologies de machine de fabrication additive qui se démocratiseront à l'avenir, au vu des enjeux et environnements pluriels qui y sont associés.** Les freins explicités dans la suite de ce chapitre sont regroupés selon deux catégories cibles : le développement et l'amélioration des outils industriels de fabrication additive, et l'intégration industrielle de ces nouvelles technologies de production.

Le développement et l'amélioration des outils industriels de fabrication additive

L'ensemble des facteurs susceptibles de créer un avantage concurrentiel sur le procédé de fabrication additive est ici identifié et examiné. Ils ont vocation à augmenter les débouchés ou la taille du marché de l'entrepreneur qui utilise la fabrication additive. Ils concernent le positionnement et les capacités offertes par le procédé : personnalisation, complexité, qualité (résistance, etc.), types de produits (pièces détachées, produits finis), niveau de gamme, adaptabilité et rapidité de mise à disposition, proximité du marché, etc. Les différents facteurs sont présentés par ordre d'importance décroissant.

- Qualification, normalisation et répétabilité des procédés

Les faibles répétabilités du procédé, des machines et de la production de la matière semblent freiner la confiance, et peuvent constituer une barrière à la qualification.

Au niveau des procédés, un important verrou repose ainsi sur le manque de fiabilité et de répétabilité de la fabrication de la pièce. En effet, pour deux machines identiques avec les mêmes paramètres de fabrication, **il est parfois difficile d'obtenir la même qualité de pièce *in fine*, ce qui est un vrai frein pour toute démarche d'industrialisation, même si la productivité est au rendez-vous.** Cette mauvaise répétabilité est liée à de nombreuses variables encore peu ou mal connues au sein du procédé, un frein d'autant plus important que cela retarde considérablement les efforts de normalisation et pousse les acteurs à s'interroger sur la pertinence d'effectuer les qualifications au niveau des pièces, des échantillons, des machines ou des entreprises elles-mêmes. Beaucoup d'acteurs admettent également investir massivement chacun de leur côté dans des efforts de qualification, dont les montants très élevés peuvent également constituer un frein.

La problématique trouve par ailleurs son origine également au niveau du matériau, puisqu'il a été souligné qu'à court terme, un des freins principaux est lié à la faible répétabilité des spécifications techniques d'un lot de matière à un autre. Ce point est d'autant plus important qu'il a tendance à freiner les efforts de normalisation et de qualification des procédés et des pièces produites. Il existe ainsi un réel besoin de contrôle renforcé des poudres au niveau de la production.

Ainsi, le faible contrôle sur la granulométrie des matériaux représente un frein majeur actuellement. Les donneurs d'ordre cherchent à mieux comprendre l'impact des paramètres de poudres sur la pièce et ainsi mieux contrôler le procédé.

La mauvaise répétabilité est généralement liée à une mauvaise connaissance du procédé et des phénomènes physiques qui y sont associés. En cela, **un partage des connaissances et des bases de données pour comprendre les impacts des spécifications matières et des paramètres de fabrication sur la pièce est essentiel**. Il est ainsi impératif de pouvoir mettre en place des référentiels de bonnes pratiques sur le paramétrage et les règles de conception associées à l'utilisation de ces différentes technologies. L'émergence de technologies de monitoring fiables peut ainsi avoir une réelle incidence sur l'intégration de ces technologies, avec une meilleure compréhension de l'impact de la fabrication additive sur la santé et la sécurité des utilisateurs par exemple.

Aujourd'hui, le partage de connaissances et les retours d'expériences entre les acteurs français sont trop rares. On se doit cependant de mentionner le projet européen Kaza qui cherche à faciliter le paramétrage des machines pour obtenir plus vite des pièces aux caractéristiques attendues. Des technologies de *monitoring* sans rétrocontrôle doivent émerger à court terme : il est nécessaire d'accumuler de la donnée pour monter en compétence sur les paramètres associés au procédé et à la qualité de la pièce, afin de mieux comprendre les phénomènes physiques associés et d'être capable de réagir dans toute situation donnée. **La vraie difficulté est de normaliser un ensemble de technologies regroupées sous le même nom mais qui sont très différentes tant en termes d'application que de matériaux utilisés.**

Par ailleurs, le manque de confiance, de certification et de répétabilité freine l'utilisation de la fabrication additive sur les pièces critiques en termes de sécurité (mauvaise connaissance du comportement en fatigue, difficulté d'appliquer les coefficients de sécurité lors du dimensionnement...).

Le développement de la fabrication additive implique un meilleur recul sur les procédés de fabrication, soit par une analyse des paramètres de fabrication pour générer un guide de bonnes pratiques, soit par l'enregistrement d'un procédé de référence. L'intérêt est de détecter au plus tôt si la pièce doit être rebutée afin d'éviter les opérations coûteuses de post-traitement.

Enfin le développement de la fabrication additive rend également nécessaire la création d'une base de données reliant les caractéristiques des matériaux et les paramètres de traitement aux performances des pièces obtenues. Une telle base de données impliquerait une mutualisation des essais de caractérisation.

Focus sur une initiative cherchant à créer et à diffuser de la confiance afin de rendre la fabrication additive accessible au plus grand nombre : la mise en place d'un démonstrateur standardisé.

Afin de rendre la fabrication additive accessible au plus grand nombre, Spartacus 3D et le CTIF ont lancé un projet commun de reconception dans un univers industriel « standard » à travers le démonstrateur LETO. Il s'agit d'une pince métallique utilisée en fonderie placée au bout d'un bras robotique, afin de positionner un lopin chaud dans un laminoir. **Le but de ce démonstrateur est de présenter une méthodologie et les bénéfices de la fabrication additive** sur une pièce connue des acteurs de la filière forge fonderie. Beaucoup de ces acteurs avaient tendance à **considérer la fabrication additive comme trop complexe et pas forcément utilisable dans leur activité**. La pièce fait 7 kg et est soumise à des températures allant jusqu'à 1 100°C. Les problématiques identifiées sur cette pièce étaient les suivantes : durée de vie faible (au moins une casse par an), complexité de réparation de la pièce, et délai d'approvisionnement (plus de 15 semaines).

Le projet a été décomposé en trois phases : la première consiste à développer un démonstrateur permettant de fixer les choix techniques et économiques, la deuxième phase vise à confirmer le dimensionnement en proposant un prototype, et la troisième et dernière phase sera tout simplement une mise en production sur un ou plusieurs sites clients. Le projet se situe actuellement en fin de phase 1 aujourd'hui.

L'analyse fonctionnelle préliminaire a permis d'identifier les principales contraintes de l'environnement de travail, les besoins auxquels la pièce doit répondre ou encore les principaux procédés de fabrication associés à cette analyse.

La contrainte dans ce démonstrateur était de choisir un matériau adapté et **peu coûteux, tout en**

réduisant la quantité de matière fusionnée et les étapes de finitions. Le choix s'est porté sur un Inconel 718 bien maîtrisé. Par ailleurs, la première analyse économique réalisée dans le cadre du démonstrateur **démontre que le surcoût de la pièce en fabrication additive est compensé par les gains sur les coûts de maintenance et de réparation** (arrêt de production) du fait de l'intégration des fonctions de fond de pince et l'optimisation de la pièce. La phase 2 du projet sera lancée lors d'un arrêt de production sur site client pour changer la pince et analyser son comportement par caméra thermique, permettant de valider ou d'affiner son dimensionnement avant une utilisation opérationnelle en production continue.

Dans l'ensemble des marchés d'applications concernés par la fabrication additive, un grand nombre de sociétés n'arrive pas à se projeter vis-à-vis de leurs activités, jugeant le procédé complexe, difficile à mettre en place ou non adapté. **Communiquer sur les projets en cours et les acteurs impliqués sur cette thématique afin de sensibiliser les utilisateurs sur des cas concrets et relativement standards est un levier à actionner pour réduire les appréhensions et faciliter la découverte de la technologie.**

- Une amélioration du couple [vitesse de fabrication – coût de production]

Actuellement, le coût de fabrication par pièce est encore relativement élevé pour être compétitif sur de la production série. Il représente donc un levier de développement majeur partagé par l'ensemble de la filière. Ainsi, on retrouve de manière transverse dans les résultats de la grille d'analyse des critères comme le coût d'acquisition et l'obsolescence des machines, le coût d'ajustement des paramètres, des post-traitements ou des matériaux, ou encore la faible vitesse d'impression qui présentent un impact fort sur la compétitivité du procédé. Cependant, **si cette évolution est nécessaire pour accélérer l'adoption de la fabrication additive, les industriels ne sont pas inquiets** au vu du grand nombre de développement mené en ce sens actuellement et persistent sur le fait que **la priorité consiste à définir un socle solide en termes de qualification** et de répétabilité pour pouvoir industrialiser le procédé.

En effet, la fabrication additive regroupe un ensemble de procédés distincts qui opèrent à des vitesses de fabrication différentes. La productivité de la machine dépend de nombreux paramètres : température de la buse d'impression, épaisseur du filament et de la couche ou encore du nombre de supports en dépôt de fil fondu, de la taille de la goutte et/ou la puissance du faisceau pour les technologies de stéréolithographie ou Polyjet/Multijet, et de la puissance et du nombre de laser ainsi que l'épaisseur de la couche en frittage de poudres.

Si les vitesses de fabrication sont relativement satisfaisantes pour certains procédés tels que le dépôt de matière dans un flux d'énergie dirigé ou le dépôt de fil en fusion, on observe cependant l'apparition de nouveaux concepts de machines allant dans le sens d'une dynamique de réduction des coûts et d'une augmentation de la vitesse de fabrication (technologies multilasers, multispots...).

Une meilleure adoption des technologies de fabrication additive passe inévitablement par une amélioration sensible des trois facteurs clés associés à l'utilisation de ces nouvelles technologies : **le couple vitesse de fabrication/le coût de production associé, et la qualité du produit fini.** L'équilibre entre ces trois facteurs est essentiel afin de répondre aux problématiques industrielles. Par ailleurs, l'amélioration de ces trois paramètres permettra de favoriser la diffusion et l'intégration de ces nouvelles technologies de production.

Pour revenir à la grille, une analyse plus poussée démontre que ces paramètres représentent un enjeu fort pour les acteurs de la sous-traitance qui ont besoin d'amortir plus rapidement leurs machines et répondre aux cadences de plus en plus importantes de leurs clients. En effet, les premières pièces en fabrication additive qualifiées et certifiées pour l'aéronautique demandent à être produites en série quand aucun autre procédé ne permet de réaliser des formes si complexes. Avec une approche très portée sur les coûts, on comprend aisément pourquoi le secteur de l'automobile est très attentif à ces différents critères et ne perçoit pas la fabrication additive directe comme une réalité industrielle au vu des cadences pratiquées. En effet, la logique d'optimisation des coûts et des cadences cantonne aujourd'hui la fabrication additive d'outillages aux géométries nouvelles. Un des rares cas d'usages où la faible productivité est atténuée par la possibilité de faire des petites séries de pièces personnalisées est par exemple la

fabrication d'éléments pour les séries haut de gamme des voitures possédant le volant à droite. À noter également que le temps de fabrication est jugé, de façon partagée par les acteurs, encore trop contraignant dans le domaine des biens de consommation et de l'utilisation grand public de la fabrication additive. Ce verrou est perçu comme ayant un impact fort, aussi bien pour le plastique que pour le métal.

Concernant l'amélioration de la productivité, les développements sont nombreux. Dans le domaine des technologies de fusion sur lit de poudres, une augmentation du nombre de lasers permet par exemple d'améliorer la vitesse de fabrication. Cependant, les technologies multilasers rencontrent également certaines problématiques, dues à la complexité et au prix des composants lasers. Ces derniers sont générateurs de chaleur et de fumée, autant de limites à l'industrialisation des procédés.

En cela, l'émergence de nouveaux procédés est essentielle. Différents projets vont dans le sens d'avancées majeures :

- On peut notamment citer une nouvelle technologie développée par la *start-up* Carbon 3D, soutenue par Google, baptisée CLIP¹⁶⁶ (Continuous liquid interface production). Permettant une vitesse de fabrication de 25 à 100 fois plus rapide que les procédés classiques, le procédé CLIP se base sur une machine qui polymérise la matière en projetant des rayons UV dans un réservoir de résine photosensible qui se solidifie sous l'action des rayons. La technologie se différencie notamment des procédés existants par un fonctionnement continu, au contraire d'un fonctionnement en couche par couche.
- Avec un procédé similaire, la société israélienne Massivit 3D¹⁶⁷ s'est associée au distributeur français Global Graphics pour lancer la commercialisation de son imprimante 3D grand format sur notre territoire. Cette imprimante propose un des plus gros volumes d'impression au monde, avec des pièces pouvant atteindre 1,5 x 2,3 x 1,8 mètres. Le procédé, appelé GDP (*Gel Dispensing Printing*) reprend le principe du FDM et de la stéréolithographie, par l'extrusion d'un polymère photosensible sous forme de gel, durci instantanément avec une lumière UV au fur et à mesure de l'impression.
- Hewlett-Packard se lance également dans l'impression 3D, avec le *Multi Jet Fusion*¹⁶⁸. Une nouvelle technologie combinant fusion de poudres et dépôt d'encre selon 3 étapes distinctes devrait ainsi permettre d'atteindre des vitesses d'impression 25 fois plus rapides que les technologies FDM, et 10 fois plus rapide que du frittage de poudres.

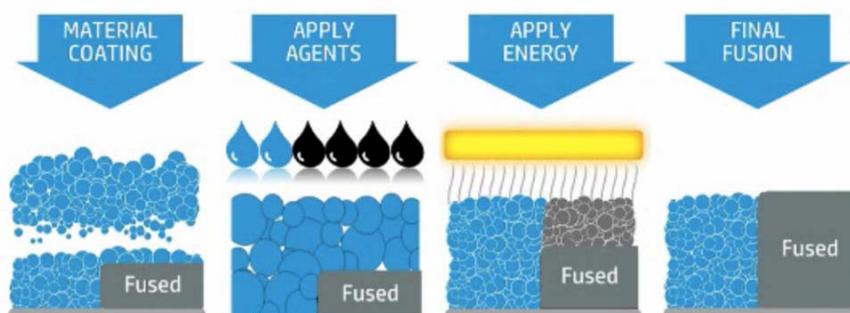


Figure 43 : Principe technologique du projet Multi Jet Fusion porté par HP

- L'université de Sheffield¹⁶⁹ annonce enfin le développement d'une machine de fabrication additive professionnelle ultrarapide, basée sur le principe breveté du frittage haute cadence et dérivée du frittage sélectif par laser. Au lieu d'utiliser un laser, cette technologie utilise une encre sensible aux rayons infrarouges et qui sera déposée puis absorbée par la couche de poudres avant d'être « flashée » par une lumière infrarouge. Une première version devrait voir le jour d'ici 2018 selon les chercheurs.

¹⁶⁶ CLIP, la nouvelle techno pour imprimer encore plus vite en 3D. Industrie & Technologies, 18 mars 2015.

¹⁶⁷ Bientôt en France ! L'imprimante 3D géante de MASSIIT 3D, Primante 3D, 25 janvier 2016.

¹⁶⁸ Hewlett-Packard se lance dans l'impression 3D avec le *Multi Jet Fusion* !, 3D Natives, 29 octobre 2014.

¹⁶⁹ L'université de Sheffield développe l'impression 3D à grande vitesse, 3D Natives, 4 juin 2015

Les quatre exemples cités illustrent ainsi le potentiel des nombreux travaux en cours sur le sujet, à même d'améliorer significativement la vitesse de production des technologies de fabrication additive. Ces évolutions ne sont cependant pas applicables à tous les procédés, à l'image du procédé CLAD qui ne devrait pas pouvoir gagner sensiblement en rapidité ou en automatisation selon les experts.

De plus, l'équilibre avec le coût de production (associé de manière indirecte au coût d'acquisition de la machine) ne semble pas forcément assuré dans la mesure où fabriquer plus vite implique aujourd'hui plus d'opérations de finitions dans la mesure où la surface obtenue est de moins bonne qualité (hors les post-traitements peuvent représenter jusqu'à 50 % du prix de fabrication d'une pièce aujourd'hui). Il s'agit ici d'un frein au développement des technologies de fabrication additive : les développements coûtent cher, et le retour sur investissement des développements actuels implique une mise sur le marché d'équipements onéreux. Par ailleurs, lors des consultations a été remonté un besoin incontournable de faire des compromis dans la mesure où des critères tels que l'augmentation du volume de fabrication ou de la productivité sont totalement antagonistes avec une réduction des épaisseurs de couches et donc de l'état de surface. En effet, la production de pièces d'envergure reste dans l'attente de vitesses de production élevées, qui ne sont aujourd'hui envisageables que par la diminution du nombre de couches utilisées. Cette diminution entraîne inévitablement une répercussion sur l'état de surface de la pièce, et donc de sa qualité. Pour ces raisons, il semble aujourd'hui difficilement concevable de produire des pièces d'envergures présentant une qualité de surface d'intérêt.



Figure 44 : Des leviers aujourd'hui antagonistes qui imposent de faire des compromis

Il est aujourd'hui difficile pour les industriels aussi bien que pour le grand public d'acquérir ces outils de production qui ne répondent pas encore à l'ensemble des attentes de chacun. Cela limite considérablement le développement de la filière. Seuls des effets de volumes peuvent permettre de faire diminuer significativement le coût d'accès à ces nouvelles technologies. Or, ces mêmes effets de volumes sont freinés par des coûts d'acquisition très élevés qui rendent difficile l'obtention d'un retour sur investissement d'intérêt. Pour contrecarrer ces freins, une fiscalité avantageuse, des aides au financement ou d'autres incitations à l'achat pourraient être judicieuses pour accélérer le développement de la filière. Cependant, les acteurs ne possèdent pas tous ni le recul, ni la maturité, pour pouvoir bénéficier de la mise en place de tels outils d'incitation. La temporalité de développement et de démocratisation de l'usage de ces nouvelles technologies est ainsi un frein réel, qui semble difficilement contournable à l'heure actuelle.

- États de surface et post-traitements

La fabrication additive ne permet pas aujourd'hui de produire des pièces avec des états de surface suffisants pour s'affranchir des post-traitements. Différentes étapes de reprises et de finitions sont alors essentielles à l'obtention d'une pièce conforme au cahier des charges défini, ce qui entraîne un besoin affirmé par les industriels interrogés de réduire les coûts de post-traitement ou d'intégration au sein de la chaîne de la fabrication. Une chaîne de post-traitement classique comprend différentes étapes, dont, notamment, le retrait de la pièce de son socle ou de son support, un traitement thermique, un usinage de finition pour une fonctionnalisation des surfaces, un traitement de surface et une inspection de la qualité. Les étapes de post-traitements peuvent cependant être réduites par la bonne prise en compte de ces étapes dès la conception de la pièce.

Le rôle et le coût des étapes de post-traitement ne doivent ainsi pas être sous-estimés dans l'analyse de la faisabilité de la production d'une pièce par fabrication additive. **Ces coûts peuvent représenter un surplus de 50 % à 300 % selon les pièces et les caractéristiques désirées.** Il est ainsi important d'appréhender le processus de production dans son ensemble, afin de mener une évaluation des coûts globaux. Il est de plus essentiel de développer à court terme des traitements de surfaces adaptés et intégrés aux caractéristiques de surface recherchées (rugosité par exemple). Il est ainsi nécessaire de mieux maîtriser l'épaisseur des couches et son impact sur la qualité de la pièce pour accroître la productivité. À court terme, il peut être pertinent d'intégrer les étapes de post-traitement au procédé (et de les automatiser) par le développement de machines hybrides par exemple.

À ce sujet, les nouvelles générations de systèmes de contrôle des procédés portent en eux la promesse d'une réduction des besoins de contrôle qualité amont, permettant ainsi une réduction des coûts tout en assurant une meilleure qualité des pièces finies. La qualité de production est définie par différents paramètres correspondants aux caractéristiques physiques du laser, de la chambre de fusion, et de la poudre. Ainsi, les procédés de contrôle peuvent être améliorés grâce à un contrôle direct sur le procédé laser, ou au niveau de la chambre de fusion. De cette manière, il est possible de réduire les coûts des procédés avec un contrôle qualité en temps réel, d'accroître la traçabilité en renseignant les paramètres d'intérêt du procédé, d'améliorer la qualité, la fiabilité des procédés, leur productivité et leur rentabilité¹⁷⁰, par une détection anticipée des déviations du procédé et de la mise en œuvre d'une procédure corrective.

Focus sur l'évolution du contrôle *in situ* des pièces :

Il existe des solutions qui permettent de suivre la puissance ou la vitesse du laser. Il faut cependant se poser la question de l'utilisation des données générées. Il peut par exemple être question de les valoriser pour du *monitoring* ou de l'analyse de résultats afin de générer un guide de bonnes pratiques. Cette question est d'autant plus problématique que certains constructeurs intègrent en option une tête optique ou pyromètre au sein du faisceau laser pour stocker des informations. Sans aucune boucle, cela implique en première approximation un module supplémentaire de l'ordre de 100 k€ pour une information non traitée.

Le contrôle *in situ* semble prometteur dans la mesure où la gestion des artefacts et l'analyse de la matière fusionnée permettraient de s'affranchir de la tomographie, opération relativement coûteuse. Des projets sont en cours pour suivre le bain de fusion. Par ailleurs, lorsque la NASA a évalué le système de Concept Laser, un procédé de référence a été enregistré (après une phase de tests et d'analyse pour obtenir une pièce de qualité souhaitée). Le contrôle *in situ* consiste à vérifier que les paramètres de fabrication ne s'éloignent pas de 20-30 % de la valeur de référence pour chaque nouvelle pièce.

Il est illusoire de penser que le contrôle *in situ* va permettre de rattraper automatiquement un défaut généré quelques millisecondes avant. Par analogie avec le soudage laser dans l'automobile, l'intérêt consiste surtout à savoir au plus tôt si on accepte ou rebute la pièce et si la pièce peut être réparée. Cela permet de rebuter une pièce produite par fabrication additive avant les opérations de post-traitement et de finition, ce qui représente une économie de plusieurs semaines et donc parfois de centaines de milliers d'euros.

▪ Le coût des matériaux, ou l'illusion d'un frein majeur

En compilant les résultats de la grille d'analyse, le coût encore élevé des matériaux utilisés en fabrication additive est affiché comme un des principaux freins au développement de ces nouvelles technologies de production. Cependant, cette considération est directement liée au fait que les pièces produites aujourd'hui par fabrication ne sont pas repensées en termes de design. En prenant un peu de recul, les acteurs interrogés soulignent qu'utiliser la même quantité de matière qu'un procédé conventionnel où les prix sont très largement inférieurs n'est pas judicieux et que réduire cette quantité nécessaire *via* une optimisation des structures

¹⁷⁰ La rentabilité est le rapport entre un revenu obtenu ou prévu et les ressources employées pour l'obtenir. La notion s'applique notamment aux entreprises mais aussi à tout autre investissement.

permettrait de réduire ce fossé. Par ailleurs, si la part du coût matière reste relativement importante dans le coût de fabrication, elle devient cependant secondaire lorsque considérée de manière globale (de la conception aux finitions). Le coût élevé des matières existantes devient donc un frein modéré avec la prise en compte et l'intégration d'une dimension de complexité dès la conception des pièces. La productivité de la chaîne de production impacte également de manière indirecte l'acceptabilité des coûts de matières élevés. Le coût matière est toutefois une question dilemme, notamment pour les PME, en particulier lorsque celles-ci doivent immobiliser un stock important de poudres d'une valeur financière élevée en regard d'un volume de production limité et de récurrence aléatoire. Pour cette catégorie d'acteurs, le coût matière est encore un frein important.

La filière reste par ailleurs relativement confiante sur le fait que le prix des matériaux va fortement chuter dans les prochaines années et ne considère pas ce critère comme un frein majeur. De plus, si on calcule de manière poussée la part du coût relatif à la modélisation de la pièce, à son coût de fabrication et à son coût de post-traitement (qui peut atteindre 50% du coût global), on se rend compte que le prix de la matière (<20 %) n'a plus qu'un faible impact sur le prix total de la pièce. En effet, même si le prix de la matière est divisé par deux, l'impact sur le prix global sera faible. Ce paramètre était souvent calculé au niveau du prix de production seul (où l'amortissement de la machine est de loin le principal poste de dépenses) et non au niveau global. Le coût des matériaux n'est donc pas un frein majeur et ne devrait pas bloquer le développement de la filière. Le problème réside principalement dans le fait qu'il n'est pas garanti aujourd'hui que deux lots identiques de poudres provenant du même fournisseur possèdent réellement les mêmes spécifications techniques. Les fabricants de poudres métalliques par exemple font des petits lots sur demande pour des fabricants de machines ou des donneurs d'ordre mais souvent avec des spécifications différentes.

Par ailleurs, il semblerait que les matières existantes permettent déjà de réaliser un grand nombre d'applications. Si les industriels et chercheurs souhaitent avoir accès à des gammes plus larges de matériaux, ils ne considèrent pas non plus ce critère comme un frein majeur. Les travaux sur les nouveaux matériaux représentent **cependant un challenge moyen terme qui aura un impact fort sur le développement de la fabrication additive au même titre que le design**. Il existe une véritable volonté de la part des acteurs de monter en compétence sur les matières existantes afin de comprendre les impacts des différents paramètres sur la qualité de la pièce, et ainsi d'être mieux armés pour demander ou codévelopper un matériau spécifique en réponse à ses besoins.

D'un autre côté, la fabrication multimatériaux, bien que très attrayante, apparaît comme un véritable challenge pour les technologies de fabrication additive sur lit de poudres dans la mesure où les processus de fusion avec les couches supérieures restent peu connus et posent des problèmes de réutilisation des poudres. Ces limites dépendent cependant des procédés : ainsi, si le procédé CLAD présente un véritable avantage sur les procédés multimatériaux, les technologies sur lit de poudres présentent davantage de limites. Les technologies de fabrication additive multimatériaux restent donc en cours d'émergence. Des procédés nouvelle génération émergent progressivement, avec par exemple la possibilité d'interrompre un procédé et de modifier l'approvisionnement en poudres afin de combiner l'utilisation de différents matériaux.

La question du développement de pièces multimatériaux représente un enjeu à moyen ou long terme qui devrait permettre d'obtenir des gradients de performance. Il s'agit pour l'instant d'un frein, puisque chaque nouveau matériau demande une nouvelle certification machine. De plus, tout reste à faire au niveau de l'automatisation des chargements de poudres. De nombreux matériaux restent également à étudier pour une utilisation potentielle par un procédé additif (bois, composites, béton, verre, ou matériaux architecturés par exemple).

L'intégration industrielle de ces nouvelles technologies de production

L'analyse développée ici concerne l'organisation productive, avec des facteurs d'optimisation des capacités de production, auxquels sont confrontées les entreprises. Différentes problématiques sont sous-jacentes à l'ensemble des facteurs explicités : la productivité, la rentabilité, la gestion des approvisionnements, gestion des flux et des stocks, et l'organisation de la chaîne de production (conception, innovation, fabrication, distribution et commercialisation, après-vente et réparation). Les facteurs sont à nouveau explicités par ordre d'importance décroissant.

- De nouveaux outils logiciels pour une nouvelle méthodologie de conception

Les technologies de fabrication additive invitent à un nouveau degré de personnalisation et de complexité, offrant la possibilité de proposer des pièces à l'image de leurs utilisateurs ou d'intégrer des fonctions supplémentaires et d'allègement pour augmenter ses performances tout au long du cycle de vie. Les experts s'accordent aujourd'hui sur le fait que la fabrication additive ne présente que peu d'intérêt pour réaliser des pièces à iso-design : une prise de conscience est donc nécessaire pour débloquer les usages. L'optimisation topologique, le développement de structures lattices ou encore la reconstruction par formes libres occupent ainsi un point central dans l'utilisation des technologies de fabrication additive, puisque permettant l'utilisation de moins de matière, des gains sur le cycle de vie des produits, et une valeur ajoutée créée par l'opportunité de générer de nouvelles formes.

Cependant, la plupart des acteurs se lancent aujourd'hui sur des pièces non critiques et ne prennent que trop rarement la décision de repenser le design de leur pièce. On estime aujourd'hui que 90 % des pièces fabriquées par fabrication additive le sont à iso-design : si cela représente un vrai intérêt pour accélérer le développement de prototype dans une démarche d'innovation incrémentale, il est difficile de prendre pleinement conscience des bénéfices de la technologie dans la mesure où la pièce n'a pas été pensée en ce sens. On peut expliquer cette situation par le fait que de nombreux acteurs sont en phase d'appropriation de la technologie et souhaitent avant tout monter en maturité dans leur compréhension du procédé. Par ailleurs, la reconception des pièces soulève souvent des questions de qualification et de normalisation des pièces, notamment dans des secteurs industriels soumis à des cadres réglementaires très stricts (aéronautique par exemple).

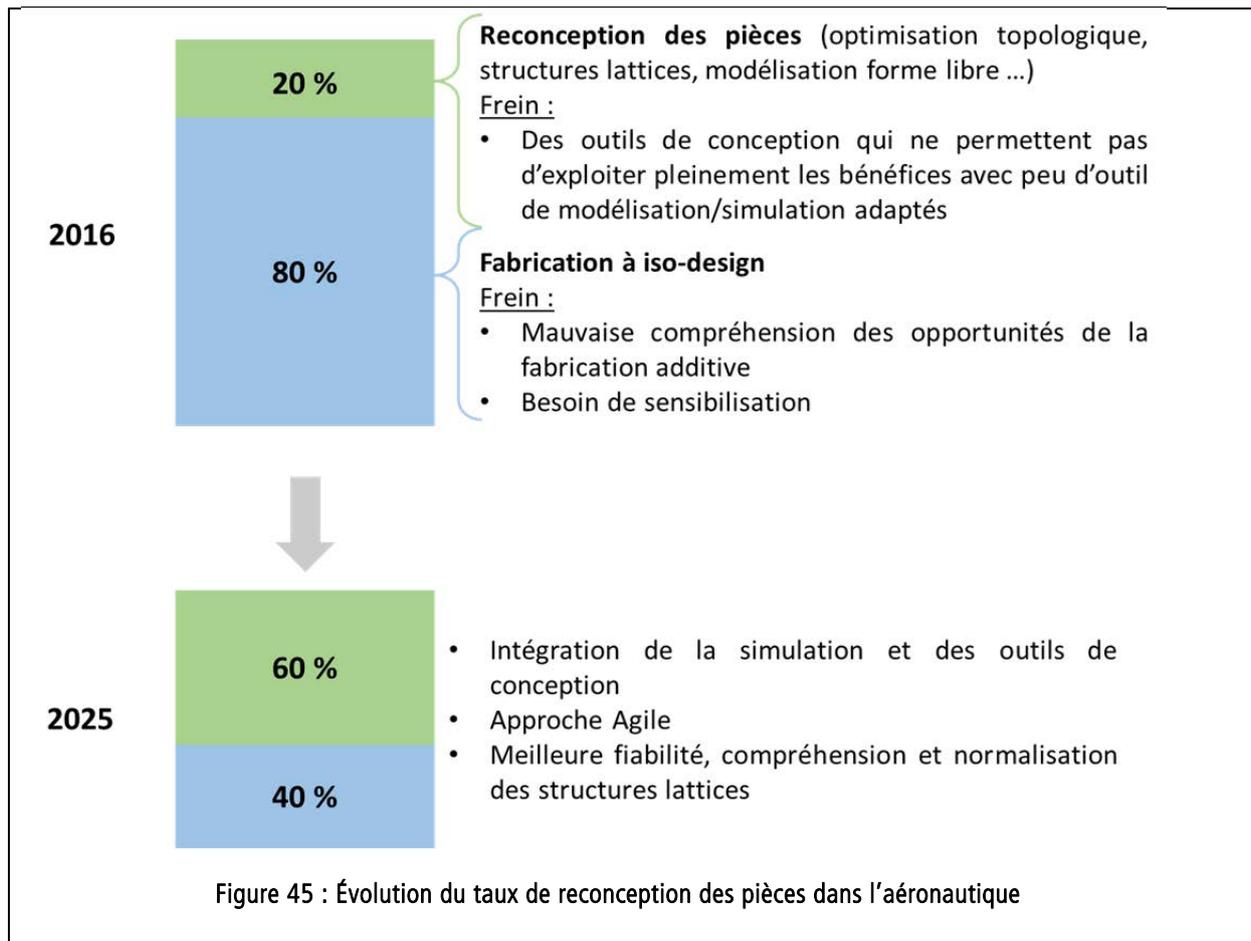
L'ensemble des acteurs interrogés s'accordent cependant sur le fait que la fabrication additive doit permettre d'aller plus loin qu'une simple modification des outils de production à iso-design.

Il est ainsi nécessaire de repenser profondément les méthodologies de conception afin d'entrevoir l'ensemble du potentiel de ces nouvelles technologies.

Les quelques acteurs qui utilisent activement les outils logiciels pour imaginer de nouvelles formes et augmenter les performances de leurs produits, ont fait part de leurs attentes vis-à-vis du développement de nouvelles solutions afin de rendre la chaîne de conception plus performante, continue et intégrant la fabrication et le post-traitement. Sur ce sujet également, les personnes interrogées dans le cadre de cette étude avouent être confiantes, car les développements vont très vite. Ils maintiennent néanmoins que ces outils ne doivent pas devenir des boîtes noires qui envoient le fichier à l'imprimante sans contrôle humain.

Focus : une démarche de reconception qui devrait se généraliser à moyen terme

20 % des acteurs de l'industrie aéronautique et spatiale utilisent l'optimisation topologique, un secteur plus sensible aux nouvelles opportunités de design. Ce chiffre pourrait monter à près de 60 % d'ici une dizaine d'années. En revanche, la plupart des autres industries semblent persister sur l'iso-design avec seulement 5 % des acteurs qui utilisent l'optimisation topologique (chiffre estimé à 15 % dans dix ans).



Concernant la conception des pièces, il existe deux typologies d'acteurs avec des besoins et des freins associés différents :

- Des acteurs qui ont besoin d'être sensibilisés aux atouts de la fabrication additive en repensant le design de leurs pièces (c'est notamment le cas du secteur de l'automobile qui pourrait à terme intégrer davantage de fonctions dans certaines pièces moteur mais à qui il reste un gap à franchir) ;
- Des acteurs déjà très actifs sur l'utilisation d'outils d'optimisation tels que le spatial, l'aéronautique et le médical, mais qui regrettent le nombre d'étapes manuelles et le faible niveau d'intégration des solutions existantes. En effet, il ne faut pas que les étapes de reconception génèrent des formes non constructibles et qui imposeraient un effort de reconstruction manuel ou un post-traitement plus long. Le design automatique selon des règles et des algorithmes spécifiques à la fabrication additive présente le potentiel d'impacter considérablement la productivité globale des opérations.

Afin de contrer ce frein, il est nécessaire d'accroître l'agilité des équipes de développement pour intégrer le client final dans une démarche de cocréation permet de valider un prototype de manière itérative, grâce notamment à l'introduction de méthodologies de type *Scrum*¹⁷¹ dans les processus d'ingénierie conventionnels.

Il est également nécessaire d'adapter l'utilisation des outils de conception assistée par ordinateur afin d'intégrer les spécificités de la fabrication additive. L'optimisation topologique par l'utilisation d'outils de modélisation et de simulation permet ainsi de définir la conception optimale des pièces en fonction des contraintes spécifiques qui y sont associées. De cette

¹⁷¹ *Scrum* est un schéma d'organisation de développement de produits complexes. Il est défini par ses créateurs comme un « cadre de travail holistique itératif qui se concentre sur les buts communs en livrant de manière productive et créative des produits de la plus grande valeur possible ».

manière, il est possible de créer des structures lattices¹⁷² optimisées en fonction de l'utilisation future de la pièce. Les structures lattices apportent de nombreux bénéfices potentiels, malgré un manque de recul sur les caractéristiques des pièces obtenues (résistance en fatigue notamment) et des problématiques de certification dans certains marchés.

Les structures lattices offrent pourtant le potentiel d'approfondir considérablement l'optimisation de la conception des pièces, afin de concilier la réduction du poids avec l'amélioration de certaines propriétés comme le renforcement de la durabilité, de la rigidité, ou d'autres propriétés du matériau (thermique par exemple). Les structures lattices permettent donc de réduire considérablement le poids des pièces, et sont particulièrement adaptées aux applications médicales (notamment dans le domaine de l'ostéo-intégration). Au contraire, pour des questions de certifications et de maintenance, ces structures peuvent être problématiques dans l'aérospatial. De son côté, l'automobile s'intéresse à l'optimisation topologique pour réduire ses coûts directs en économisant la matière sur les grandes séries, bien que les cadences offertes par les outils de production additifs ne répondent actuellement pas aux exigences du secteur.



Figure 46 : Exemple de structure lattice¹⁷³

Ces structures invitent à repenser l'approche de conception afin de simuler les comportements et les sollicitations après l'étape d'optimisation (et non avant). En effet, l'optimisation topologique se doit d'intervenir en amont des outils de simulation des contraintes qui permettent de définir la géométrie de la pièce.

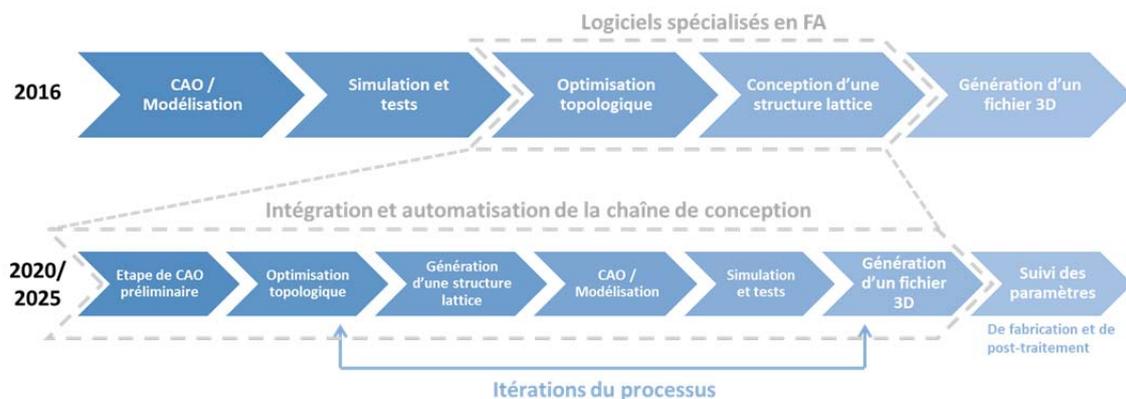


Figure 47 : Un besoin de repenser l'ensemble de la chaîne de conception

¹⁷² Une structure lattice est un maillage de la matière impliquant une inhomogénéité de la matière. Ces structures permettent notamment d'optimiser la répartition de la matière en fonction du cahier des charges de la pièce.

¹⁷³ Matériaux structurés/architecturés intégrant une structure cellulaire permettant l'allègement des pièces.

Actuellement, les industriels ont tendance à utiliser l'optimisation topologique pour la conception d'une structure lattice sur une pièce déjà conçue, dont les outils de modélisation et de simulation ont permis de déterminer les points de contraintes principaux. Demain, il sera nécessaire de repenser la chaîne d'utilisation des outils de conception assistés par ordinateurs, en faisant intervenir l'optimisation topologique et la génération d'une structure lattice très en amont, avant la finalisation des modèles numériques, permettant ainsi d'effectuer des tests en simulation après la génération d'une structure, et en itérant le processus afin d'optimiser la structure de la pièce à fabriquer.

Il s'agit ici bien de repenser de manière complète les méthodologies de conception, et donc les outils logiciels qui y sont associés. Le couplage de la fabrication additive et de l'optimisation topologique ne peut devenir une réalité industrielle que par le développement d'outils nécessaires à la transformation de la chaîne de conception, afin de la rendre plus performante de manière automatique. Il est ainsi nécessaire de reconcevoir les logiciels de maillage, les algorithmes d'optimisation topologiques avec prise en compte des contraintes de fabrication, ainsi que les logiciels comportant les fonctionnalités nécessaires au post-traitement pour obtenir une pièce conforme au cahier des charges initial. Il deviendra alors possible de répondre à un besoin essentiel des entreprises : concevoir plus vite, plus efficacement et à moindre coût en utilisant des composants toujours plus complexes et plus légers.

Dans les domaines très réglementés tels que l'aéronautique ou le médical, une prévision fiable des performances mécaniques de structures lattices représente un levier majeur pour faciliter les échanges et les procédures de certifications. Une amélioration de la finesse et de la précision des outils de simulation par l'intermédiaire de modèles théoriques plus évolués permettrait de déterminer des coefficients de sécurité lors du dimensionnement, ce qui pourrait à terme être intégré dans les logiciels pour faciliter les calculs de résistance mécanique.

Malgré cela, la tenue en fatigue des pièces réalisées par ce procédé commence tout juste à être analysée aujourd'hui. Ainsi, une meilleure compréhension des mécanismes de fatigues devrait permettre de générer des préconisations en termes de conception, de formes, de post-traitement ou encore sur la nocivité des défauts générés. Un autre levier majeur à considérer repose sur la maîtrise des interfaces permettant d'envisager à moyen terme la fabrication de pièces hybrides ou multi matériaux qui reposeraient sur une structure lattice.

- L'hybridation des machines ou la modularisation de la chaîne de production : une confrontation entre la vision d'une production délocalisée ou centralisée.

Alors que les utilisateurs de machines-outils cherchent à pouvoir terminer une pièce en une seule fixation depuis plusieurs années, de plus en plus de **machines multifonctions et de centres d'usinage polyvalents** font leur apparition. Poussés par des impératifs de réduction des coûts et de productivité, les constructeurs **affichent une volonté de se déployer sur de nouveaux domaines**. Dans cette dynamique, l'intégration de la fabrication additive dans un processus d'hybridation permet de générer une nouvelle source de revenus. Cependant, cette hybridation reste difficilement viable économiquement et limitée à des niches. En effet, la réalité industrielle de la fabrication additive semble davantage se trouver dans l'exploitation des machines au maximum de leur capacité et de leur cadence de production. À l'inverse, il est intéressant de noter que les constructeurs de machines de fabrication additive accentuent leurs efforts pour **transformer leurs équipements en outils fiables, pilotables par commande numérique** et intégrés dans le processus industriel à la manière d'une machine-outil.

Aujourd'hui, **les machines de fabrication hybride ne semblent donc se justifier que pour certaines applications de niche** : pour l'usinage de surfaces intérieures qui ne seront plus accessibles une fois la pièce terminée à l'image des formes de cône fermé, pour une réparation où la partie détériorée est usinée et où la fabrication additive permet d'ajouter de la matière, ou encore pour l'ajout de fonctions sur les pièces de grandes dimensions en acier. En effet, ces

opérations ne sont actuellement pas réalisables avec les machines de fabrication additive et **justifient le positionnement complémentaire des équipements hybrides**. Ces équipements hybrides peuvent par ailleurs trouver une utilisation dans la délocalisation d'unités de production indépendantes, qui pourront ainsi permettre d'obtenir un produit fini en dehors de la chaîne de production traditionnelle.

D'un point de vue plus général, même si l'hybridation paraît séduisante, les freins actuels de la fabrication additive en termes de productivité, de coût d'acquisition et d'amortissement de la machine **ne permettent pas toujours d'envisager une solution d'usinage intégrée**. En effet, les faibles cadences de production actuelles **imposent d'exploiter la machine de fabrication additive au maximum de sa capacité**. Une stratégie à court terme consisterait alors à développer des structures en îlots avec plusieurs machines de fabrication additive reliées à un seul centre d'usinage qui gère les finitions des pièces tout en garantissant un taux d'utilisation machine maximum.

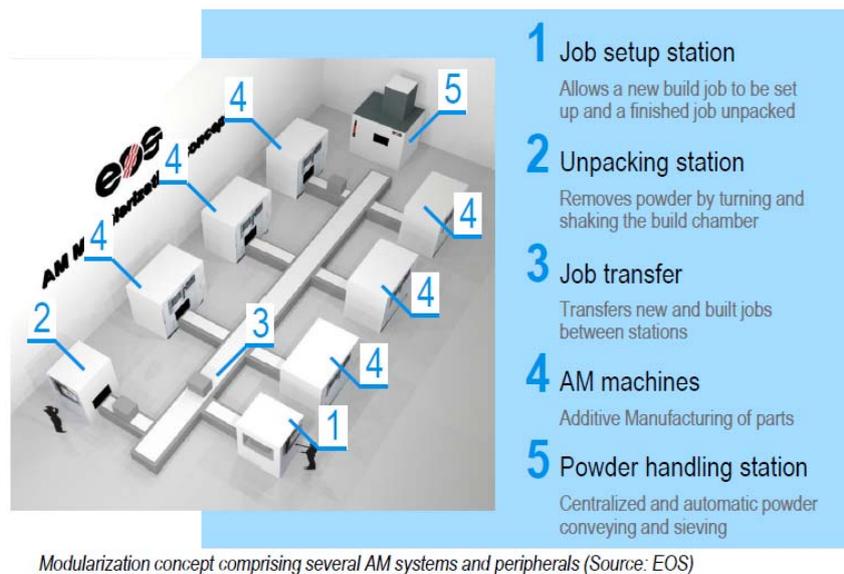


Figure 48 : Exemple de chaîne de production intégrée avec des îlots de fabrication additive

Enfin, l'atmosphère des cabines de fabrication n'est pas contrôlée, ce qui limite l'utilisation à des matières non réactives (pas de magnésium, d'aluminium ou de titane). Il s'agit là d'un paradoxe et d'un vrai levier de développement dans la mesure où les machines hybrides **offrent la possibilité de changer de matériau très rapidement grâce à des dispositifs d'aspiration, de filtration et d'arrosage automatiques** et donc de fabriquer des pièces multimatériaux.

L'automatisation des unités de chargement est un facteur capable d'améliorer considérablement la productivité des machines, et ainsi de réduire le coût de production. **L'automatisation complète permettra ainsi de gérer de manière automatique des procédés de fabrication additive industriels**. En effet, une fois que la machine s'arrête, un opérateur est indispensable pour pouvoir sortir la pièce du procédé et l'insérer dans un autre processus. Avec un procédé automatisé et intégré, il serait possible de décrocher la pièce et de lancer la fabrication d'une nouvelle pièce sans aucune intervention humaine. **L'intégration de la dimension d'automatisation dans la chaîne de production semble encourager la modularisation des procédés afin d'intégrer les technologies de fabrication additive au processus industriel dans son ensemble**. Il est en effet complexe d'intégrer et d'automatiser l'ensemble des fonctionnalités d'intérêt au sein d'une machine unique (concept de l'hybridation). Il semble plus cohérent de développer des chaînes de production modulaires qui permettent d'automatiser l'assemblage des différentes étapes de production.

Dans un environnement industriel, l'hybridation semble difficilement viable économiquement pour la majorité des applications du fait du besoin de concentrer la totalité du temps machine

sur la fabrication additive pour amortir la machine et les faibles cadences. Il semble ainsi préférable de mettre en place des îlots de production reliant plusieurs machines de fabrication additive à un centre d'usinage et d'utiliser les machines hybrides sur des segments de niche comme la réparation, l'usinage de surfaces internes ou les pièces de grandes dimensions.

Conclusion : des leviers aux temporalités et impacts différents

Pour conclure, on peut regrouper les différents leviers de développement des technologies de la fabrication additive en deux grandes catégories. La première concerne l'amélioration de la fiabilité et de la productivité afin de développer de nouveaux usages, d'industrialiser la technologie mais aussi et surtout d'augmenter le niveau de confiance et de faciliter les efforts de normalisation et de qualification, tant au niveau des machines, que des matières ou des pièces. Ces leviers sont actionnables à court terme mais ne devraient avoir qu'un impact modéré sur le développement de la filière dans la mesure où on peut assimiler cette dynamique à une voie d'adoption classique d'une nouvelle technologie.

Dans un deuxième temps, les développements de nouvelles méthodologies de conception et des outils de simulation menés en parallèle de la réalisation de matériaux innovants semblent représenter des leviers à l'impact potentiel beaucoup plus fort. Malgré une certaine dynamique et une bonne compréhension des enjeux associés par les acteurs de la filière, la temporalité des développements nécessaires et de la diffusion des nouvelles approches ne permet de positionner ces éléments que dans un second temps, à moyen terme. La recherche française est relativement bien positionnée sur ces leviers moyen terme/forts impacts. Il est important que la France maintienne un certain niveau de contrôle par sa forte présence au sein des organismes de normalisation, mais elle doit aussi se concentrer sur les leviers de plus long terme qui transformeront durablement la fabrication additive.

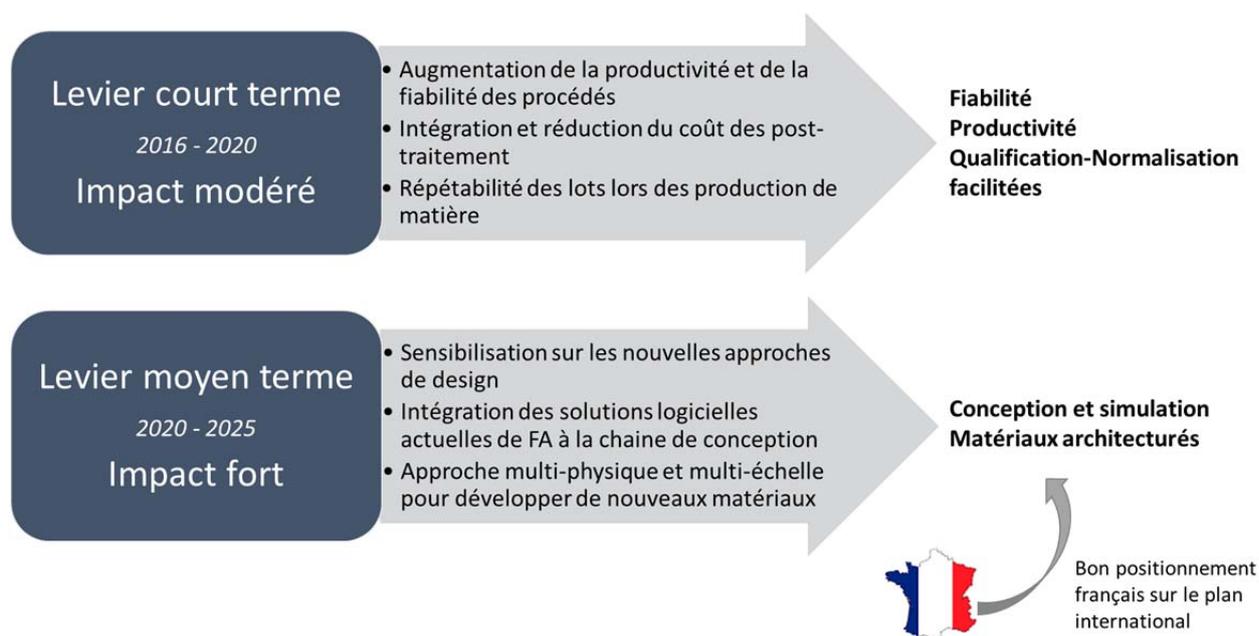


Figure 49 : Conclusion sur les différents leviers de développement de la fabrication additive

IMPACT DU DÉVELOPPEMENT DE LA FABRICATION ADDITIVE SUR LES TERRITOIRES ET SUR LA CHAÎNE LOGISTIQUE

Ce chapitre cherche à caractériser les conséquences du développement des technologies de la fabrication additive sur les territoires à travers les opportunités de mobilité des outils de production, concernant la place de ces technologies dans les stratégies de développement économique et d'innovation des collectivités territoriales, ainsi que relativement au modèle de développement et d'intégration des nouveaux usages associés au sein des tiers lieux de nos territoires.

Introduction

Le développement de l'impression 3D va de pair avec une évolution généralisée et nécessaire de la société vers une économie plus intelligente et territorialisée pour un impact économique, environnemental et sociétal maîtrisé. Si les développements quantitatifs et qualitatifs autour de l'impression 3D sont aujourd'hui considérables, l'analyse des enjeux de ces nouvelles technologies nécessite de segmenter le phénomène en distinguant les équipements à vocation industrielle et les machines orientées vers le grand public.

Le développement actuel des technologies de fabrication additive met en lumière **trois grandes interrogations** :

- Quel sera l'impact de ces technologies sur la relocalisation des activités industrielles et des emplois ?
- De quelle manière sera affecté le rôle d'intermédiation entre producteurs et utilisateurs de biens et services ?
- Comment devra évoluer la propriété intellectuelle afin de préserver les activités de recherche et développement, de normalisation, de responsabilité et de sécurité ?

Ces questions invitent ainsi à étudier les opportunités économiques et écologiques de la fabrication additive et les mutations économiques associées, afin de déterminer la place de l'impression 3D dans les stratégies de développement économique et d'innovation des collectivités territoriales.

Les réponses à ces interrogations seront différentes suivant les applications envisagées. La transformation est en cours du côté industriel, malgré une mauvaise intégration de l'ensemble des potentialités de cette technologie. L'engouement et l'enthousiasme chez les particuliers, notamment autour des FabLabs appellent à une certaine prudence, car il est nécessaire de faire émerger au préalable un modèle économique rentable pour ces structures.

Les entreprises françaises doivent aujourd'hui s'adapter à la numérisation des systèmes de production. L'impression 3D représente une opportunité sans précédent néanmoins mal assimilée notamment par les PME/PMI, les artisans ou les indépendants. Ce nouvel écosystème se met en place progressivement et vient questionner les mécanismes de la production manufacturière traditionnelle. Les procédés de fabrication additive offrent en effet à la fois des perspectives de relocalisation bien réelles¹⁷⁴, pouvant permettre le développement d'activités de proximité répondant à des besoins immédiats et territorialisés mais également des risques de délocalisation contre lesquels il sera nécessaire de se prémunir. La mobilité des outils de production présente ainsi de manière duale des avantages et des inconvénients, selon que l'on aborde la problématique sur la question de la délocalisation d'outils de production à l'étranger

¹⁷⁴ En considérant que l'ensemble des freins technologiques et organisationnels puissent être levés à l'avenir.

(et au plus proche des marchés cibles), ou sur la relocalisation de chaînes de production étrangères en France (pour répondre aux besoins du marché national).

À la lecture de la synthèse des différentes stratégies régionales d'innovation¹⁷⁵, il apparaît que la place de la fabrication additive dans les stratégies de développement des collectivités territoriales n'est pas toujours complètement affirmée. La fabrication additive vient généralement en complément de spécialisations complémentaires, applicatives ou industrielles. À titre d'exemple¹⁷⁶, la région Aquitaine met l'accent sur « L'usine compétitive centrée sur le facteur humain », la Bretagne sur les « Technologies de pointe pour les applications industrielles », la Champagne-Ardenne sur « L'optimisation des performances, de la transformation et de l'utilisation des matériaux », le Limousin sur les « Techniques et technologies céramiques et leurs applications », la Lorraine sur « Concevoir et proposer des matériaux et des procédés avancés pour les industries de masse », et la région Rhône-Alpes sur les « Procédés industriels et usine éco-efficente ».

Ainsi, chaque région aborde la thématique sous un angle différent, en fonction de ses spécificités existantes et de ses ambitions futures. Au total, la thématique de l'usine du futur ne représente que 4 % des domaines de spécialisation intelligente des SRI-SI des régions françaises, avec 9 % consacré aux matériaux, à la mécanique et à la chimie. La répartition des différentes spécialisations ne permet pas une bonne lisibilité sur l'implication réelle des régions françaises sur le sujet de la fabrication additive. Par ailleurs, certaines régions ne font pas apparaître la fabrication additive, même de manière indirecte, en tant que domaine de spécialisation. Pourtant certaines de ces régions y portent néanmoins un intérêt, à l'image de la région Nord-Pas-de-Calais et de son Club Impression 3D, comme explicité dans la suite de ce rapport.

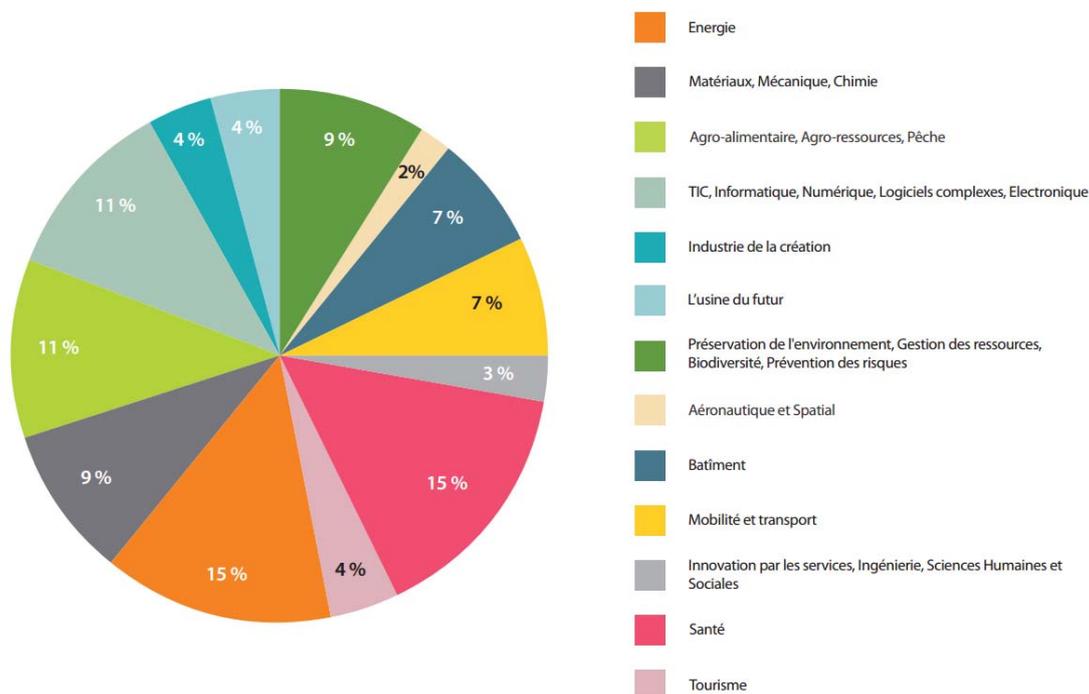


Figure 50 : Répartition des domaines de spécialisation intelligente des SRI-SI des régions françaises par marchés ciblés¹⁷⁷

¹⁷⁵ Synthèse des Stratégies Régionales de l'Innovation (SRI) en vue de la spécialisation intelligente (S3) des régions françaises, CGET, 6 août 2015.

¹⁷⁶ Cette analyse repose par ailleurs sur l'ancienne segmentation des régions.

¹⁷⁷ Synthèse des Stratégies Régionales de l'Innovation (SRI) en vue de la spécialisation intelligente (S3) des régions françaises, CGET, 6 août 2015.

L'évolution macroéconomique de l'organisation industrielle

La souplesse offerte par l'intégration de la chaîne numérique dans les procédés de production en modifie la structure et l'économie, le fonctionnement, l'échelle et même la localisation. Nombre d'experts du monde industriel qualifient ainsi ce phénomène de quatrième révolution industrielle. La fabrication numérique offre la possibilité de concevoir une pièce et de la produire dans des lieux totalement distincts, *via* un simple envoi de fichier. La capacité de ces nouvelles technologies à optimiser les processus ouvre des perspectives très encourageantes en termes de nouvelles activités et de modèles économiques innovants. Cependant, l'intégration de ces technologies peut impliquer des repositionnements stratégiques importants et porteurs de transformations profondes de l'économie. Face à ce potentiel de disruption de la production industrielle et de biens de consommation, une prise de position des pouvoirs publics est nécessaire, et nous invite à une réflexion approfondie sur le sujet.

- Un processus hybride entre délocalisation et relocalisation

Lorsque l'on parle d'innovation de rupture, le plus important n'est pas la technologie en tant que telle, mais davantage les transformations et l'évolution des modèles associés, que ce soit d'un point de vue économique, méthodologique ou relatif à l'expérience d'utilisation. L'émergence et la démocratisation des technologies de fabrication additive posent ainsi de nombreuses questions relatives aux retombées territoriales, notamment face aux impacts potentiels sur la relocalisation des outils de production.

Afin de mieux comprendre le phénomène, il est nécessaire de repartir des principes initiaux associés à ces technologies de la fabrication numérique. **La fabrication additive apporte l'intelligence des outils du numérique aux procédés de fabrication.** Elle permet ainsi une progression de l'automatisation des procédés, et porte en elle un vent de renouveau des industries de production manufacturières.

Se dirige-t-on vers une relocalisation territorialisée des outils de production ? Au contraire, quels seront les impacts en termes de délocalisation ? Il semble que les transformations associées à ces nouvelles technologies se matérialisent au travers d'un subtil mélange des différents phénomènes de mobilité des outils de production.

La démocratisation des technologies de fabrication additive a le potentiel de faire émerger, à l'avenir, des plateformes de production partagées et mutualisées entre différents industriels et différents producteurs, pour qui la conception d'un nouveau produit sera en grande partie virtualisée.

De cette manière, il sera possible de produire au plus près des clients et utilisateurs finaux. À terme, cela peut donc bien permettre la relocalisation de la production des biens de consommation courante, au plus proche des consommateurs et du besoin.

A contrario, les technologies de la fabrication numérique ont également le potentiel de délocaliser bon nombre de moyens de production actuellement utilisés pour adresser des marchés étrangers. La mobilité des outils de production pourrait bien rebattre complètement les cartes de l'organisation territoriale de la production, et cela, à l'échelle mondiale.

Bien évidemment, les industries seront touchées de manière très différente par le phénomène. Alors que les industries lourdes et les productions de grande série seront très peu affectées et se limiteront à moyen terme à une intégration de ces outils de production innovants à leur chaîne de production traditionnelle, **les biens de consommation et la production de petites et moyennes séries se transformeront bien plus rapidement à partir des principes et concepts associés à ces technologies de la fabrication numérique.**

L'intégration des technologies de la fabrication additive au sein des filières industrielles demande une prise en compte de nombreux facteurs différents et spécifiques à chaque typologie de production, comme le démontre la figure suivante. Elle positionne le potentiel d'adoption des

technologies de fabrication additive par rapport à leur compatibilité avec les outils traditionnels, et par rapport à la part du coût de transport dans le coût de production total de différents biens. Cette illustration positionne l'utilisation des technologies de fabrication additive pour de la production directe. Il s'agit ainsi d'un cas particulier d'intégration de ces technologies, qui met en avant par exemple des impacts à court terme sur les marchés grand public et le *retail* comme l'illustre le positionnement des segments de marché du jouet et des chaussures. *A contrario*, certaines typologies de produits ne devraient être concernées par ces nouveaux outils qu'à moyen terme, à l'image des produits en cuir qui ont encore besoin de gagner en maturité sur les technologies de la fabrication additive.

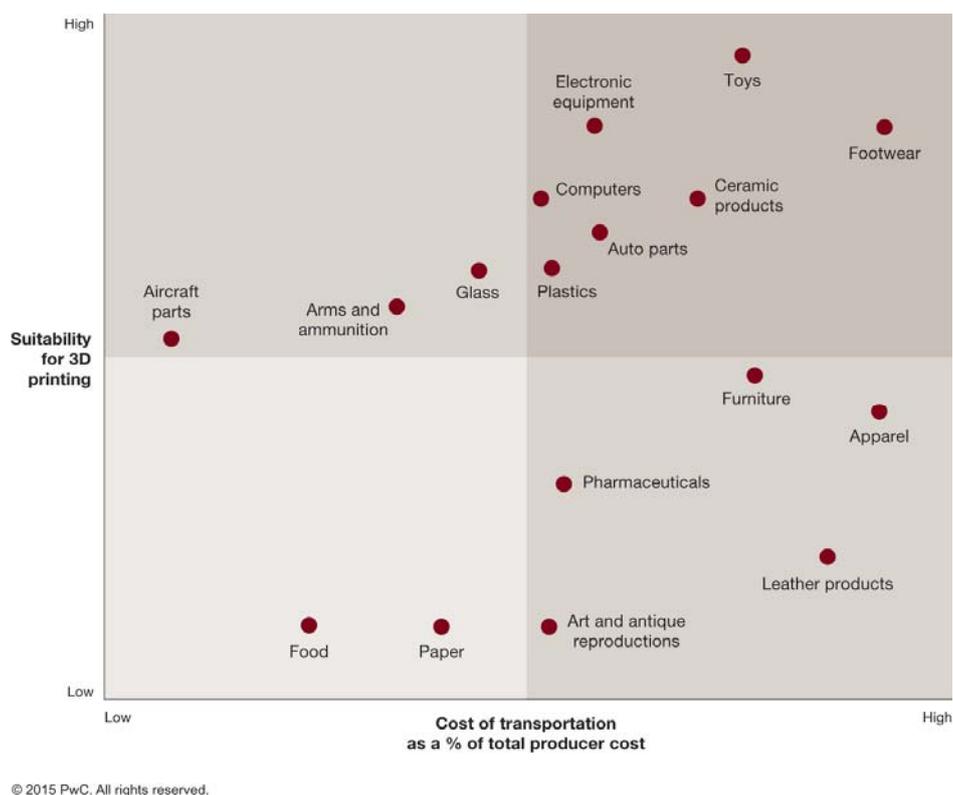


Figure 51 : Potentiel d'adoption des technologies de fabrication additive au sein de différents secteurs

Le prix du transport étant fortement dépendant de la destination et de la fréquence de livraison, il est nécessaire d'ajouter ce critère dans l'analyse. En effet, le spatial, les plateformes *off-shores* ou encore les mines souffrent de délais et de coût d'approvisionnement très élevés pour l'acheminement de pièces de rechange ou de consommables.

Focus sur la fabrication additive dans l'aérospatial :

À titre d'exemple dans le spatial, on estime le prix du kilogramme mis sur orbite à 20 000 €¹⁷⁸. Depuis 2014, la NASA envisage l'utilisation de l'impression 3D afin de produire des objets directement dans l'espace, au sein de l'ISS (*International Space Station*)¹⁷⁹. Cela permettrait notamment de créer rapidement de multiples équipements, pièces de rechanges ou matériaux sans besoin d'approvisionnement spécifique en provenance de la Terre. La NASA a fait appel pour ce faire à la société *Made in Space* afin de concevoir une imprimante répondant aux contraintes de l'espace, et assez résistante et sécurisée pour une utilisation au sein de l'ISS¹⁸⁰.

¹⁷⁸ Source : Retour de consultation auprès de l'ESA.

¹⁷⁹ La NASA met l'impression 3D au service de la conquête spatiale, Clubic, 26/11/2014.

¹⁸⁰ 2014 : L'impression 3D de l'Espace ! Additiverse, 13/09/2015.

La NASA investigate également des applications autour de l'extraction d'astéroïdes, à travers le projet RAMA (*Reconstituting Asteroids into Mechanical Automata*) mené par l'entreprise californienne Made in Space¹⁸¹. Ce projet cherche notamment à envoyer un robot dans l'espace capable de se fixer sur l'astéroïde, d'en extraire le matériau d'impression et de fabriquer un système de propulsion et de navigation via les technologies de fabrication additive.

La fabrication additive représente pour ces secteurs une véritable opportunité d'acheminer rapidement et à moindre coût des pièces vers des zones éloignées. Installer des machines sur place pour produire sur demande des objets standards pour lesquels la part du prix de transport dans le prix global est très élevée permet d'envisager ces premiers exemples de production délocalisée dans un futur proche. Cependant, les usages resteront relativement limités dans la mesure où les problématiques de qualité de surface de la pièce obtenue impliquent de disposer d'une chaîne de post-traitement.

Ainsi, on retrouve des avantages différents et propres à l'intégration des technologies de fabrication additive, selon que l'on envisage un système de production centralisé ou une production distribuée.

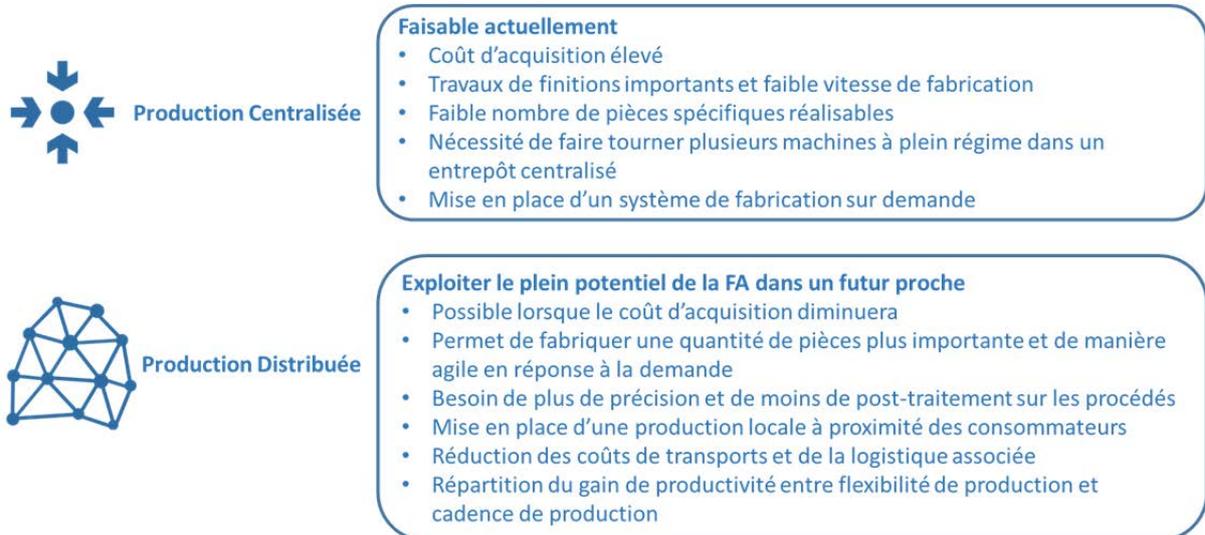


Figure 52 : Avantages associés aux systèmes de production centralisés et distribués

Cependant, la grande majorité des acteurs refusent aujourd'hui de remettre en cause le schéma traditionnel de l'industrie, avec un fonctionnement en silo qui reste très ancré dans la réalité industrielle. Une telle remise en cause nécessiterait une réorganisation profonde du territoire, que les industriels seuls ne peuvent pas porter.

Ces premières tendances sont à mettre en parallèle de la réalité économique d'aujourd'hui, qui incite à une externalisation industrielle toujours plus grande. **La fabrication additive n'a pas encore la capacité de remise en cause de cette tendance à court terme**, en raison des vitesses et des cadences de production qui restent trop lentes pour représenter de véritables potentialités économiques des post-traitements nécessaires et du besoin d'évolution des compétences et des méthodologies de conception requise.

Par ailleurs, et sur un tout autre plan, le scénario prospectif d'une relocalisation de la force manufacturière peut se dessiner indépendamment de la fabrication additive. En effet, les salaires entre les pays ont tendance à s'équilibrer. Certains ingénieurs chinois peuvent ainsi aujourd'hui être mieux payés que les ingénieurs français. Ainsi, **le processus de mobilité des outils de production dans lequel s'insère la fabrication additive est porté par de nombreux autres facteurs globaux et mondialisés.**

¹⁸¹ La NASA investit dans l'impression 3D pour étudier les astéroïdes, 3Dnatives, 09/06/2016.

- Une redistribution de la valeur ajoutée créée

La fabrication additive a le potentiel de modifier les échanges et les relations traditionnelles entre le producteur et le consommateur. L'utilisateur devient à la fois producteur et consommateur lorsque les systèmes de production se relocalisent dans les locaux du consommateur.

La relocalisation des outils de production pose ainsi la question de **la redistribution de la valeur ajoutée tout au long de la chaîne de production et de la chaîne logistique**. Les acteurs positionnés au niveau de la mise en relation avec l'utilisateur et le client final seront ainsi mieux positionnés pour capter une partie de la valeur ajoutée associée au produit et à sa production. **Cela pose ainsi la question du financement des activités de recherche amont, qui sont généralement amorties par la marge associée au cycle de production du produit.**

On retrouve les grandes tendances d'évolution et de redistribution de la valeur ajoutée créée sur les différentes étapes du processus de production sur le schéma suivant. En facilitant le prototypage, l'impression 3D vient diminuer la valeur de cette étape, au profit de la création d'idée (la valeur associée à chaque opération de prototypage est beaucoup plus faible, car sa mise en œuvre est facilitée). De même, l'outillage nécessaire à la production perd en intérêt, au profit de la fabrication elle-même, qui nécessite moins d'assemblages et moins de stockages. Ces éléments mettent ainsi en valeur les étapes associées à la distribution du produit à l'utilisateur final, et à la relation entretenue avec ce dernier.

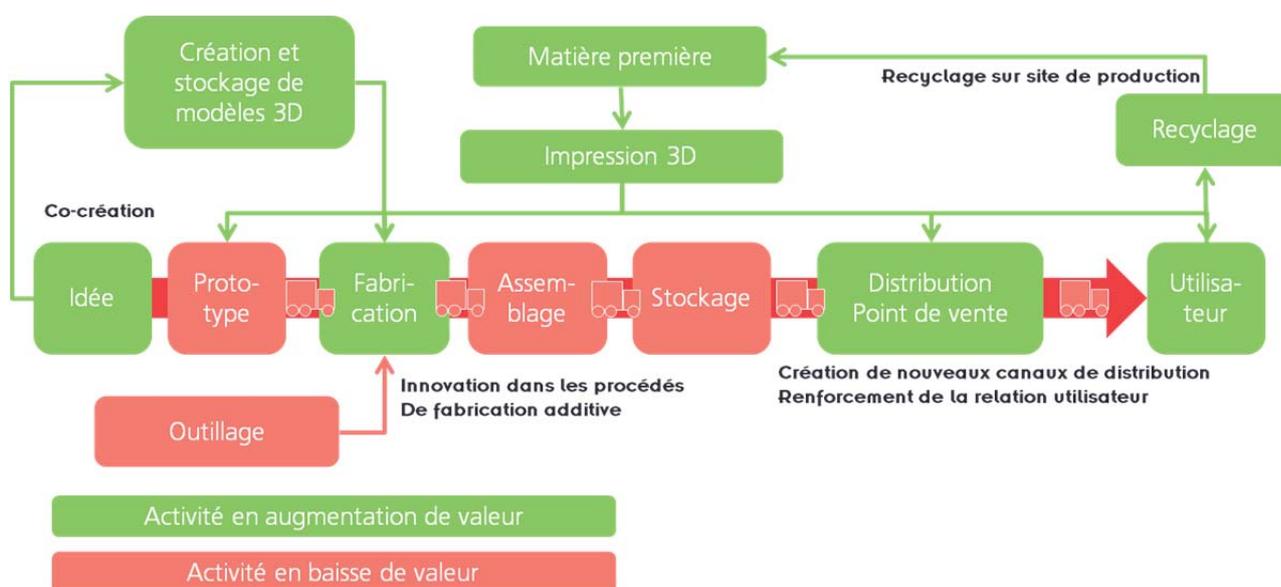


Figure 53 : Représentation schématique des évolutions de la répartition de la valeur ajoutée¹⁸² associée au processus de production¹⁸³

Si, aujourd'hui, on ne sait pas vraiment quelle sera la stratégie gagnante vis-à-vis de la fabrication additive (relocalisation en France, implantation d'une machine à proximité du client final), il est fondamental de considérer la confidentialité de la pièce et les coefficients de marge sur les services associés :

- Quand on envoie une machine à l'étranger, on envoie une équipe en charge de l'installation sur site et il est toujours possible de masquer les éléments stratégiques et confidentiels associés au procédé. Avec la fabrication additive, toutes les fonctions peuvent être rapatriées sur une seule pièce, ce qui pose de vrais problèmes de

¹⁸² En comptabilité, la valeur ajoutée (VA) est une notion qui s'efforce de mesurer la valeur économique ajoutée par l'activité d'une entreprise. L'Insee la définit comme le « solde du compte de production. Elle est égale à la valeur de la production diminuée de la consommation intermédiaire. Pour chaque agent économique, c'est un des soldes intermédiaires de gestion qui correspond à la différence entre la valeur des produits (le chiffre d'affaires) et la valeur des achats faits pour exercer l'activité (marchandises, consommations intermédiaires : matières premières, services...).

¹⁸³ Certaines étapes de la chaîne de valeur auparavant segmentées sont susceptibles de recombinaisons diverses avec l'introduction de la technologie additive.

confidentialité. Cet aspect risque de devenir ainsi un critère décisif du choix du lieu de fabrication ;

- Sur le marché de la pièce détachée, des concurrents de taille modeste pourront fabriquer à proximité du client final. Dans ce contexte d'accroissement de l'intensité concurrentielle, il faudra alors justifier un avantage compétitif associé à des services en termes de réactivité et de logistique. Le risque de réduire les coefficients de marge sur la fabrication de pièces détachées est ainsi bien réel.

La recherche et le développement de nouveaux produits se matérialiseront par la création de fichiers numériques 3D. Or, la politique de protection de la propriété intellectuelle ne couvre pas bien aujourd'hui cette typologie de création. Dans une vision prospective, le producteur d'aujourd'hui sera en charge demain de l'élaboration de concepts produits, dont les étapes de production et de livraison seront décentralisées et pour lesquelles n'aura plus une entière maîtrise.

Focus sur les aspects liés à la propriété intellectuelle et au cadre juridique autour de la fabrication additive et de l'impression 3D :

Il n'existe aujourd'hui aucune réglementation précise sur les licences et les droits de propriété intellectuelle associés aux produits de la fabrication additive et à la responsabilité associée. En cas de défaillance ou de problème, il n'y a ainsi pas de cadre juridique permettant aux assurances de se positionner sur le sujet.

Pourtant, la propriété intellectuelle joue un rôle majeur dans le développement économique des systèmes de production modernes. Dans le cas de la fabrication additive, le point critique se situe sur les bases de données des fichiers numériques CAO pouvant être diffusés *via* internet. Les lois de protection des marques punissent généralement l'utilisation frauduleuse de produits issus de l'impression 3D à des fins commerciales, mais permettent aux particuliers un usage privé des produits ou des fichiers de CAO. Une perspective différente pourrait être développée par des plateformes de partage, même si la discrimination des fins commerciales devrait être appliquée.

Suite au rapport de l'INPI sur l'impression 3D¹⁸⁴ et en réponse à la question de la redevance pour copie privée, il a été mis en avant que l'utilisation collective des imprimantes 3D fait de l'extension de la redevance pour copie privée une réponse inadaptée¹⁸⁵. Il est urgent d'adapter le statut des intermédiaires de l'impression 3D à l'évolution de leurs activités. Il est pour cela nécessaire de mener une réflexion par filière afin de mettre en place une offre légale spécifique à chaque type de produit.

▪ Impacts sur la chaîne logistique

La fabrication additive semble donc présenter de nombreux avantages, dont la plupart sont intimement liés à des effets positifs sur la gestion de la chaîne logistique : temps de fabrication réduit (transport compris) et personnalisation des produits. Les coûts de production devraient à terme diminuer, favorisant l'intégration de cette technologie sur un marché mondial, exigeant de plus en plus de produits à la demande et personnalisés.

L'utilisation de la fabrication additive peut modifier profondément les chaînes d'approvisionnement et de fabrication, historiquement externalisée et centralisée. Même si, pour de nombreux produits standardisés, la production traditionnelle de masse reste et restera toujours l'option la plus avantageuse (*a minima* à court et moyen termes), les techniques de fabrication additive représentent une grande opportunité et s'appliquent notamment :

- Aux pièces sensibles aux ruptures d'approvisionnement ;
- Aux pièces dont le besoin est limité mais dont le volume minimal de commande auprès des fournisseurs est important ;
- Aux pièces de faible consommation nécessitant un moule dont la fabrication est lente et coûteuse ;
- Aux pièces et sous-systèmes destinés à la réparation et à la maintenance.

¹⁸⁴ L'impression 3D et la question de la redevance pour copie privée, Fatima Ghilassene, Observatoire de la Propriété intellectuelle, Rapport du sous-groupe de travail « impression 3D » du CNAC ; Mars 2016.

¹⁸⁵ Suite aux conclusions de l'étude : L'impression 3D et la question de la redevance pour copie privée, Fatima Ghilassene, Observatoire de la Propriété Intellectuelle, Mars 2016.

Dans les processus de fabrication traditionnelle, il est souvent nécessaire de prévoir des stocks de pièces de rechange pour pouvoir réparer les produits et les outils dans le cas où ceux-ci se cassent ou sont endommagés. Le coût de production, de stockage et de distribution de ces pièces de rechange est important. Avec la fabrication additive, les pièces de rechange pourront être fabriquées sur place et à la demande, diminuant ainsi leur temps de fabrication et de livraison. Il y a ainsi de réels enjeux autour de la réparation et du service après-vente pour la réduction des stocks de pièces détachées ou pour fabriquer des pièces dont les modèles ne sont plus produits depuis des années.

Ainsi, dans ce scénario industriel, l'impression 3D n'a pas pour vocation de créer un produit, mais de permettre à un consommateur de réparer et de conserver un produit existant par la création d'une pièce, d'un sous-ensemble du produit.

Ce type de philosophie est développé par de grands industriels des biens de consommation, comme Seb avec sa politique Seb Répare, qui est en cours de mise en œuvre¹⁸⁶. Dans le cas de Seb, cette stratégie est motivée par une politique qualité forte, visant à fidéliser le client en lui offrant la possibilité de réparer tout équipement, même si la pièce détachée n'est plus en stock (il est alors possible de la fabriquer à l'unité grâce à une imprimante 3D). L'objectif est ainsi d'offrir aux clients, dans toute situation, une solution de réparation qui évite de devoir racheter un appareil neuf. Le gain en coût de stockage n'est, dans ce cas, pas compensé par le surplus de coût de production associé à l'utilisation des technologies de fabrication additive. L'image de la marque en est cependant renforcée.

Cette politique va dans le sens d'une tendance générale des consommateurs de plus en plus séduits par la réparation plutôt que par l'achat de produits neufs.

▪ Vers une mutualisation des outils de production industrielle

Dans la mise en œuvre des stratégies explicitées ci-dessus, l'acquisition de machines de fabrication additive comme outils de production ne semble pas être le modèle privilégié à terme, notamment vis-à-vis du bilan économique associé à une utilisation ponctuelle des procédés. Les métiers autour de la réparation peuvent ainsi y trouver un nouveau dynamisme grâce à l'émergence et la diffusion d'une telle approche, avec l'implantation de micro-usines partagées permettant de répondre aux besoins de différents industriels¹⁸⁷. Nous définissons ainsi ici les fondations des *print factory* de demain, travaillant pour le compte de plusieurs industriels en relation de sous-traitance.

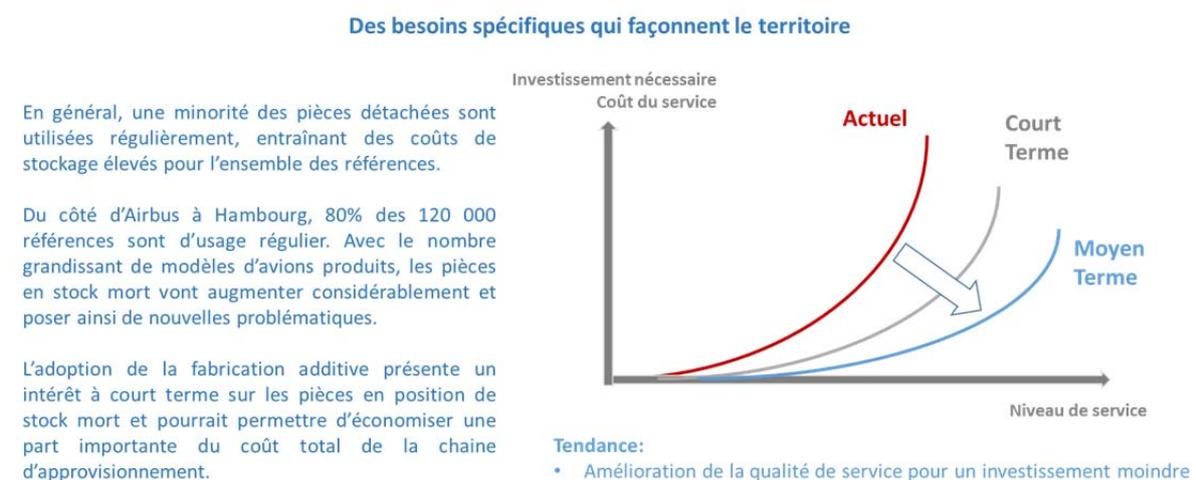


Figure 54 : Cas d'application et bénéfices de l'intégration de la FA pour le stockage des pièces de réparation

¹⁸⁶ Donnée issue d'une consultation.

¹⁸⁷ Données issues des retours de consultation.

On observe déjà actuellement l'émergence de projets et d'initiatives allant dans ce sens. La première étape consiste en la mise en place d'une plateforme technologique, à l'image de Platinum 3D basée à Charleville, qui s'est créée à la demande de plusieurs industriels concernés par l'évolution des technologies de fabrication numérique. Une telle plateforme représente **un premier niveau d'investissement mutualisé et soutenu par les pouvoirs publics, pour la création d'un lieu dédié à la sensibilisation**, à la formation et à l'intégration des nouveaux concepts associés aux technologies de la fabrication numérique.

Il s'agit bien d'un premier niveau de matérialisation de futures vellités d'investissements mutualisés, qui pourront à terme déboucher sur des structures pilotes mixtes et hybrides partagées entre plusieurs industriels. Cette stratégie permet ainsi de faire face aux barrières économiques associées à l'acquisition de ces nouvelles technologies (très coûteuses), tout comme aux enjeux d'évolution des compétences et d'intégration des nouvelles méthodologies de travail.

De leur côté, les industriels vont devoir gérer la problématique à court terme de l'industrialisation de tels procédés, notamment afin d'adapter les outils informatiques nécessaires à la gestion et à l'intégration de ces nouveaux flux dans l'ensemble des procédés et méthodologies de suivi de production. Afin de transformer les essais et expérimentations en cours et à venir en véritables procédés industriels intégrés, ces aspects organisationnels représentent des investissements d'envergure, bien supérieurs aux investissements physiques associés à l'acquisition de machines de fabrication additive¹⁸⁸. En effet, il est nécessaire d'adapter les processus de gestion et de logistique associés à la bonne intégration de ces nouveaux procédés (vérification des stocks, gestion de commande, décision de lancer la production, préparation du transport).

Différents secteurs pourront bénéficier de ces avantages liés à la fabrication additive, notamment ceux concernés par des volumes limités et une faible production de pièces de rechange. Des solutions d'optimisation des stocks pourraient ainsi permettre aux entreprises de mieux rentabiliser leur chaîne d'approvisionnement, tout en intervenant sur l'offre et la demande à chaque étape du réseau.

Face à ces opportunités d'évolution et de mobilité des outils de production, plusieurs modèles de fonctionnement adaptés aux différents territoires devraient permettre de répondre à la demande.

- D'un côté, le **concept des *print factory***, investissements mutualisés entre différents industriels pour la mise en commun d'outils de production. Il s'agit là d'un scénario à moyen/long terme ;
- Dans un premier temps, il sera intéressant que puissent être mieux cartographiés, mieux référencés, et mieux caractérisés les différents outils de production et compétences présents chez les acteurs industriels français. En effet, les technologies de la fabrication numérique incitent aux **coopérations transverses entre les acteurs**. Ainsi, **avec une bonne identification des compétences et des moyens disponibles dans les différents territoires, des coopérations renforcées seront développées entre les acteurs, réduisant ainsi le coût d'accès à ces technologies**.

Il existe ainsi ici un arbitrage entre la gestion d'un réseau de fournisseurs et de partenaires pour l'accès à un assemblage de compétences décentralisées, et la gestion d'une plateforme mutualisée proposant les compétences et les outils permettant de répondre aux besoins industriels des territoires.

¹⁸⁸ Selon Seb Répare, il existe un facteur de coût de 2 à 3 entre l'investissement matériel des machines, et l'investissement nécessaire à l'adaptation des processus de gestion et logistique associés à la bonne intégration de ces nouveaux procédés.

Cartographie des dynamiques d'écosystèmes économiques français

Les technologies de fabrication additive sont à l'origine de l'émergence d'écosystèmes économiques nouveaux, fluides, optimisés et pouvant coexister à des échelles différentes. Il s'agit d'une mutation structurelle profonde, qui affecte également nos manières de consommer ou d'attribuer de la valeur aux choses.

Des modèles hybrides se dessinent ainsi, inspirés des initiatives collaboratives et communautaires autour du processus créatif. Pour certains économistes, se dessinerait là un des seuls *business model* viable pour le futur, apte à traverser les crises d'une société mondialisée.

De nombreux pôles de compétences pour l'émergence de différentes zones de spécialisation

La cartographie des pôles de compétitivité, *clusters* et plateformes technologiques présents sur l'ensemble du territoire national révèle des proximités géographiques¹⁸⁹ entre centres de compétences similaires.

Dans la région Grand Est, le pôle de compétitivité Materialia est impliqué à la fois dans l'émergence de la plateforme technologique Platinum 3D spécialisée dans les technologies de fabrication additive métallique à destination des industriels de la forge/fonderie ainsi que dans la plateforme Inori dédiée au développement rapide de produit par l'utilisation d'outils et outillages rapides intelligents pour les procédés de mise en forme des matériaux.

Ce premier pôle se positionne alors en parallèle de l'initiative Rafam, soutenue par la région Auvergne-Rhône-Alpes. Ce dernier est aujourd'hui constitué d'un réseau d'acteurs impliqué dans les technologies de fabrication additive métallique, avec de nombreux acteurs différents qui cherchent à faire émerger un institut régional autour de la fabrication additive métallique. Il est impératif d'identifier des synergies et des axes de coopération entre ces différentes initiatives afin de ne pas continuer à développer des structures en doublon sur le territoire.

Enfin, dans le sud de la France, les acteurs clés de la recherche se structurent autour de problématiques des donneurs d'ordre de l'aéronautique, qui permettent ainsi l'émergence de différentes plateformes technologiques à même de répondre à leur besoin. Les trois initiatives de plateformes technologiques actuelles pourraient également établir en interne des axes de collaboration afin de favoriser le développement de ces nouvelles technologies, par le biais d'un transfert de connaissance, de compétences et d'expérience au bénéfice d'un développement global de la filière.

Sur le reste du territoire, les autres plateformes ne semblent pas être impliquées dans un tel jeu de concurrence. Il est cependant aujourd'hui nécessaire de coordonner l'ensemble de ces acteurs à l'échelle du territoire national.

¹⁸⁹ Certains acteurs regrettent le manque de coopération et la redondance de certaines expertises entre les différentes plateformes spécialisées dans certaines technologies de fabrication additive.

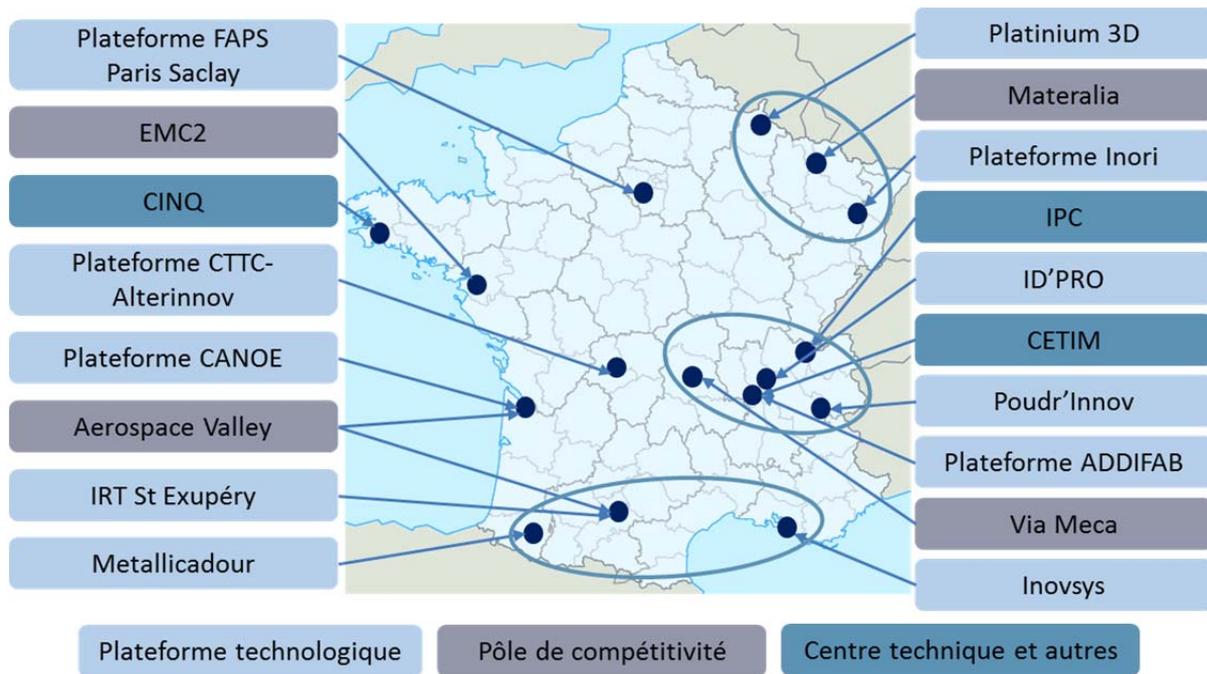


Figure 55 : Cartographie des pôles de compétitivité, *clusters* et plateformes technologiques

Analyse des dynamiques régionales d'intérêt

Au-delà de l'état des lieux, il est nécessaire de bien comprendre les différentes initiatives régionales, auxquelles il est reproché un manque de structuration et d'organisation à l'échelle nationale. **Il est également nécessaire de comprendre ce qui a conduit les différents pôles régionaux à se développer.** Les différents acteurs sur le territoire ont des rôles distincts au sein de la chaîne de valeur :

- Les écoles d'ingénieurs n'ont pas vocation à être des pôles d'expertise sur l'impression 3D mais à former les compétences de demain ;
- Les laboratoires spécialisés en interaction laser/poudre ou en développement de nouveaux matériaux ont un rôle à jouer même s'ils ne possèdent pas de machines d'impression 3D ;
- L'utilisateur final désire une pièce conforme à son cahier des charges, mais ce n'est pas lui qui va décider du procédé ou du matériau à court terme. La démarche de cocréation permettra un gain de maturité progressif chez les utilisateurs.

En l'absence de stratégie nationale claire et affirmée, on observe actuellement l'émergence de nombreuses initiatives régionales et territoriales d'intérêt. À terme, ces différentes initiatives devront être coordonnées et soutenues par des programmes plus ambitieux. En première analyse, nous présentons ci-dessous les principales initiatives d'intérêt observées sur le territoire national. Par ailleurs, ces initiatives ne semblent pas toujours soutenues par des stratégies de recherche innovation pour une spécialisation intelligente (SRI S3)¹⁹⁰.

Un club impression 3D dans le Nord-Pas de Calais

En 2014, les acteurs industriels de la région furent interloqués par les technologies de fabrication additive dans le cadre d'un atelier de présentation et de sensibilisation organisée par Dominique

¹⁹⁰ Voir notamment

Tableau 13 : Synthèse des principales initiatives territoriales autour de la fabrication additive.

Boudin, manager du pôle Digital à la CCI du Grand Lille. Le Club Impression 3D est né à la suite de cet événement, sans aucun soutien politique, à la demande des entreprises. Le Club a ainsi été lancé en juin 2014, et comptait à cette époque plus de 100 membres (un tiers d'entreprises, un tiers de prestataires de services, et un tiers d'acteurs de la formation ou de la structuration de filières professionnelles). Le Club a très vite pris de l'ampleur, tout en conservant son indépendance de toute forme de soutien public. Il compte aujourd'hui plus de 400 membres.

Sa vocation première a pu être conservée au travers d'un club gratuit et ouvert à tous, capable d'accueillir un maximum d'adhérents pour construire un écosystème aussi solide que possible. Il s'agit là d'une véritable volonté stratégique de la gouvernance du Club, assurée par madame Boudin.

Aujourd'hui, le Club permet d'assurer une interconnexion au sein d'un écosystème émergent dont les acteurs et les différentes parties prenantes restent mal identifiés. L'objectif principal de l'initiative tourne ainsi autour de trois mots-clés : échange, rencontre et mise en relation. L'objectif est toujours de porter une information de haut niveau, par l'organisation d'intervention d'entreprises, de conférences et d'ateliers. La Chambre de commerce et d'industrie du Grand Lille prend à son compte les frais associés à ces événements, en partenariat avec certains organismes de formation ou industriels impliqués.

Le Club souhaite ainsi démontrer sa capacité à créer et dynamiser un écosystème basé sur l'envie et la passion de faire, et d'entraîner une démarche positive autour des nouvelles technologies de la fabrication numérique. Il s'agit ainsi d'une forme d'intelligence collective, sous un modèle collaboratif et coopératif.

De cette façon, le Club Impression 3D a construit une position centrale dans sa région et au-delà, reconnue par les principaux acteurs publics et privés.

Par l'intermédiaire du Club ont émergé des projets collaboratifs, des investissements mutualisés entre industriels, des programmes de formation soutenus par des organismes d'enseignement supérieur... **Le Club agit comme un catalyseur de la structuration organique de l'écosystème.**

Par ailleurs, la CCI du Grand Lille porte un projet de parc d'activité nouvelle génération aux couleurs de la 3^e révolution industrielle¹⁹¹, intégrant **une usine numérique partagée**, des espaces de *coworking* ainsi qu'un FabLab. Ce projet, avec pour ambition d'être complètement opérationnel à l'horizon 2025, prévoit l'implantation d'entreprises dès 2020. Il permettra de proposer un service de fabrication de pièce à la demande, quels que soient les matériaux ou les procédés. Ce projet s'insère bien dans la temporalité de développement des technologies de la fabrication numérique, qui ne sont pas assez matures actuellement pour pouvoir envisager un tel système de production décentralisé. Les verrous technologiques devraient être levés progressivement à l'horizon 2020.

En Auvergne-Rhône-Alpes, structuration autour du groupement Rafam (Rhône-Alpes Fabrication Additive Métallique)

Le Rafam est un groupement d'acteurs qui cherche à couvrir toute la chaîne de valeur des technologies de fabrication additive métallique, de la poudre au parachèvement. Ce groupement rassemble aussi bien des plateformes technologiques, des pôles de compétitivité, des acteurs de la formation et de la recherche que des industriels. L'objectif est de promouvoir la mutualisation d'équipements, l'émergence de projets de recherche communs, soutenu par l'ANR par exemple, et la création de cotutelle de thèse et de laboratoires communs. L'axe principal de ce groupement reste ainsi centré autour de l'enseignement et de la recherche.

En plus d'une volonté forte de mutualisation des dépenses relatives aux équipements, il s'agit bien de mettre en place des actions de formation du BTS à l'école d'ingénieur, pour toucher aussi bien les bureaux d'études que les techniciens intervenant pour le compte de PME ou de grands groupes.

¹⁹¹ Lil'Aéroparc : 1^{er} parc d'activités génération Rev3 <http://www.clubimpression3d.fr/lilaeroparc-1er-parc-dactivites-generation-rev3/>

Malgré l'absence de grands comptes ou donneurs d'ordre leader derrière cette initiative, les actions menées sont au bénéfice direct du tissu industriel régional, étendu et composé d'un grand nombre de PME. L'absence d'industriel leader limite la visibilité nationale du groupement, malgré une demande très forte de la part des acteurs locaux. Après le rapprochement entre les ex-régions Rhône-Alpes et Auvergne, Michelin a rejoint l'initiative dans le cadre de son positionnement stratégique sur la fabrication de machine, notamment au travers de son *joint-venture* avec le groupe Fives. Ainsi, la démarche se structure progressivement via l'action d'industriels comme Michelin ou Aubert & Duval également.

Dans le sud de la France, une forte proximité avec l'aéronautique

Depuis 2013/2014, la DIRECCTE Midi-Pyrénées porte une attention particulière aux technologies de fabrication additive avec une volonté certaine d'en comprendre l'impact sur la chaîne de production dans le secteur de l'aéronautique. Des initiatives ont ainsi été prises avec le pôle Aerospace Valley, l'IRT Saint-Exupéry et le Conseil régional.

En complément des différents projets de R & D qui ont pu être financés dans le cadre d'appels à projet dédiés, la DIRECCTE a lancé un appel à étude de faisabilité afin de soutenir l'émergence de projets futurs. En collaboration avec le pôle Aerospace Valley, une feuille de route sur les technologies de fabrication additive a également été réalisée. Au niveau de l'IRT Saint-Exupéry, un projet de plateforme technologique dédiée à la fabrication additive est en train d'émerger. Le budget estimé du projet est d'environ 10 M€, et devrait impliquer un financement de l'ANR, avec une participation de la région LRMP.

En région PACA, le projet Team Henri Fabre cherche à améliorer la compétitivité du tissu industriel *via* l'innovation en mécanique et procédé. Il est porté par une association qui cherche à établir une feuille de route technologique, et à organiser des groupes de travail techniques avec des donneurs d'ordres et des PME. L'association est à la main de grands comptes et donneurs d'ordre comme Airbus Helicopter et EDF, qui cherchent à consolider le directorat de l'association avec d'autres acteurs d'importance. **L'association apporte ainsi une dimension transversale, avec une volonté d'attractivité autour d'équipements technologiques de pointes à destination de donneurs d'ordres multifilières.**

Le projet a participé à l'émergence de la plateforme technologique Inovsys, lauréat d'un plan d'investissement d'avenir sur les plates-formes mutualisées d'innovation, qui cherche à faire du transfert technologique sur l'axe mécanique matériaux. L'objectif de la plateforme est d'inciter les projets mutualisés au sein de l'écosystème. Derrière cette plateforme se trouve avant tout une vraie volonté publique-privée d'organisation territoriale. Il s'agit ainsi d'un projet structurant autour de la création de la métropole Aix-Marseille, qui a permis de fédérer deux agglomérations autour d'enjeux politico-culturels futurs communs.

Le futur techno-centre a pour vocation d'approfondir la recherche scientifique, de faire du transfert de technologie, mais surtout d'aider les industriels à s'équiper en propre. Il n'a pas vocation à devenir une plateforme de production industrielle. Il s'agit plutôt de faire monter en maturité les technologies clés avec des PME, des laboratoires, et des grands comptes afin de faire émerger des projets.

En région Aquitaine, le projet de pôle de compétences mutualisées Metallcadour, dédié aux technologies de pointe dans le domaine de la transformation des métaux porté par les grands donneurs d'ordre aéronautiques locaux (Daher-Socata, Turbomeca et Messier-Bugatti-Dowty du groupe Safran) a été lancé en 2014. Un bâtiment verra le jour sur le site de Bordes avec trois plateaux techniques : usinage des métaux durs, robotisation, fabrication additive et assemblage. Une quinzaine de personnes travailleront au sein de ce projet, dont la livraison est prévue mi-2016. Ce centre s'adresse notamment aux PME de l'aéronautique et bénéficie du soutien de l'UIMM et des collectivités, en complément de celui des grands donneurs d'ordre aéronautiques locaux. Il sera bâti autour de trois thématiques principales que sont l'usinage des métaux, la

robotisation et les techniques d'assemblage. Pour un coût de 1,45 million d'euros, sa livraison est prévue à l'automne 2016.

Par ailleurs, il convient de citer également la plateforme en activité Addimadour, portée par l'Estia et basée à Bayonne, elle est orientée fabrication additive métallique de pièces de grande taille avec notamment la technologie DED de BeAM et deux robots. Le premier est équipé d'une tête CMT de Fronius et l'autre d'un effecteur en cours de développement pour faire du laser/fil (projet FUI Addimafil).

Émergence d'un pôle pour la métallurgie en région Alsace-Champagne-Ardenne-Lorraine

Dans le domaine de la métallurgie, une initiative d'intérêt a été signalée en Champagne-Ardenne avec la création d'une plateforme dédiée à la fabrication additive au cours de l'année 2015. Dans une démarche collaborative et de mutualisation de moyens en vue d'acquérir les compétences et le savoir-faire associé à la mise en œuvre des techniques de fabrication additive, l'ancienne région Champagne-Ardenne a appuyé l'émergence d'une plateforme technologique rassemblant de nombreux partenaires. Cette dernière a pour objectif d'imprégner le tissu industriel de ces nouvelles technologies de la fabrication numérique en s'appuyant sur les trois piliers fondamentaux que sont la formation, la R & D ainsi que l'appropriation de la technologie par les industriels.

Focus sur Platinum 3D, plateforme technologique pour l'industrie métallurgique en Champagne Ardenne :

L'initiative est née du pôle de compétitivité Materialia en 2013, face au constat d'un intérêt des industriels sur un champ d'innovation technologique à fort potentiel. Dans la continuité, le cluster FabAdd a été mis en place afin de sensibiliser les acteurs et d'organiser des actions de veille coordonnées au sein des partenaires de ce *cluster*. Le *cluster* a finalement été absorbé par la plateforme Platinum 3D, qui a été lancée en mars 2015. Elle est entièrement dédiée aux technologies de fabrication additive appliquées à l'industrie métallurgique. Installée au cœur du principal territoire de forges et de fonderies de France, l'initiative vise à préserver le tissu industriel local en accompagnant les entreprises des secteurs de la métallurgie et de la fonderie dans l'acquisition et la maîtrise des technologies de fabrication additive.

En complément des moyens d'expérimentation de niveau industriel (3 millions d'euros investis), la plateforme proposera à terme des compétences scientifiques et des parcours de formation adaptés aux différents acteurs de la filière.

La plateforme offre actuellement la possibilité de comparer l'efficacité ou le coût de fabrication selon différentes méthodes. Elle cherche ainsi à permettre aux industriels de concevoir des prototypes dans une démarche de formation à la maintenance et à la manipulation des technologies de fabrication additive. L'écosystème local se développe autour de cette initiative, à l'image de la filière d'ingénieur spécialisée en fabrication additive qui verra le jour en septembre 2016 au sein de l'université de Reims Champagne-Ardenne.

La plateforme cherche à mettre le pied à l'étrier aux acteurs de la filière, à les former et à leur montrer les possibilités et les limites de ces nouvelles technologies. Ce type d'initiative développe ainsi les vellétés à l'investissement des industriels, qui actuellement tendent vers de premières expérimentations industrielles mutualisées. La plateforme joue ainsi un rôle d'évangélisation pour inciter les industriels à s'équiper.

L'axe de la formation est également développé à partir des infrastructures existantes, afin de faire évoluer les compétences des ressources humaines actuelles en fonction du besoin des industriels.

Par ailleurs, il est important de mentionner la plateforme VirtuReal dédiée à la stratoconception, portée notamment par le Cirtes SRC (centre français du développement rapide de produit en Europe). Cette plateforme regroupe également le GIP-InSIC et la PFI INORI SAS sur un espace de près de 8 000 m². Ces acteurs offrent au travers de la plateforme des activités complémentaires de formation, de recherche, de R & D, de transfert de technologie, de valorisation, de diffusion et d'aide au passage de la R & D à l'industrialisation.

Un intérêt industriel modéré en Île-de-France pour les technologies de fabrication additive

En Île-de-France, les initiatives sont locales et ponctuelles, à l'image des autres régions du territoire national. Plusieurs FabLabs voient progressivement le jour. Une étude réalisée par la DIRECCTE Île-de-France met en avant le peu d'intérêt des entreprises pour les technologies de fabrication additive, qui n'y voient aucune concurrence directe pour leur activité compte tenu des hautes cadences de production. Les rares acteurs intéressés mettent en avant le besoin d'un élan plus fort des donneurs d'ordres et des pouvoirs publics pour adopter progressivement la technologie.

Par ailleurs, l'Alliance pour l'industrie du futur, qui souhaite aider à doter les entreprises industrielles de l'offre française la plus pointue sur les sujets de la digitalisation de la chaîne de valeur, de l'automatisation, du *monitoring* et contrôle, des nouveaux matériaux, de la fabrication additive et de l'efficacité énergétique, travaille à l'élaboration d'une feuille de route nationale sur. L'Alliance poursuit par ailleurs son déploiement régional où à ce jour, près de 1 200 PME et PMI sont engagées dans le processus de diagnostic ou d'investissement afin d'accélérer leur transformation et leur modernisation¹⁹². L'Alliance accompagne ainsi douze projets et plateformes dont cinq ont déjà obtenu un parrainage direct de l'Alliance pour candidater à l'Appel à projets Piave des Investissements d'avenir, cette dynamique implique notamment la mise en place d'un centre dédié à la fabrication additive sur la zone de Paris-Saclay : Fabrication Additive Paris Saclay. Cette plateforme affiche enfin une vraie volonté de se coordonner avec des initiatives régionales comme Rafam et les différents IRT.

En Normandie, un engouement progressif du grand public

La Normandie n'est pas en reste sur les questions de fabrication additive, malgré un manque de coordination globale des acteurs et parties prenantes de la thématique. En effet, il existe différentes initiatives d'intérêt, à l'image du FabLab Inmédiat (hébergé par la Maison de la recherche et de l'imagination à Caen regroupant 400 usagers dont un tiers issu du monde professionnel), et de l'Institut de plasturgie d'Alençon (qui utilise des outils de prototypage rapide *via* la fabrication additive).

Le tissu industriel normand semble être actuellement en veille technologique sur le sujet, avec une prise de conscience sur l'avenir prometteur de ces technologies en termes de conception et de fabrication de produits finis en petites ou moyennes séries. Les secteurs les plus intéressés sont celui de la plasturgie, de la mécanique et de la métallurgie, notamment utilisés dans les filières de l'automobile et de l'aéronautique.

Le sujet connaît ainsi un engouement réel dans la région, avec l'émergence d'initiatives notables, en provenance du monde académique, de l'industrie, ou du monde associatif. Reste à fédérer les acteurs impliqués ou intéressés par l'impression 3D afin de favoriser un maillage territorial de production local autour de l'impression 3D et ainsi mutualiser les investissements en la matière.

En Bretagne, un écosystème en structuration

En dehors des initiatives privées d'acquisition de certaines technologies, la dynamique de la région est avant tout portée par le projet CINQ situé à Quimper, intégrant les problématiques de la fabrication additive au sein d'un panel de nouvelles technologies d'intérêt pour les industriels de l'ouest de la Bretagne. Ce centre interentreprises du numérique vise à mettre en place des ressources partagées afin d'accélérer le déploiement de technologies numériques au profit des entreprises de Bretagne. Il consiste ainsi en un rassemblement, sur le même lieu, de ressources humaines, logicielles et matérielles afin de permettre à chaque entreprise de facilement s'initier, se former et être accompagné dans l'utilisation des technologies numériques de pointe. Le projet se structure actuellement avec une demande de cofinancement en cours au programme national Piave.

¹⁹² <http://gfi.asso.fr/lalliance-industrie-du-futur-livre-ses-premiers-resultats-operationnels/>

En dehors des initiatives publiques et privées, il est important de mentionner le projet de Nicolas Huchet, autour de la création de sa propre prothèse de main bionique fabriqué au FabLab de Rennes, et qui souhaite aujourd'hui s'investir dans la création d'un HandiLab, afin de développer différents prototypes *Open Source* sur le modèle des FabLabs. Son projet, porté par son association My Human Kit, vise à développer des prototypes comme celui d'un fauteuil roulant, d'une prothèse auditive, d'un outil pour ressentir les sons ou d'un gant spécifique pour guider les personnes malvoyantes.

Le Limousin, une zone d'intérêt pour les céramiques

Limoges est le siège du CTTC, le Centre de transfert de technologies céramiques. Par ailleurs membre d'un projet FUI œuvrant dans le champ de l'impression 3D, le CTTC est un précurseur de la fabrication additive appliquée aux céramiques, avec des premiers travaux commencés sur le sujet dès 1998.

Avec sa plateforme CTTC-Alterinov, le Limousin porte haut les couleurs de la céramique via une plateforme regroupant sept technologies différentes appliquées aux céramiques, dont certaines uniques en Europe. Le CTTC collabore ainsi à plusieurs consortiums de recherche publique/privée dans le domaine, avec une approche remarquable sur des technologies multimatériaux pour développer des outils de fabrication additive céramique/métal. Le CTTC est également à l'origine de l'ouverture du FabLab *EasyCeram* dédié aux céramistes professionnels et particuliers.

Conclusion

Pour diffuser les technologies de fabrication additive, un plan national, clairement identifié serait sans aucun doute un signal fort vers les industriels, PME et ETI en particulier, et les académiques.

La coordination entre régions reste mauvaise à l'heure actuelle. Chaque initiative cherche à défendre son positionnement et son leadership régional sur une thématique, source d'une forte concurrence entre les régions. L'Alliance pour l'Industrie du Futur cherche à structurer une feuille de route nationale autour d'une position centrale, la plateforme FAPS Fabrication Additive Paris Saclay, avec pour objectif la création d'un institut multisite interrégional permettant des demandes d'investissement mutualisées et rationalisées... Il est nécessaire de se structurer autour des expertises régionales actuelles et en émergence. Et pour cela, il faut être capable d'identifier, de localiser et d'offrir une réelle visibilité aux différents pôles de compétences présents à travers les régions. La plateforme FAPS a la volonté de se coordonner avec des initiatives régionales telles que la communauté Rafam du Pôle de compétitivité ViaMéca, l'IRT Jules Verne, l'IRT M2P ou l'IRT Saint-Exupéry.

Il semble ainsi important que le développement de la filière soit porté par un projet global autour de l'industrie du futur en levant les craintes des acteurs positionnés sur le domaine quant à la mise en place tardive de normes et de législations, qui pourraient remettre en cause les travaux effectués jusqu'à présent.

Par ailleurs, les différentes initiatives régionales qui ont pu être identifiées ne sont elles-mêmes bien souvent pas soutenues par une stratégie de recherche innovation pour une spécialisation intelligente adaptée :

- Nord Pas de Calais : pas de mention spécifique associée à la fabrication additive ;
- Auvergne-Rhône-Alpes : pas de mention spécifique associée à la fabrication additive ;
- Midi-Pyrénées : pas de mention spécifique associée à la fabrication additive ;
- PACA : pas de mention spécifique associée à la fabrication additive ;
- Aquitaine : pas de mention spécifique associée à la fabrication additive ;
- **Champagne-Ardenne : Intégration de la problématique au sein du domaine d'innovation stratégique « Matériaux » :**
 - o Pour optimiser les performances, la mise en œuvre et l'utilisation des matériaux ;
- Île-de-France : pas de mention spécifique associée à la fabrication additive ;
- Normandie : pas de mention spécifique associée à la fabrication additive ;
- **Bretagne : Intégration au sein des Technologies pour la société numérique :**
 - o Domaine 4 : Modélisation et simulation numérique ;
- Limousin : pas de mention spécifique associée à la fabrication additive.

Il est ainsi surprenant de constater que l'ensemble de ces projets structurant pour la filière de la fabrication additive ne s'inscrivent pas explicitement dans les stratégies « recherche innovation » des régions concernées.

Principaux écosystèmes territoriaux	Type d'initiative	Objectifs	Moyens	Public cible
Club Impression 3D (Nord-Pas de Calais)	Porté par les CCI Nord de France	<ul style="list-style-type: none"> – Informer et accompagner les entreprises pour leur permettre de prendre ce nouveau virage technologique – Fédérer les entreprises en y associant les acteurs du secteur et les initiatives régionales – Promouvoir l'écosystème régional de l'impression 3D et développer les partenariats en région et hors région 	<p>Des conférences, ateliers, visites de sites en France et en Belgique...</p> <p>Un site web recensant les actualités et événements sur l'impression 3D à l'échelle régionale, nationale voire internationale</p> <p>Des journées de formation</p> <p>Un annuaire des compétences à l'échelle régionale</p>	<p>Public : entreprises industrielles et de services utilisatrices, écoles, centres techniques, FabLabs, designers, pôles d'excellence, experts...</p> <p>Coût : la participation est gratuite (sauf participation éventuelle aux frais de déplacements, visites, journées de formation...)</p>
Rafam (Auvergne-Rhône-Alpes)	Groupement public/privé	Structuration de l'offre universitaire et centre technique au service des problématiques des industriels	<p>Approche globale de la problématique</p> <p>Accompagnement sur-mesure des industriels à l'intégration de la technologie et de ses spécificités</p> <p>Anticiper des besoins recherche de fond</p>	Les entreprises industrielles
Inovsys (PACA)	Plateforme mutualisée d'innovation	<p>Transfert technologique sur l'axe mécanique matériaux</p> <p>Inciter les projets mutualisés au sein de l'écosystème</p> <p>Volonté publique-privée d'organisation territoriale</p>	<p>Animation d'un réseau d'acteurs</p> <p>Accès à moindre coût à des équipements et compétences de pointe</p> <p>Réalisation de projets technologiques complexes</p>	Organismes de recherche et formation, centres de ressources technologiques, pôles de compétitivité, pôles régionaux d'innovation et développement économique solidaire
Platinum 3D (Champagne-Ardenne)	Plateforme technologique	Préserver le tissu industriel local en accompagnant les entreprises des secteurs de la métallurgie et de la fonderie dans l'acquisition et la maîtrise des technologies de fabrication additive	Conception de prototypes dans une démarche de formation à la maintenance et à la manipulation des technologies de fabrication additive	Les entreprises industrielles

CTTC- Alterinov (Limousin)	Plateforme technologique	Développer des outils de fabrication additive céramique/métal	Regroupement de sept technologies différentes appliquées aux céramiques, dont certaines uniques en Europe	Consortiums de recherche publique/privée
----------------------------------	-----------------------------	------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------

Tableau 13 : Synthèse des principales initiatives territoriales autour de la fabrication additive

Identification des dynamiques d'écosystèmes favorables au développement de la fabrication additive

Dans les champs de l'éducation et de la culture, les écoles et bibliothèques s'emparent progressivement du sujet de la fabrication additive. Les politiques publiques se sont aussi penchées sur les possibilités offertes par l'impression 3D, notamment pour remédier à l'absence de vocations scientifiques chez les jeunes, qui délaissent de plus en plus la technologie, l'ingénierie et les mathématiques. Cet intérêt touche aussi les questions de relocalisation de la production et les logiques de développement durable. **En tant que technologie encore en développement, l'impression 3D contribue à alimenter une forme de spéculation collective sur de futurs scénarios.**

Malgré ces promesses scintillantes d'un monde à venir dans lequel tous nos objets quotidiens pourraient être imprimés selon nos désirs les plus originaux, l'impression 3D n'a pas encore conquis les foyers. Dans les visions prospectives qui entourent son développement, les possibilités offertes par l'impression 3D oscillent entre l'ambition d'une production à la demande mesurée, économique, locale, écologique et sans déchet, et une vision néoconsumentiste qui encourage la production individuelle.

Selon le physicien et informaticien Neil Gershenfeld, l'impression 3D ne remplacera jamais totalement les technologies de fabrication classique qui existent depuis longtemps. **Néanmoins, la fabrication à la demande et la personnalisation d'objets pourraient représenter une aubaine commerciale, encourager le développement d'économies nouvelles et devenir un argument compétitif pour de nombreuses sociétés.** Fort est à parier que nous assisterons à une prolifération décentralisée d'ateliers de fabrication et de petites cellules de microproduction¹⁹³, chacun répondant à des demandes spécifiques. En plus des répercussions profondes que ces technologies pourraient avoir sur l'industrie, leur développement est souvent décrit comme étant capable de libérer une certaine créativité populaire, en suivant le chemin tracé par la diffusion des ordinateurs personnels et d'Internet.

L'émergence d'une économie territorialisée

Les FabLabs d'aujourd'hui se développent à partir des communautés qui les composent et des personnalités à l'origine de ces initiatives. **Il s'agit avant tout d'initiatives collaboratives, et la croissance du mouvement est elle-même poussée par un souffle collaboratif, qui touche peu à peu le monde de l'entreprise.** Ces structures se créent avec une forte prise en compte de leur contexte local. **Cela leur confère une force structurelle d'importance : ils apportent une réponse à des enjeux du territoire, en lien avec les usages et les besoins d'une clientèle locale.**

¹⁹³ Sous condition que l'ensemble des facteurs de développement technologiques puisse être levé.

Ces espaces participent à la formation et à l'évolution des compétences et des savoir-faire. Ils s'inscrivent en cela dans une démarche d'utilité publique, relativement à la sensibilisation, à la formation, et à la structuration d'un écosystème en émergence.

Les FabLabs contribuent ainsi à l'essor et à la démocratisation de ces nouvelles technologies associées à la fabrication numérique. **Ces tiers-lieux doivent permettre d'accompagner l'évolution des méthodologies de conception et des compétences.**

Par ailleurs, ces tiers-lieux se doivent d'intégrer progressivement les trois fonctions de l'innovation décrite par Raphaël Besson : l'innovation sociale, l'innovation spatiale, et l'innovation productive. **L'articulation entre ces trois fonctions devient fondamentale dans l'organisation des écosystèmes territorialisés autour de l'innovation et des technologies d'avenir.** On observe de fait de plus en plus de FabLabs évoluant sur une dimension de *Living Lab*, sans pour autant que ces pratiques soient outillées convenablement. **Cela impacte également l'évolution du modèle économique de ces tiers-lieux, qui peut s'inscrire dans une volonté de convergence avec les autres initiatives territoriales d'intérêt.**

Focus sur le Lorraine Fab Living Lab :

Le Lorraine Fab Living Lab constitue un laboratoire d'évaluation prospective des usages au service de l'innovation. Il regroupe différents dispositifs d'accélération de la création et de l'innovation collaborative pour les usages de demain. Cet espace a vocation à offrir un cadre de cocréation et de prototypage pour des produits et services imaginés par les citoyens et les entreprises dans un désir de participer à l'amélioration des territoires créatifs de demain.

Pour innover, il faut remettre dès le début du processus les utilisateurs potentiels pour cocréer et concevoir avec eux les projets d'innovation. Ce constat est le point de départ de l'initiative de l'Université de Lorraine autour de ce projet de *Fab Living Lab*.

Un premier positionnement au niveau du réseau européen des Living Lab a offert au projet une labellisation en 2010 autour du Lorraine Smart Cities Living Lab. En parallèle, le concept des FabLab émergeait progressivement en provenance du MIT.

La proximité d'approche entre les deux concepts a rapidement poussé l'université de Lorraine à coordonner une action croisée – entre FabLab et *Living Lab* – afin d'aider à concevoir et cocréer ensemble des produits et services, avec les entreprises et leurs clients/utilisateurs – avec les territoires et les citoyens.

La dimension de *Living Lab* reste assez peu compréhensible au niveau du grand public, tandis que les territoires et les industries utilisent cet espace afin de manager le processus créatif auprès de panels d'utilisateurs et de citoyens. À l'inverse, la dimension de FabLab est plus adaptée au grand public, avec la possibilité de prototyper et de découvrir des produits et procédés de fabrication innovants dans l'objectif de matérialiser des idées nouvelles.

Ainsi, l'intégration mutuelle des deux concepts a permis de rassembler dans un même lieu physique ces tiers-lieux d'animation de l'écosystème local autour des problématiques d'innovation territoriale. Cela permet ainsi de recréer le continuum de la phase de génération de l'idée, jusqu'à son évaluation par l'usage, en touchant au mieux tous les publics, de l'industrie à la collectivité, en passant par le grand public.

Un troisième tiers-lieu est associé à l'initiative, sans pour autant avoir la possibilité de partager des locaux communs. Il s'agit d'un espace de *coworking*, le *Paddock*, avec qui le Lorraine Fab Living Lab développe des projets et des synergies autour de leurs ambitions communes. L'initiative ne s'arrête pas là, puisque l'agence de développement de Nancy est installée sur le même lieu, et que d'autres projets sont à l'étude, notamment en lien avec le label *French Tech*.

Pour sa 6^e année de fonctionnement, le Lorraine Fab Living Lab est en évolution forte, avec une augmentation d'activité qui invite à de nouveaux recrutements, et à de nouvelles perspectives que ce soit dans le cadre de projets industriels ou d'initiative de la collectivité.

Évolution des modèles économiques

La plupart des initiatives sont aujourd'hui dépendantes des fonds publics. En effet, les investissements initiaux sont bien souvent élevés, et le parc de machines nécessite un entretien et une maintenance coûteuse. Cependant, le retour sur investissement de chaque initiative, prise de manière indépendante, ne peut pas être évalué uniquement d'un point de vue comptable. Il faut avant tout mettre en avant les réussites pédagogiques, l'émergence des projets de recherche collaboratifs, et la structuration de l'écosystème de cette filière naissante. La plupart des actions menées aujourd'hui sont d'utilité publique (et certaines sont reconnues en tant que telles), et sont essentielles au développement de l'écosystème national.

Et on ne retrouve pas dans tous ces lieux une réelle volonté de s'émanciper des pouvoirs publics, ce qui exigerait de se faire financer par des partenaires privés, et changerait alors la philosophie des lieux concernés. **À l'heure actuelle, chaque FabLab fonctionne sur un modèle spécifique, et il existe *a priori* autant de FabLab différents qu'il y a de Fab Managers différents pour structurer ces projets.**

De nombreux FabLabs ont émergé à travers le territoire, grâce notamment au PIA (programme d'investissements d'avenir) sur les espaces de prototypage numérique. Il existe par ailleurs différentes typologies de FabLabs :

- Les FabLabs grand public, avec un objectif de sensibilisation, de formation et d'accompagnement à la démocratisation des technologies de fabrication numérique ;
- Les FabLabs professionnels, avec un objectif de proposition d'accès à un parc d'outils professionnels pour la création, le prototypage, la fabrication et l'entrepreneuriat ;
- Les FabLabs d'entreprise, avec un objectif d'intégration et de diffusion de la culture et des outils de la fabrication numérique en entreprise.

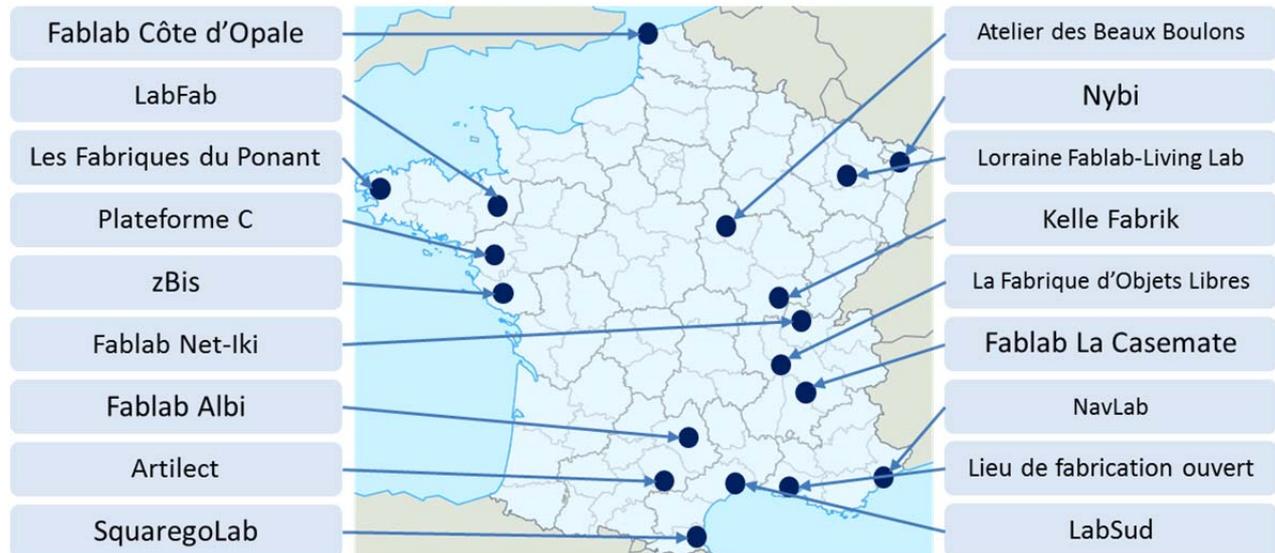


Figure 56 : Les FabLabs grand public (hors Île-de-France)

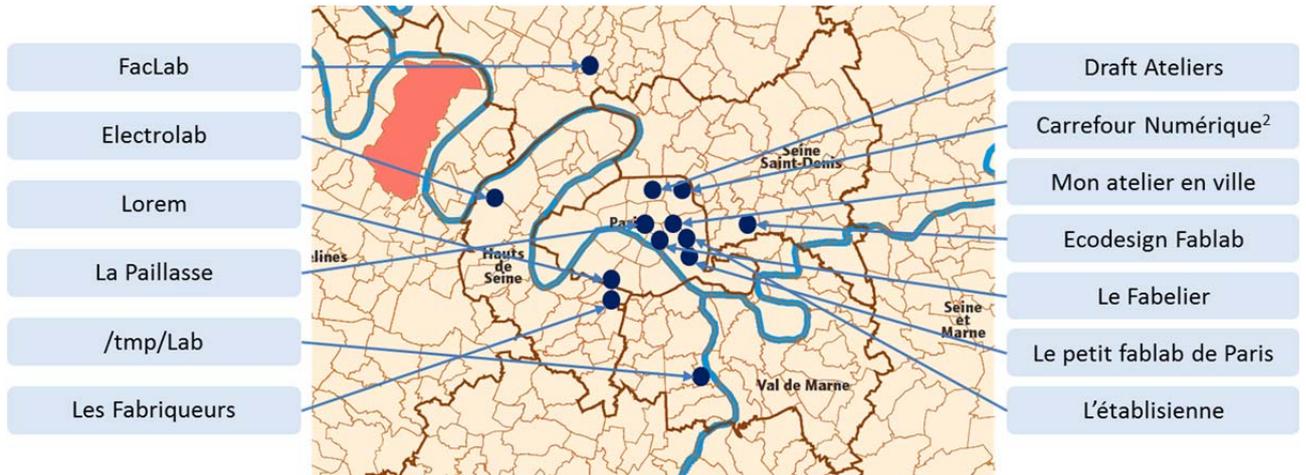
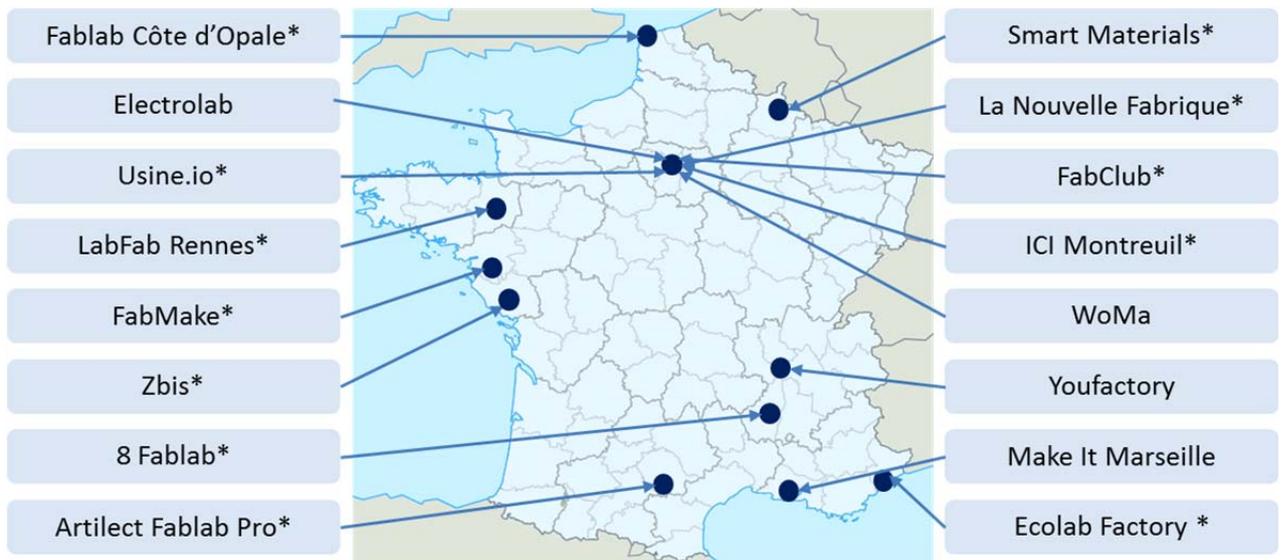


Figure 57 : Les FabLabs grand public (en Île-de-France)



* : lauréat de l'appel à projets aide au développement des ateliers de fabrication numérique (fablabs) – DGCIS

Figure 58 : Les FabLabs professionnels

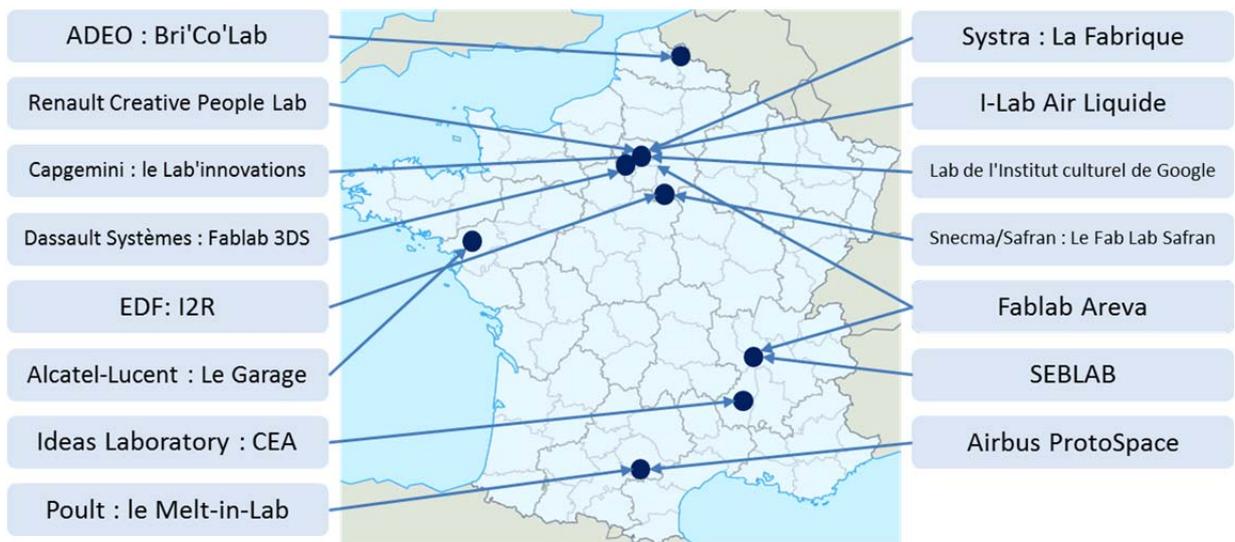


Figure 59 : Les FabLabs d'entreprise

On observe ainsi dans l'écosystème différentes typologies de FabLabs. Le modèle économique de certains FabLabs est plus pérenne que d'autres, notamment pour ceux qui se sont ainsi très tôt tournés vers une dimension industrielle¹⁹⁴, au plus proche des entreprises. Ces structures disposent ainsi d'une plus grande indépendance financière, à partir de différentes typologies d'offres permettant la création d'un modèle économique stable (à l'exemple de 8FabLab, d'Ici Montreuil, ou de l'Usine IO). Ces initiatives prennent la direction d'une forme innovante de bureau d'études, avec un modèle économique tourné vers l'industrie, en complémentarité de l'action des pôles de compétitivité et clusters. On retrouve également ce modèle au niveau de TechShop, initiative portée en France par Leroy Merlin.

Focus sur deux modèles de FabLabs tournés vers l'industrie : 8FabLab et l'Usine IO

8FabLab est une société coopérative d'intérêt collectif, regroupant 65 sociétaires (dont des entreprises, des associations, des collectivités locales, et des particuliers). L'initiative a débuté en février 2014 dans la vallée de la Drôme avec 80 % d'aides publiques, et prévoit d'inverser la tendance à un horizon cinq ans, avec 80 % d'autonomie financière permise par un modèle économique impliquant différentes typologies de prestations.

Le positionnement en milieu rural du FabLab ne lui permettra pas à terme d'être totalement indépendant, et ses missions d'intérêt général et de service public justifient d'un soutien continu (au travers de temps d'entrée libre, de démonstrations, de visites, d'ateliers et d'accueil en milieu scolaire).

Le FabLab s'est par ailleurs orienté vers une offre professionnelle, avec des services et de l'accompagnement aux entreprises qui cherchent à mieux appréhender les opportunités associées aux nouvelles technologies de la fabrication numérique. Cela implique notamment du tourisme d'affaire, de l'expertise en fabrication numérique et prototypage rapide, des séminaires d'innovations et de créativité, ainsi que de l'accompagnement aux activités de recherche et développement.

Par ailleurs, 8FabLab est impliqué assez fortement sur des dimensions de formation au niveau des entreprises, et du grand public. Le tiers-lieu est ainsi à la croisée de la demande de formation des acteurs industriels et des actifs et non actifs dans le désir de monter en compétences sur ces nouvelles technologies. Ne manque plus qu'une reconnaissance officielle en tant qu'organisme de formation qui permettrait de labelliser la démarche, et de justifier d'une reconnaissance sur les formations délivrées.

L'établissement s'implique également progressivement dans de la coproduction autour de projets collaboratifs d'innovation dans le domaine de la fabrication additive.

De son côté, l'Usine IO développe depuis octobre 2014 un modèle relativement différent, tourné vers les porteurs de projet et les entrepreneurs. Le service industriel proposé à Paris permet ainsi d'accompagner les porteurs de projets, sur une expertise et l'accès à un réseau, interne et externe. En plus de l'expertise en développement de produit sur des axes électroniques, mécaniques et industriels, le FabLab délivre un service de mise en réseau industriel, avec des sous-traitants, des consultants techniques, des designers et des ingénieurs, afin d'accompagner le développement des projets.

L'établissement a ainsi accompagné en 18 mois plus de 400 porteurs de projets impliqués dans 300 projets différents. Ces derniers sont portés pour moitié par des *start-up*, pour un quart par des indépendants, et pour le reste par des entreprises établies. La valeur ajoutée du lieu se trouve essentiellement sur le service à la conception, à l'industrialisation, et sur l'accès à un réseau industriel.

L'Usine IO est une société privée, lauréate de l'appel à projets sur les ateliers de fabrication numérique, qui s'est structurée par ailleurs via une levée de fonds privés impliquant des *business angels* et des fonds d'investissement. La structure cherche actuellement à se développer dans les écosystèmes existants, avec des rapprochements auprès des chambres de commerce, des incubateurs et des pépinières afin d'apporter une brique de services supplémentaires, avec une offre d'accès de services à distance notamment concernant la conception et l'industrialisation d'un produit. Le FabLab envisage également une activité de financement au travers d'un fonds d'investissement.

Sur les axes de formation, la structure se positionne sur un triptyque éducation-prototypage-réseau industriel, avec une reconnaissance en tant qu'établissement de formation grâce notamment au soutien de grandes entreprises.

¹⁹⁴ C'est notamment le cas pour ceux qui n'ont pas été créés dans le cadre des Investissements d'Avenir (IA), et qui ont donc été à la recherche d'un modèle économique rentable très rapidement.

En comparaison du FabLab industriel TechShop porté par Leroy Merlin ou d'Ici Montreuil, l'Usine IO ne cherche pas à faire de meilleurs utilisateurs des machines, mais à faire de meilleurs porteurs de projet. Ces autres structures sont davantage orientées vers une dimension d'artisanat de la fabrication numérique.

D'un autre côté, de nombreux FabLabs sont adossés à d'autres structures publiques (à l'image de la Case Mate, centre de culture scientifique technique et industrielle de Grenoble). Ainsi, ces derniers revendiquent davantage une action d'utilité publique, justifiant un réel soutien financier sur le fonctionnement de ces structures.

Cependant, avec la réduction des subventions dans le cadre des Investissements d'Avenir, le modèle économique de certains FabLabs est peu à peu mis en danger, alors même qu'ils répondent à un vrai besoin sociétal. Il est ainsi important de coordonner l'évolution des modèles économiques et des soutiens attribués à ces différents tiers-lieux en fonction de leur typologie et de leur philosophie propre. **Il n'est plus possible de gérer une politique globale sans distinguer la typologie et les spécificités de chacun, puisque les retombées territoriales de chacun sont bien différentes. Il est nécessaire de mieux les caractériser afin d'adapter et de faire évoluer les dispositifs de soutien.** Il peut être envisagé pour cela de formaliser différents modèles de fonctionnement des FabLabs auxquels pourraient se rattacher les différents organismes concernés.

Différents réseaux émergent à l'échelle nationale ou internationale, à l'image du RFFLabs (Réseau des FabLabs Français) qui cherche à rassembler ces structures sous un même organisme, afin de pouvoir communiquer ensemble et créer une forme d'entraide mutuelle au travers d'une plateforme de partage des ressources et d'organisation d'événement groupés. Il s'agit ici d'une initiative de structuration de l'écosystème afin de mieux positionner les FabLabs dans la vie économique française. Le projet a débuté en 2015 à l'occasion du FabLab Festival de Toulouse¹⁹⁵. Une soixantaine de FabLabs ont participé à la première assemblée générale de l'association en mai 2016. L'organisme projette notamment la création d'un livre blanc à l'intention des collectivités qui souhaitent se doter d'un FabLab.

Dans sa philosophie profonde, le FabLab se doit de rester un lieu ouvert, où il est possible d'accueillir entreprises, citoyens et étudiants, que ce soit dans un objectif de découverte, de sensibilisation, de formation, d'expérimentation ou d'implication dans des projets citoyens ou industriels. Aujourd'hui, le territoire est riche en initiatives d'intérêt, ayant chacune leur personnalité propre. **Cette diversité de typologie de FabLab est une véritable richesse du territoire, avec une capacité d'adaptation très forte de la part de ces tiers-lieux.** Il n'est en effet pas possible d'avoir l'intégralité des potentialités de ces tiers-lieux au sein d'un même espace. **Il est nécessaire de développer des modèles de complémentarités autour des territoires, en concertation avec les autres initiatives existantes.** L'innovation a pour ambition de générer de la typicité. Les FabLabs se colorent en fonction des pratiques qui s'y développent. Il est nécessaire de leur laisser un champ de liberté afin qu'ils intègrent, en fonction des problématiques territoriales locales, une plus-value à forte valeur ajoutée pour le territoire.

Il est cependant nécessaire d'y apporter une meilleure structuration et une meilleure coordination, afin d'assurer un maillage du territoire en lien avec les besoins du terrain, et d'assurer une bonne concertation entre les différentes initiatives à l'œuvre.

Lorsque cela est possible, l'attachement d'un FabLab avec une université ou une collectivité peut lui conférer une légitimité publique d'intérêt, avec un accès à des moyens dédiés. Cela permet de développer un modèle d'alliance mixte, entre le secteur public et privé, avec une implication forte du grand public.

¹⁹⁵ Coup d'envoi du RFFLabs au Fablab Festival de Toulouse, L'Usine Digitale, 06/05/2016.

Une prise de position grandissante sur les aspects de formation

Les FabLabs jouent un rôle central dans la formation. Ils essaient de structurer une offre de formation autour des nouvelles compétences impliquées dans les technologies de la fabrication numérique. **Ils possèdent la capacité de réaction en temps réel vis-à-vis de ces nouvelles compétences. La formation de droit commun a tout intérêt de se structurer autour des FabLabs.** L'Agence du numérique travaille notamment à la mise en place d'un réseau national de médiation du numérique. Il s'agit là d'un enjeu d'importance, qui se doit de structurer les référentiels métiers associés aux technologies du numérique, et donc de la fabrication numérique.

Dans les espaces grand public, on retrouve une majorité de temps de découverte, d'éducation et de discussion. Les FabLabs jouent ainsi le rôle de médiateurs du numérique et permettent de comprendre ce à quoi ressembleront les Espaces publics numériques (EPN). En effet, très ouvert, un EPN permet de bénéficier d'un accès à la découverte, à l'échange, et à l'initiation aux outils et services que propose le numérique au travers d'actions caractéristiques de l'animation sociale : temps libre de consultation, rencontres, conférences/débats, ateliers collectifs... Ils proposent depuis des années un accès à Internet grâce à un matériel informatique à disposition et un personnel encadrant.

Du fait de leurs modèles économiques, les FabLabs grand public dépendent essentiellement des dispositifs de financement publics, ils ont tendance à s'inscrire naturellement dans une mission de service public tournée vers la médiation numérique, il n'est d'ailleurs pas rare de voir la plupart des initiatives françaises montées dans le contexte d'un EPN.

D'un autre côté, les FabLabs professionnels explorent l'évolution du numérique et ses conséquences sur les nouveaux modèles économiques permis par la démocratisation de la fabrication numérique à l'instar de l'impression 3D. En effet, sur l'ensemble des FabLabs à orientation professionnelle recensés sur le territoire, tous ont une offre de formation avec une réelle expertise sur l'impression 3D. Ils participent à la diffusion de la technique tout en restant très proche des prérogatives des entreprises, ce qui participe largement à sa diffusion.

Les FabLabs ont ainsi un rôle extrêmement intéressant à jouer dans l'adaptation rapide des formations vis-à-vis de ces évolutions technologiques et sociétales.

Par ailleurs, **les technologies de la fabrication additive ont un impact réel sur les compétences associées à la gestion de l'innovation**¹⁹⁶. Le développement de ces compétences nouvelles, sous le prétexte de l'impression 3D, permet de développer une culture autour de la « tangibilisation » d'un concept innovant à travers le prototypage rapide. Ces nouveaux outils permettent ainsi de matérialiser des approches comme le *Lean Start-up*¹⁹⁷ ou le *Design Thinking*¹⁹⁸, et ainsi d'accélérer la diffusion de ces notions et de faciliter le développement de projets.

Ces éléments ont un impact potentiel très important et extrêmement vertueux sur nos territoires. Ces compétences sont en effet stratégiques pour le développement de l'économie et de nouvelles activités innovantes capables de répondre aux enjeux de notre société. Il est ainsi nécessaire d'accompagner le développement de ces nouvelles compétences.

La 4^e révolution industrielle qui implique les technologies de l'industrie du futur et de la fabrication numérique nécessite ainsi un nouveau mode de pensée, qui permet de mettre en avant les tests, le prototypage, et l'itération afin de développer des fonctionnalités au plus proche du besoin. **La fabrication additive est ainsi porteuse d'un modèle d'entrepreneuriat qui infuse à travers les tiers-lieux et qui a le potentiel de former une nouvelle génération d'entrepreneurs et d'intrapreneurs.**

¹⁹⁶ Le management de l'innovation est la mise en œuvre des techniques et dispositifs de gestion destinés à créer les conditions les plus favorables au développement d'innovations concrètes.

¹⁹⁷ L'expression « Lean Start-up » renvoie à une approche spécifique du démarrage d'une activité économique et du lancement d'un produit.

¹⁹⁸ Le *Design Thinking* est une approche de l'innovation et de son management qui se veut une synthèse entre la pensée analytique et la pensée intuitive.

Un effet de médiatisation pas toujours positif

La fabrication additive, et plus particulièrement l'impression 3D, a fait l'objet d'une attention médiatique particulière ces dernières années. Cela a été à l'origine de la création d'une bulle spéculative autour de l'image des technologies de fabrication additive, et de leur impact possible en termes d'usage. Beaucoup de promesses d'avenir ont ainsi été diffusées massivement.

Aujourd'hui, du point de vue du grand public, les retombées de ces actions médiatiques d'ampleur n'ont pas eu que des effets positifs. En effet, force est de constater que l'imaginaire collectif a associé progressivement une image de « solution miracle » à ces technologies de fabrication numérique. Après l'émerveillement de la découverte de ces dispositifs, vient ainsi une forme désillusion et de déception face à la réalité des technologies et de leur usage réel.

Cette frustration, une fois dépassée, peut cependant être génératrice d'un intérêt renforcé qui s'inscrit dans une démarche d'implication plus forte de la part des personnes concernées, qui cherchent ainsi à appréhender l'ensemble des enjeux et des paramètres associés aux technologies de fabrication numérique, qui offrent alors un contexte d'accomplissement créatif permettant de produire différentes typologies de produits. Cette dynamique doit être accompagnée par les pouvoirs publics.

Conclusion : un potentiel de transformation des territoires bien réel

De par la montée en intelligence des procédés de fabrication, la fabrication additive possède un réel potentiel de transformation de la chaîne productive, des biens de consommation et des productions de petites et moyennes séries à court terme, jusqu'à l'ensemble du processus de production industriel à moyen et long terme. Les tendances de modularisation de la production sous forme de mini-usines (qui concentrent les équipements de fabrication et qui visent l'automatisation des opérations intermédiaires) et d'hybridation des procédés offrent notamment des perspectives de relocalisation et/ou de délocalisation de la production, afin de produire au plus proche du consommateur. Cette évolution est actuellement contrainte par des facteurs technologiques qui limitent l'intérêt économique de ce schéma organisationnel mais soulève déjà un véritable questionnement de fond sur la future répartition de la valeur ajoutée. En effet, face à ces opportunités d'évolution et de mobilité des outils de production, plusieurs modèles de fonctionnement adaptés aux différents territoires devraient permettre de répondre à la demande (fabrication chez l'utilisateur par l'utilisateur, fabrication chez un acteur tiers implanté à proximité du lieu d'utilisation, fabrication chez le fournisseur à proximité de l'utilisateur, fabrication chez l'utilisateur par le fournisseur de pièce). Ces différents scénarios de capture de valeur sont détaillés dans l'analyse prospective de ce rapport et notamment en Figure 73.

Cependant, les processus de mobilité des outils de production dans lesquels s'insère la fabrication additive restent portés par de nombreux autres facteurs. Ces nouvelles technologies viennent en effet s'inscrire au sein d'une palette de tendances associées à l'industrie du futur qui permettra de produire à moindre coût, au plus proche de la demande, et d'adresser des besoins de plus en plus spécifiques. Ces nouveaux outils de production, de plus en plus flexibles, permettront ainsi une redistribution de la valeur ajoutée tout au long de la chaîne de production et de la chaîne logistique. Le financement des activités de recherche amont, généralement amorti par la marge associée au cycle de production du produit, invitera à la réalisation de premiers investissements mutualisés qui se devront d'être soutenus par les pouvoirs publics. Par ailleurs, une bonne identification des compétences et des moyens disponibles dans les différents territoires sera également essentielle à l'établissement de coopérations renforcées entre les acteurs, permettant ainsi de réduire le coût d'accès à ces technologies.

L'émergence des technologies de fabrication additive invite ainsi à de nouvelles initiatives collaboratives qui atteignent peu à peu le monde de l'entreprise et les territoires, notamment à travers le concept de l'économie de quartier qui privilégie les circuits courts. Les tiers-lieux représentent en cela une force structurelle d'importance qui adresse les différents enjeux du territoire, au plus proche des nouveaux usages et des besoins locaux. Ces lieux doivent ainsi permettre d'accompagner l'évolution des méthodologies de conception et des compétences, et en assurer la diffusion au sein de l'écosystème industriel. Bien que la force de ces nouveaux écosystèmes provienne de leur forte capacité de prise en compte des enjeux locaux, il devient aujourd'hui nécessaire de coordonner l'émergence et l'organisation de ces différentes initiatives. Il est en cela essentiel de pouvoir prendre en compte les spécificités de chaque écosystème dans la gestion des politiques de soutien qui leur sont destinés. Pour cela, il faut dans un premier temps mieux caractériser ces lieux d'innovation, afin d'adapter et de faire évoluer au mieux les différents dispositifs qui s'adressent à eux. Dans le but de développer la capacité d'adaptation et d'évolution de nos territoires, il est important de pouvoir préserver la diversité et la richesse de ces nouveaux écosystèmes en émergence.

En conclusion, pour pouvoir assurer le maintien et la pérennité de ces différents écosystèmes, la définition d'une véritable politique nationale et régionale doit être une priorité afin d'assurer la bonne prise en compte des enjeux et des initiatives de chaque écosystème industriel.

IMPACTS SUR LES RESSOURCES HUMAINES ET ÉVOLUTION DES COMPÉTENCES

Ce chapitre traite des conséquences des technologies de la fabrication additive sur les ressources humaines d'un point de vue de l'évolution du marché du travail, des besoins de qualification, de l'émergence de nouveaux référentiels de formations, ainsi que de l'évolution des compétences associées.

De nombreuses évolutions à venir

Les enjeux de la fabrication additive impliquent la diffusion des savoirs nécessaires pour l'exploitation de ces nouveaux outils et l'accompagnement à la transformation idéologique induite sur les aspects de conception et de fabrication.

Les besoins dans ce domaine sont divers, allant de connaissances de base à des spécialisations poussées. Malgré l'apparition de modules de formation sur ces nouveaux usages, les profils de compétences restent à préciser dans l'ensemble des domaines impactés. **La combinaison de nouvelles technologies et méthodes de production transforme en effet les compétences nécessaires à l'exploitation de la chaîne de production.**

Au regard de la chaîne de valeur de la fabrication additive, il semble difficile d'être en capacité de maîtriser l'ensemble des compétences concernées. Afin de tirer profit de l'utilisation de la fabrication additive, une vision systémique de la chaîne de production est cependant essentielle. **Par ailleurs, les compétences nécessaires à la mise en œuvre des technologies de fabrication additive ne peuvent être dissociées de l'ensemble des compétences associées au concept de l'usine du futur.** Elles concernent la numérisation, la robotique, et certaines compétences liées à la gestion de la chaîne logistique.

La chaîne de production se décompose en plusieurs étapes principales : la conception, la préparation de la fabrication, la mise en œuvre de la machine et des éléments nécessaires à la fabrication, y compris le matériau avant et après fabrication, et enfin les post-traitements.

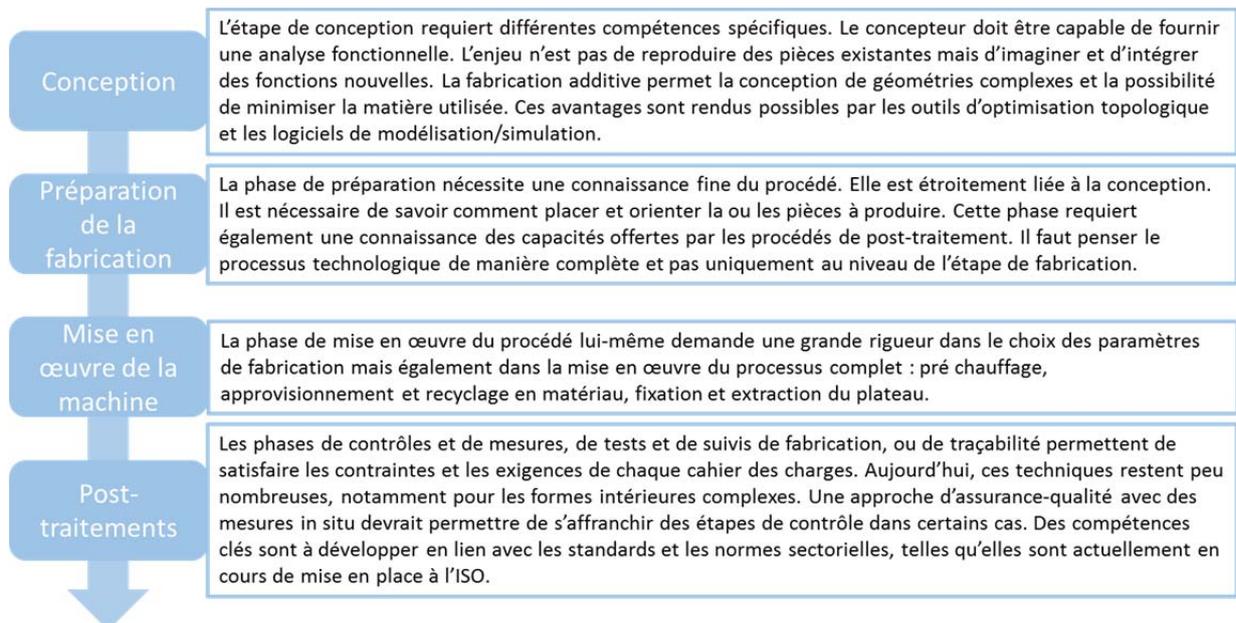


Figure 60 : Principales étapes de la chaîne de production

Le marché ne peut continuer à croître qu'en s'appuyant sur la confiance dans les machines, dans les pratiques, et dans les ressources humaines. D'une manière plus globale, le système doit

apprendre et capitaliser cette connaissance pour être capable de la réutiliser à bon escient. Une forme de connaissance partagée, couplée à des outils d'aide à la décision, devrait permettre à terme de concevoir non seulement la géométrie des pièces mais aussi le ou les matériaux, à différentes échelles.

Un besoin soutenu de formation à combler

La fabrication additive mobilise de nouvelles compétences tout au long de la chaîne de valeur industrielle, avec des défis à relever au niveau des différents maillons de la chaîne, et donc autant d'opportunités pour les acteurs français. Les changements de culture induits par ces nouvelles technologies illustrent un besoin réel de sensibilisation, de formation, et de valorisation des compétences au sein de l'ensemble des parties prenantes de la chaîne de valeur. Les actions de formation initiales et professionnelles sont en cela essentielles, et doivent permettre de couvrir aussi bien l'ensemble des aspects technologiques de la fabrication additive (design, procédés, matériaux, post-traitement...) que les différents niveaux d'expertise attendus (initiation, sensibilisation, spécialisation et développement de compétences fortes...).

Une question d'éducation et de sensibilisation

Aujourd'hui, l'éducation et la formation représentent entre 20 et 30 % du chiffre d'affaires des revendeurs spécialisés en imprimante 3D. Leurs cibles sont, avant tout, les collèges, les lycées, et les universités, qui ont de plus en plus tendance à s'équiper. On observe ainsi une sensibilisation grandissante dans l'éducation. Cette progression est accompagnée par la tendance des partenaires et grossistes à ajouter des imprimantes 3D dans leur offre pour les établissements publics d'éducation.

La France reste relativement en retard au niveau international, comparativement aux différentes initiatives d'intérêt dans de nombreux pays au niveau mondial, notamment par rapport à l'Angleterre, l'Allemagne ou les États-Unis. On peut par exemple citer l'initiative de l'Institut America Makes, en association avec le fabricant MakerBot, qui vise à aider les écoles publiques américaines à s'équiper en imprimantes 3D. Le projet est notamment soutenu par le gouvernement. De son côté, le Royaume-Uni mène également un projet pilote visant à équiper les établissements d'enseignement primaire avec des imprimantes 3D. **Nous ne disposons pas en France de tels programmes nationaux.**

Focus sur le projet d'installation d'imprimante 3D dans les écoles au Royaume Uni :

La décision d'équiper 60 écoles a été annoncée après une évaluation positive de l'impact de l'impression 3D sur un projet pilote impliquant 21 écoles et réalisé entre 2012 et 2013¹⁹⁹.

Dans un rapport publié en octobre 2013, le Ministère de l'éducation nationale britannique a évalué l'impact de l'impression 3D dans l'éducation suite à un projet pilote mené entre 2012 et 2013 au sein de 21 écoles primaires et secondaires. Ces écoles devaient en effet explorer de nouveaux usages de cette technologie afin d'améliorer l'efficacité des enseignements dans les sciences, les technologies, l'ingénierie, les mathématiques et le design, et ainsi éveiller l'intérêt et la créativité des élèves. C'est d'ailleurs suite à ce rapport d'évaluation très positif que le ministre de l'éducation Michaël Gove a décidé de débloquer 500 000 £ pour permettre à 60 écoles du système éducatif anglais de s'équiper en imprimantes 3D et de former les professeurs à leur utilisation. Si aucune étude d'impact sur cette nouvelle action n'a été publiée à ce jour, les principaux enseignements à retenir de cette expérimentation sont les suivants :

- Les expérimentations menées dans les écoles ont démontré l'importance d'une bonne formation des enseignants aux technologies et aux logiciels de conception 3D, notamment dans les nouvelles méthodes d'enseignement, tout en insistant sur une phase de préparation suffisamment longue et sans contact avec l'imprimante afin de garantir une utilisation effective ;

¹⁹⁹ 3D printers in schools: uses in the curriculum, Enriching the teaching of STEM and design subjects ; October 2013 Department for Education .

- Les équipes doivent aussi être formées à l'expérimentation et à la maintenance afin de pouvoir résoudre sans difficulté des problèmes mineurs et ainsi maintenir la motivation des professeurs et des élèves ;
- Confinée à ses débuts dans les classes de design et de technologie, l'imprimante 3D présente un potentiel considérable afin de faire des ponts entre ces différentes matières. Le rapport cite, par exemple, que la conception puis l'impression d'instruments de musique permettent de mobiliser les connaissances des étudiants en physiques (les ondes sonores), mais aussi en biologie (l'écoute chez l'être humain) et en ingénierie (la conception d'une salle de concert où les sons doivent circuler) ;
- L'implication active des techniciens pour faciliter l'utilisation des imprimantes et accompagner les travaux de conception ainsi que l'accès quasi permanent aux machines sont considérés comme des facteurs clés de succès du projet.

Il semble important de pouvoir soutenir cet effort à court terme afin d'encourager les écoles à s'équiper par le biais de subventions. Le concept des FabLabs s'intègre bien dans cette dynamique de sensibilisation. Ces tiers-lieux peuvent ainsi à termes s'ouvrir vers une forme d'investissement mutualisé avec les établissements publics d'éducation afin de promouvoir la mise en place de programmes de sensibilisation et de formation autour de ces nouvelles technologies d'avenir.

La formation initiale en cours de structuration

Aujourd'hui, les offres existantes restent rares, et, à l'image de la filière, désorganisées. Dans le même temps, la demande de recrutement augmente progressivement, et contribue à renforcer le besoin en la matière.

L'École des arts et métiers ParisTech est une des pionnières sur le sujet, avec une formation dédiée à la thématique « Materials & Additive Manufacturing », proposée en collaboration avec le CNAM et l'École nationale Supérieure d'architecture Paris-Malaquais²⁰⁰. Le parcours proposé tend à être le plus large possible, avec une ouverture sur l'ensemble des thèmes associés à la fabrication additive.

L'université Bretagne-Sud est également impliquée sur le sujet, en collaboration avec le LIMATB, le Lab-STICC, le FabLab CREAFA de Lorient et la plateforme CompositIC²⁰¹. La formation dispensée par ces différents organismes doit permettre d'acquérir l'un des tout premiers diplômes sur le sujet, avec une couverture de l'ensemble des compétences associées aux différents maillons de la chaîne de valeur.

Des formations dédiées à ces nouvelles technologies pourraient intéresser des professeurs de lycées technologiques, ainsi que pour les intervenants des BTS ou autres parcours professionnalisant en lien avec le domaine.

Il est en effet nécessaire de mieux former les enseignants et professeurs. Ces derniers ne semblent pas tous disposer de l'ensemble des éléments nécessaires à la délivrance d'un enseignement qualifié sur le sujet²⁰². **Il s'agit là d'un point d'amélioration fort et stratégique pour le développement de la filière : mieux former le corps enseignant pour délivrer une formation de qualité au bénéfice de l'émergence des compétences de demain.**

²⁰⁰ Quelles sont les études pour travailler dans l'impression 3D ?, 3D Natives, 5 juillet 2014.

²⁰¹ Une formation à l'impression 3D à l'université de Bretagne-Sud, 3D Natives, 11 janvier 2016.

²⁰² Retour obtenu de la part de nombreux acteurs consultés.

La formation professionnelle dans l'attente d'un référentiel de qualification

La maîtrise des technologies et des nouvelles méthodes est indispensable à une utilisation optimale d'une chaîne de production intégrant la fabrication additive. La complexité des compétences associées reste cependant un véritable frein au développement de ces nouvelles technologies. Le développement de cette filière nouvelle passe inexorablement par la mise en place de référentiels de formation et de certifications professionnelles.

Dans le domaine privé, de nombreux sous-traitants et centres techniques proposent des formations afin de sensibiliser les acteurs de la filière. Ces actions sont également sources de revenus complémentaires. On voit également apparaître progressivement des actions de formation à distance, comme l'émergence de premiers programmes en ligne à travers des MOOC dédiés à la fabrication additive²⁰³.

Des formations plus spécialisées émergent par ailleurs, à l'image de la collaboration entre le CTIF et Spartacus3D, qui ont lancé une formation innovante dans le domaine de la fabrication additive métallique par fusion laser sur lit de poudres²⁰⁴ ; ou de la formation proposée par le Cetim sur les procédés de fabrication additive métal et polymère²⁰⁵. Ces formations professionnelles restent cependant non certifiantes et non diplômantes.

De son côté, la plateforme technologique IDPro de Givors fait figure de pionnière sur les technologies de prototypage rapide, ce qui lui confère une position forte en matière de fabrication additive. Les actions engagées auprès des organismes de formation professionnelle illustrent un besoin grandissant et démontrent la pertinence de la thématique.

Afin de faciliter la mise en place de formations, il est urgent d'organiser le référencement des organismes compétents en matière de fabrication additive, et d'attribuer des financements permettant l'émergence et la structuration d'une nouvelle branche de formation. On retrouve notamment ce besoin au niveau des FabLabs, à l'interface de la demande des entreprises et de l'offre des étudiants, salariés ou autres candidats à l'apprentissage pour une montée en compétences et pour la délivrance d'un service de formation. Or, ces structures ne disposent généralement pas aujourd'hui de la reconnaissance et du cadre légal nécessaire pour pouvoir proposer des actions de formations professionnalisantes et reconnues au niveau de l'État. Il est essentiel d'agir sur ce point afin d'**offrir un cadre de développement pour des actions de formation structurantes, capable de réunir le grand public, les entreprises, et les établissements de formation autour d'une volonté commune de développement de la filière**, en impliquant les écosystèmes territoriaux qui ont émergé ces dernières années.

²⁰³ Exemple : <https://la-fabrication-additive.fr/>

²⁰⁴ Nouvelle formation en fabrication additive métallique, CTIF, 21 octobre 2015.

²⁰⁵ Formation / Fabrication additive : Les procédés et les applications métal et polymère, Club Impression 3D. URL : <http://www.clubimpression3d.fr/formation-fabrication-additive-les-procedes-et-les-applications-metal-et-polymere/>



Figure 61 : Un réel besoin de faire évoluer la formation autour de la fabrication additive

La fabrication additive : une compétence recherchée

Véritable indicateur de la dynamique d'une filière, le nombre d'offres d'emploi demandant des compétences liées à la fabrication additive ne cesse d'augmenter depuis 2013. En effet, la plateforme internationale de mise en relation Freelancer.com, qui publie chaque trimestre une étude sur les missions en freelance les plus demandées, place les compétences en fabrication additive et de façon plus générale en contenus 3D parmi les plus recherchées.

Le fait que les demandes de modélisation et d'animation 3D aient progressé de 36 % et que celles de rendus 3D affichent une croissance de 44 % est un véritable signe positif pour l'avenir de la filière, la majorité des demandes provenant d'acteurs de l'impression 3D, d'architectes ou de bureaux d'études²⁰⁶. **Par ailleurs, il est très intéressant de noter cet impact fort au niveau des travailleurs indépendants, qui reflète un changement de paradigme associé aux modalités d'utilisation des ressources humaines autour de ces nouvelles technologies de la fabrication numérique.**

Une tendance confirmée de manière plus générale par l'agence WantedAnalytic qui a pu observer que le nombre d'offre d'emploi dans le domaine de la fabrication additive avait doublé entre 2013 et 2014.

²⁰⁶ Freelancer.com reveals the Fast 50 small business trends driving online employment for Q1 2014

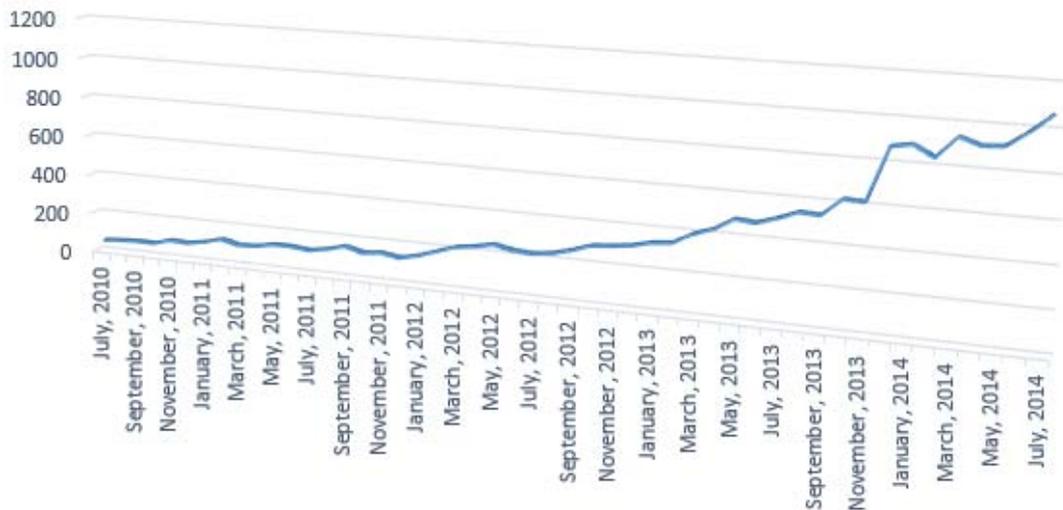


Figure 62 : Évolution du nombre d'offres d'emploi liées à l'impression 3D aux États-Unis en quatre ans²⁰⁷

Autre point à soulever de cette analyse, 35 % des offres d'emploi en ingénierie demanderaient aujourd'hui des compétences associées au domaine de la fabrication numérique. Les principales fonctions recherchées sont : ingénieur industriel, ingénieur mécanique, ingénieur développement logiciel, designer, ventes et *marketing*²⁰⁸.

Principales tendances sur le marché de l'emploi en France

Soucieux de confirmer ces premières observations et d'établir une vision représentative du dynamisme de la filière française, le site d'information francophone spécialiste de la fabrication additive 3dnatives.com a lancé une étude statistique à partir des différentes offres d'emploi publiées sur leur rubrique dédiée. Sans être exhaustive, cette analyse apporte des éléments de tendances intéressants sur la demande actuelle française dans ce domaine²⁰⁹.

Tout d'abord, le fait que la majorité des postes proposés soit des contrats à durée indéterminée démontre à la fois une croissance des offreurs de technologies de fabrication additive et une volonté des utilisateurs d'intégrer durablement la fabrication additive dans leurs activités. En parallèle, les propositions de stages ont également le vent en poupe avec des missions d'évaluation des gains potentiels de la fabrication additive, de veille technico-économique sur les solutions actuelles ou encore d'études prospectives. Souvent suivies d'une proposition d'embauche, ces différentes offres de stages sont représentatives de la situation transitoire dans laquelle beaucoup de sociétés se trouvent aujourd'hui vis-à-vis de la fabrication additive.

Très demandeuse, l'industrie manufacturière fait partie des secteurs qui recrutent le plus à l'image de l'aéronautique qui s'équipe de plus en plus en machines de fabrication additive. Le marché du biomédical n'est pas en reste et se place deuxième de ce classement, poussé par la demande grandissante de prothèses et d'implants personnalisés.

Conscients des importants changements provoqués par la démocratisation naissante des technologies de fabrication additive, les acteurs de la métallurgie sont également à la recherche de compétences pour accompagner cette transition vers une meilleure intégration des technologies numériques. Enfin, le secteur de l'automobile reste discret dans cette étude : les rares offres d'emploi concernent davantage le développement de pièces sur-mesure pour le sport mécanique et le prototypage de pièces (validation de concept, nouveaux tableaux de bord)

²⁰⁷ Demand for 3D Printing Skills Soars www.wantedanalytics.com/analysis/posts/demand-for-3d-printing-skills-soars

²⁰⁸ Demand for 3D Printing Skills Soars www.wantedanalytics.com/analysis/posts/demand-for-3d-printing-skills-soars

²⁰⁹ Le secteur de l'impression 3D recrute même en France ! <http://www.3dnatives.com/secteur-impression-3d-recrute/>

que la production en série. Si des réflexions sont en cours entre les gros donneurs d'ordres et équipementiers français pour lancer une étude sur la fabrication additive, le procédé n'est actuellement pas suffisamment mature pour tenir les fortes cadences de production et les prix.

Les autres segments qui recrutent sont les fabricants et distributeurs de machines de fabrication additive qui cherchent à augmenter les performances de leurs systèmes et pousser l'adoption de leurs produits sur le marché français et à l'international. On peut citer également les sous-traitants industriels, les services d'impression en ligne ou encore les éditeurs de logiciel qui prennent conscience des efforts qu'il reste à fournir en termes de modélisation et de simulation. À noter enfin le faible nombre d'offres d'emploi proposés par les FabLabs, les écosystèmes d'innovation ou encore les fournisseurs de matériaux. Ces acteurs ou écosystèmes sont encore en structuration et leur développement ne viendra que dans un second temps, poussé par l'intégration grandissante des procédés et des pratiques.

En conclusion, on retrouve parmi les principaux recruteurs via la rubrique « Offre d'emploi » du site 3dnatives les acteurs suivants : Safran, Airbus, Thales (aéronautique), Creatix3D, Multistation (distributeurs), Prodways, Phenix Systems (fabricants de machines), 3D Systèmes, Digicad (éditeurs de logiciels) ou Sculpteo (service en ligne).

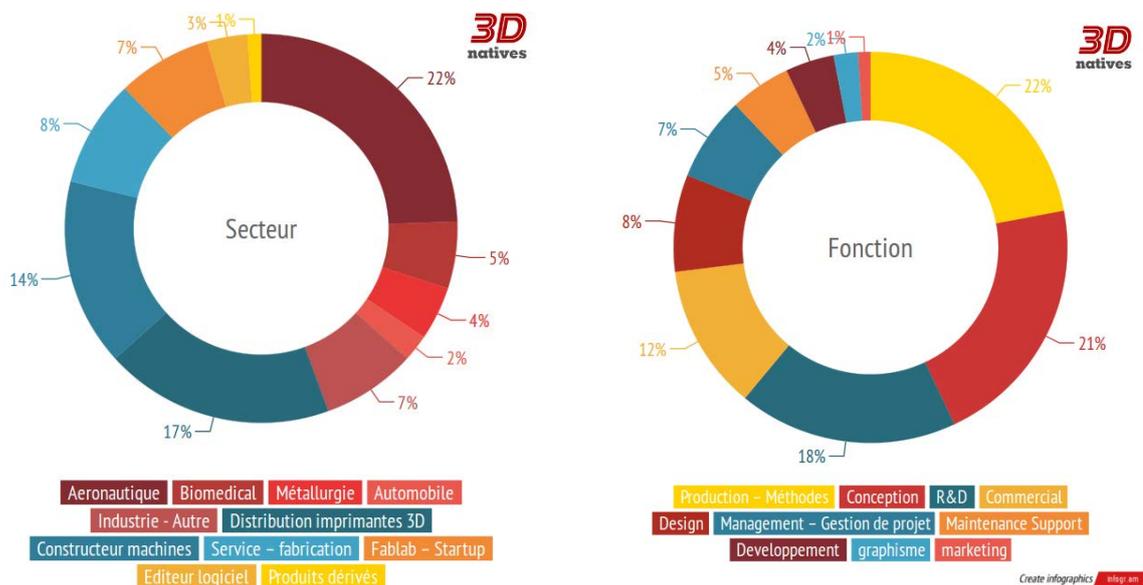


Figure 63 : Les secteurs qui recrutent et les fonctions recherchées en France (3D Natives, août 2014)

Les technologies de fabrication additive se trouvant en phase d'industrialisation, il n'est pas surprenant de voir que les recruteurs cherchent principalement des compétences techniques (techniciens, docteurs et ingénieurs) capables d'imaginer et de concevoir de nouvelles pièces, d'utiliser et de maintenir les machines ou encore de développer les procédés en recherche et développement. À noter également que les profils technico-commerciaux, supports, ainsi que les designers sont également des compétences demandées.

Un impact limité en termes d'emploi

Aujourd'hui, l'évaluation de l'impact territorial des technologies de fabrication additive est un exercice limité par le faible recul associé à l'intégration de ces technologies. Actuellement, l'impact est faiblement perceptible en termes d'emploi, en dehors de quelques *start-up* créées, qui restent marginales face au poids du secteur industriel français. Dans les entreprises, rien n'a fondamentalement changé aujourd'hui.

La fabrication additive reste aujourd'hui un outil complémentaire, qui ne crée pas encore beaucoup d'emplois par le biais du développement de nouvelles activités, mais qui permet avant tout d'améliorer la compétitivité des entreprises (et donc d'en assurer la pérennité) par l'amélioration des procédés actuels.

En termes d'emploi, l'ouverture existe actuellement au niveau des stages et des thèses principalement. Cela aboutira sur des ouvertures de postes dans les années à venir. Les entreprises sont actuellement concernées principalement sur des questions de prototypage, même si elles restent peu nombreuses à être véritablement impliquées dans cette dynamique. Il s'agit cependant ici d'une question de retard au démarrage, et de masse critique au lancement d'une telle innovation de rupture. **Apprivoiser de telles nouvelles possibilités techniques requiert un certain temps.**

Ces nouvelles technologies ont cependant un potentiel de création d'activité à moyen terme dans des zones actuellement hermétiques à ces nouvelles pratiques : comme explicité précédemment, la fabrication d'objets du quotidien peut être progressivement relocalisée, via une décentralisation des outils de production au profit d'une fabrication personnelle ou communautaire.

Ainsi, au niveau des collectivités et des particuliers, la problématique est différente, puisque la question de la viabilité de cette méthodologie de production alternative est toujours posée. Si elle se développe, cette forme alternative à la production industrielle centralisée possède un réel potentiel de transformation de l'organisation des territoires.

L'organisation du travail fait notamment partie des grandes interrogations de notre époque, et la fabrication additive peut-être un levier supplémentaire de la modification de nos habitudes, vers des modèles plus collaboratifs et communautaires. L'artisanat semble apporter une forme de réponse à ces nouveaux défis technologiques, avec une organisation faiblement hiérarchisée, fondée sur les compétences, sur les besoins des clients, et capable de s'adapter en fonction des besoins des uns et des autres. L'artisanat et la fabrication personnelle sont ainsi très fortement corrélés, et la fabrication additive pourrait nous permettre d'aboutir sur une forme d'artisanat de la fabrication numérique.

Il faut cependant également renforcer la communication autour de ces technologies, afin d'améliorer leur diffusion sur des applications nouvelles. Beaucoup d'entreprises artisanales voient encore la fabrication additive comme un gadget, en lien avec l'image qui en est diffusée dans les médias. Les petites sociétés n'ont pas toujours le temps d'approfondir ces sujets, et il reste ainsi un gros travail de sensibilisation à faire autour de ces nouvelles technologies. Et ce travail est essentiel afin d'accompagner les petites entreprises dans la transition à venir associée à ces outils de la fabrication numérique. **Il existe un véritable enjeu de pérennisation de l'activité de nos petites entreprises.**

L'artisanat numérique est une nouvelle forme d'artisanat qui utilise de nouveaux outils qui appartenaient naguère seulement aux procédés industriels de fabrication en grande série. Ce changement d'échelle implique ainsi de nouvelles applications pour de nouveaux marchés.

Face à un manque d'accompagnement de nos acteurs, il existe un réel risque de laisser pour compte certains acteurs industriels qui n'auront pas été capables de saisir cette opportunité de compétitivité.

Cette vision s'applique cependant à des contextes précis et déterminés. La production et le système industriels actuels ne disparaîtront pas du jour au lendemain, particulièrement pour les biens et produits concernés par d'importants volumes. La production centralisée, organisée, et la division du travail ont encore de beaux jours devant eux. Mais pour un certain nombre d'outils de production à destination de produits d'usage courant, on touche ici du doigt une forme alternative envisageable vis-à-vis de laquelle les pouvoirs publics et les acteurs privés doivent se positionner. En effet, bien que les facteurs soient réunis pour voir émerger un tel scénario, ce

dernier doit inévitablement faire l'objet d'une incitation forte de la part des acteurs leaders afin d'initier une véritable transition.

Les nouvelles technologies de fabrication numérique ont un pouvoir de décentralisation des outils de production, qui peut ainsi recréer le lien entre l'entreprise, structure centralisée par excellence, avec les territoires, qui ne pourront bientôt plus assumer une hypercentralisation des moyens. La transformation des habitudes de travail répond ainsi à des enjeux de taille, qui ont attiré à des problématiques de gestion urbaine et de gestion des territoires bien plus globales. Mis à part des projets pilotes comme celui de Lil'Aéroparc²¹⁰ qui consiste à la création d'un parc d'activité nouvelle génération, ces concepts restent cependant prospectifs et comptent peu d'exemples actuellement, de par le manque de vision à long terme des industriels et des organismes impliqués dans le développement de la filière de la fabrication additive.

²¹⁰ Voir : <http://rev3.fr/lilaeroparc/>

SCÉNARIOS PROSPECTIFS DE LA FABRICATION ADDITIVE

Sur le fondement de l'analyse développée dans les précédents chapitres de ce rapport, cette partie traduit la réflexion prospective qui a été conduite pour dégager les principales pistes de développement de la fabrication additive dans les applications industrielles et grand public. Ce travail a notamment permis de dégager quatre scénarios prospectifs d'évolution et d'utilisation de ces nouvelles technologies.

De l'identification de cas d'usage à la caractérisation de scénarios prospectifs

La fabrication additive étant un phénomène mondial, les évolutions envisagées ne se limitent pas au marché français mais permettent d'anticiper certaines mutations économiques ainsi que d'éventuelles inégalités territoriales par rapport à l'appropriation ou l'accès à ces technologies. Dans un souci de clarté, il semble important ici de repréciser la méthodologie adoptée dans cette étude afin de construire les scénarios prospectifs : en effet, l'identification et la classification des facteurs de développement de la fabrication additive menée précédemment ont permis de constituer une base de réflexion pour la définition des différents cas d'usages dont l'évolution est conditionnée par les différents leviers prioritaires.

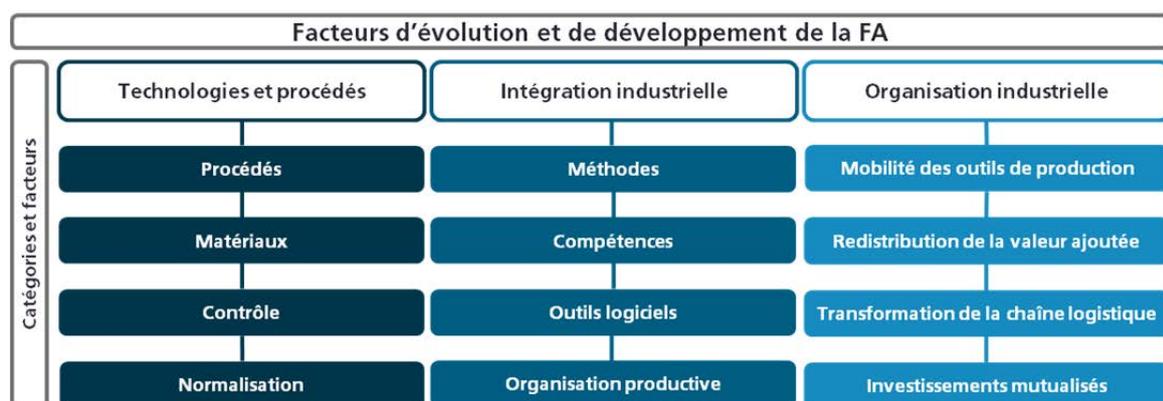


Figure 64 : Représentation schématique des principaux facteurs d'évolution

L'analyse croisée de l'évolution de ces facteurs et des différents cas d'usages identifiés a alors permis de définir les scénarios prospectifs présentés ci-après. Cette analyse consiste à prendre du recul par rapport aux technologies et aux marchés d'application et à considérer les opportunités et les freins à l'adoption de la fabrication additive par typologie d'usages. En effet, les entretiens réalisés ont permis de dégager plusieurs voies d'adoption de la fabrication additive ainsi que d'identifier les principales variables de développement associées.

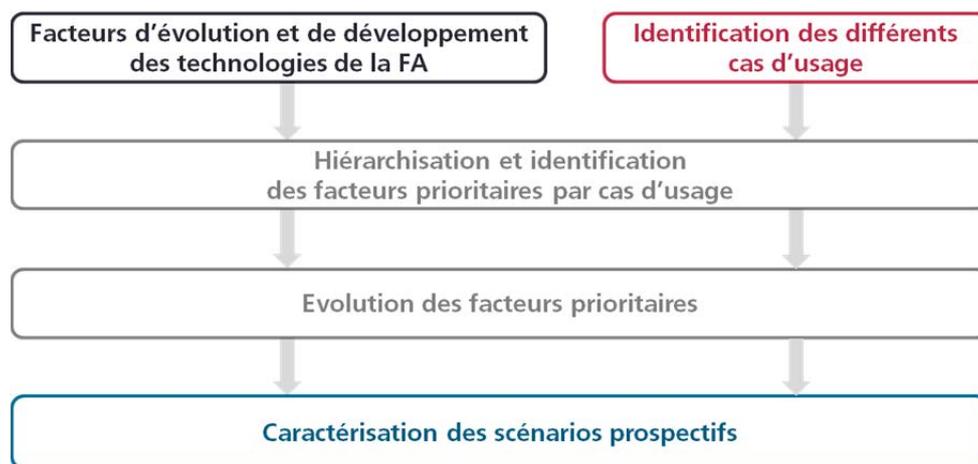


Figure 65 : Rappel de la méthodologie globale de constitution des scénarios prospectifs

En offrant une alternative aux préséries et petites séries de production et une plus grande flexibilité sur les formes de pièces, la fabrication additive offre un accès à moindre coût à un outil de production qui cherche à devenir industriel. Les développements et les améliorations à venir sont ainsi porteurs de nombreuses opportunités. La fabrication additive permet en effet de traiter la demande du client plus rapidement avec une offre personnalisée, ou de lui offrir la possibilité de produire par lui-même ce qu'il souhaite. Une récente étude de Deloitte complétée par notre analyse et validée par les experts interrogés a permis de dégager plusieurs axes de déploiement de la fabrication additive, dépendant de l'impact de cette technologie sur le produit ou sur la chaîne logistique :

1. **Prototypage et expérimentation** : C'est principalement selon cet axe qu'a été considérée la technologie au cours des trente dernières années. Le prototypage rapide, l'outillage rapide (réduction du coût et du délai de fabrication d'un prototype ne présentant pas forcément de géométrie complexe) ou encore la validation de préséries (grâce à l'outillage rapide notamment) ont permis de réduire les temps de développement, d'augmenter la qualité du produit et de réduire les coûts sur des produits existants et sans modifications de la chaîne logistique ;
2. **Industrialisation de la personnalisation** : les procédés additifs ouvrent la voie à davantage de flexibilité dans le paramétrage de l'outil de production. Il est ainsi envisageable d'intégrer à une chaîne de production industrielle des paramètres facilement personnalisables, permettant de répondre à des besoins spécifiques. La mise en œuvre industrielle du procédé ouvre ainsi la voie à de nouvelles interactions entre l'utilisateur final et la chaîne de production, afin de proposer la réponse la plus adaptée à chaque besoin ;
3. **Production série et gain de performance** : la fabrication additive présente l'avantage de pouvoir réaliser des formes complexes (qu'il ne serait pas possible de fabriquer autrement à un coût raisonnable), ou d'intégrer des fonctionnalités supplémentaires pour réduire les étapes d'assemblage. Cet axe stratégique est certainement le plus considéré aujourd'hui par de nombreux acteurs qui veulent augmenter leur capacité d'innovation « produit » en réalisant par exemple des outillages complexes permettant d'augmenter les cadences de production ou d'intégrer, dès la fabrication, de l'électronique sans pour autant afficher une volonté de transformer leur chaîne logistique. Le déploiement de la fabrication additive selon cet axe stratégique présente un impact sur les organisations qui souhaitent améliorer l'efficacité de leur outil de production ;
4. **Évolution de la chaîne de valeur** : la fabrication additive possède un impact potentiel durable sur l'approvisionnement de matériel ou sur la gestion des unités de stockage, notamment en ce qui concerne les pièces détachées. La motivation de la

fabrication additive n'est pas liée ici à une amélioration du produit mais plutôt à une augmentation de la qualité de service combinée à une mobilité nouvelle des outils de production. Ouvrant la voie à de nouveaux modèles économiques, cet axe de développement est envisageable dans une temporalité plus éloignée que les autres mais combine plusieurs avantages. Il offre en effet la possibilité d'un gain de compétitivité, d'un meilleur positionnement concurrentiel, tout en autorisant la création de modèles économiques innovants pour une production au plus proche de la demande.

1. Prototypage et expérimentation	2. Industrialisation de la personnalisation	3. Production série et gain de performance	4. Evolution de la chaîne de valeur
<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des coûts et des délais de fabrication des prototypes • Elimination de l'étape de fabrication d'outillage coûteuse offerte par la fabrication directe • Accélération des cycles de développement donc de mise sur le marché 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation du confort de l'utilisateur, recherche d'esthétisme • Réduction du coût de la fabrication sur-mesure et/ou personnalisée • Réduction du temps d'intervention et d'immobilisation (spécifique médical) 	<ul style="list-style-type: none"> • Optimisation du coût global de la pièce : réduction des assemblages, de la maintenance • Augmentation des performances intrinsèques de la pièce dont l'allègement des structures : économie de carburant 	<ul style="list-style-type: none"> • Gestion des obsolescences et des ruptures d'approvisionnement • Réduction du temps d'immobilisation des actifs d'exploitation et de production : fabrication rapide • Réduction des stocks et des coûts de transport

Figure 66 : Les principes clés associés aux différents scénarios

Pour chaque scénario, les leviers prioritaires ont été soumis au regard critique des participants des différents ateliers afin de mieux percevoir les évolutions attendues selon les différents scénarios et selon les différents marchés d'application représentés, et ainsi valider un consensus collectif avec l'ensemble des acteurs clés de la filière.

Scénario 1 – Prototypage et expérimentation

Le premier scénario, cas d'usage historique, est celui du prototypage et de l'expérimentation. Il représentait en effet près de 80 % des applications il y a encore cinq ans. Constatée et généralisée dans la plupart des industries au cours des dix dernières années, l'adoption de la fabrication additive à travers le prototypage offre la possibilité de réduire considérablement les temps de conception et de développement, donc de mise sur le marché. Le prototypage peut se faire non seulement de manière directe ou indirecte : en effet, la fabrication de moules à bas coût ou d'outillage pour faire des pièces prototypes ou de présérie de manière indirecte est un axe fort de développement observé depuis quelques années.

Par ailleurs, les usages associés peuvent remplir différents objectifs :

- La validation de formes géométriques (au niveau de l'encombrement, des fonctionnalités, ou de l'esthétisme) afin de pouvoir réaliser plusieurs itérations dans le processus de conception et ainsi obtenir plus rapidement la forme finale de la pièce souhaitée ;
- La réalisation de prototypes de pré-industrialisation représentatifs de la pièce finale en termes de performances mécaniques, de matériaux et capable de fonctionner en conditions réelles d'utilisation ;
- La réalisation rapide de moules à bas coût : il est aujourd'hui possible de fabriquer des empreintes de moules en fabrication additive polymère pour tester de nouvelles configurations en injection « classique » sur quelques dizaines de pièces.

Dans la mesure où la fabrication additive à des fins de prototypage est déjà déployée largement, Ce scénario représente une évolution à court terme à fort impact puisque les innovations et développements réalisés récemment tendent à rendre le procédé accessible aux plus petites structures. Par contre si on regarde l'aspect volume de production, ce scénario est relativement moins porteur que les autres. Le prototypage est une étape indispensable dans le développement de nouveaux matériaux et de nouvelles pièces : il est par exemple possible de fabriquer des pièces multimatériaux en imprimant plusieurs thermoplastiques ensemble ou plusieurs inconels, bien qu'aucune application industrielle n'ait été trouvée actuellement.

Pour ce scénario, le manque de stabilité du procédé ou le coût de production élevé sont des freins jugés secondaires dans la mesure où le vecteur de valeur est de pouvoir réduire les coûts et les délais de fabrication de pièces prototypes souvent unitaires.

Considéré comme un véritable « laboratoire matériau », le prototypage en fabrication additive voit aujourd'hui son évolution contrainte par les freins suivants :

- Faible maîtrise du dimensionnement lorsqu'il s'agit de valider une géométrie ;
- Faible disponibilité des matériaux pour répondre à un cahier des charges spécifique ;
- Machines limitées en taille qui bloquent les expérimentations sur un grand nombre de pièces, alors que les produits de grandes dimensions favorisent l'augmentation des volumes de matières utilisés (sauf pour les procédés de dépôt de matière sous flux d'énergie dirigée qui sont adaptées pour les grandes tailles, et de stratoconception qui présentent un compromis dimensions élevées/précision de fabrication très bon ;
- Risque d'obsolescence sur les procédés dédiés au maquettage et au prototypage très important, à l'image du dernier modèle de Stratasys ou de l'arrivée d'HP sur le marché ;
- Le prototypage implique une certaine flexibilité et des changements de matériaux fréquents, or le nettoyage des machines prend un temps significatif. Pour certaines applications il existe un besoin pour des machines de prototypages permettant de passer d'une matière à l'autre plus rapidement, plus facilement et plus proprement ;
- Utilisation d'un format STL jugé actuellement trop restrictif : pertes d'informations sur l'hétérogénéité des volumes, la topologie, les couleurs ou les caractéristiques des matériaux.

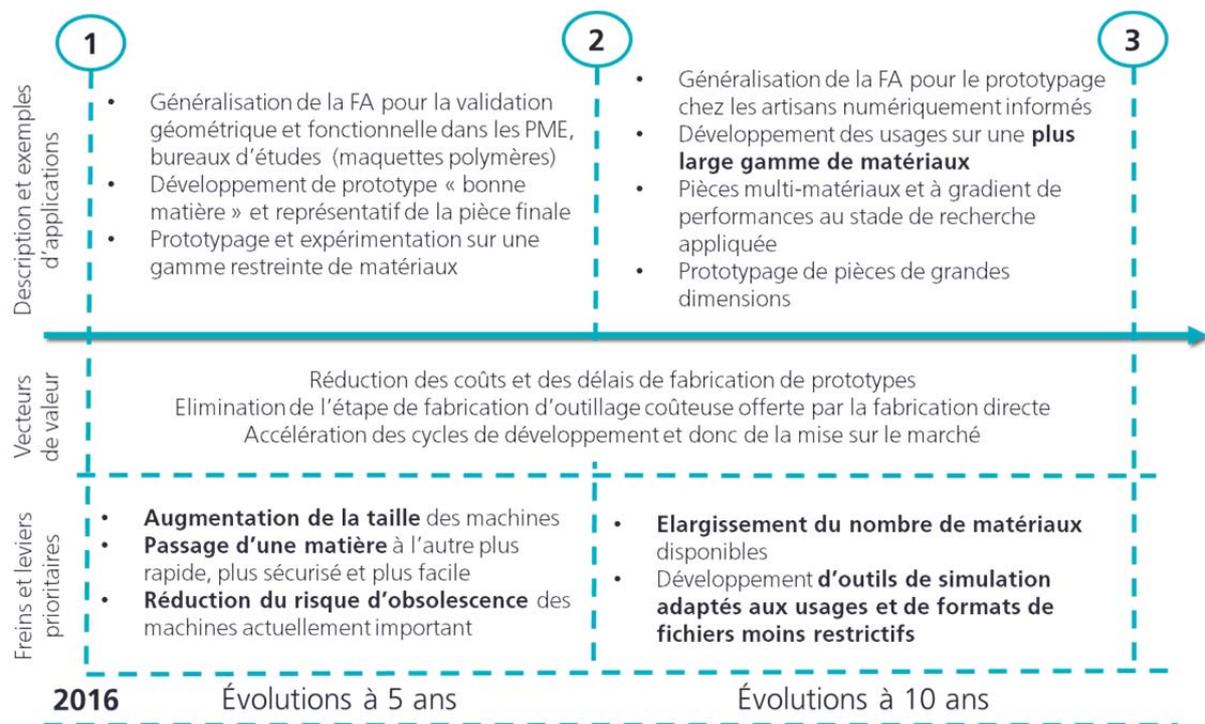


Figure 67 : Synthèse : Prototypage et expérimentation

Focus sur le grand public, l'artisanat et les biens de consommation

Il peut être surprenant d'apprendre qu'une des plus grosses agences d'architecture française n'utilise pas la fabrication additive pour la réalisation de maquette. L'acteur en question n'envisage un investissement sur le sujet que dans les deux ans à venir. Cela illustre bien le problème, de plus en plus récurrent, de la fracture numérique avec les PME et les artisans qui sont susceptibles d'être utilisateurs de la fabrication additive mais qui ne maîtrisent pas toujours la modélisation 3D (même avec des outils très simples et gratuits tels que *Sketchup*) ou d'autres compétences essentielles.

Cependant, on peut s'attendre à une généralisation du prototypage dans les PME, les agences de design et d'architectures ou les bureaux d'études dans les cinq ans à venir, et chez les artisans « numériquement informés » à l'horizon 2025.

Ce scénario est donc celui de la généralisation de l'impression 3D dans les territoires et les entreprises. Il soulève par ailleurs la question du rôle des lieux d'innovation à moyen/long termes, et de l'avenir des FabLabs. Ces établissements se présentent comme des lieux d'acculturation de la population et de certains professionnels. Ils visent à inciter l'ensemble des acteurs à continuer leur montée en compétences sur le sujet au sein de plateformes d'expérimentation qui mutualisent les équipements pour pouvoir faire par exemple du prototypage bonne matière²¹¹.

La convergence progressive des nouvelles technologies tels que l'impression 3D, la robotique, l'intelligence artificielle ou encore l'internet des objets est également une tendance d'intérêt qui peut venir favoriser la diffusion des applications de la fabrication additive pour le grand public.

Conclusions et enseignements :

- Avec 80 % des applications concernées il y a cinq ans, 50 % aujourd'hui et 20 % dans les prochaines années, le poids de l'utilisation des procédés additifs pour des applications de prototypage diminue progressivement, en parallèle de la montée en puissance des autres scénarios. Le prototypage reste cependant la porte d'entrée vers les technologies de la fabrication additive.
- Freins prioritaires : augmentation de la taille des machines, flexibilité.

Scénario 2 – Industrialisation de la personnalisation

Le deuxième scénario est celui de la personnalisation des produits, qui offre une nouvelle voie de captation de la valeur ajoutée autour de la chaîne de production. Dans une dynamique dite de « personnalisation de masse », la fabrication additive permet de réaliser facilement et à moindre coût des pièces ou objets uniques, encourageant ainsi la création de nouveaux services. Ce scénario n'englobe pas la fabrication additive particulière (c'est-à-dire par l'utilisateur final ou sur le lieu d'assemblage) qui sera davantage traitée dans le scénario 4.

On distingue cependant deux cas principaux qui regroupent les vecteurs de valeur de ce scénario, à savoir le gain de confort, d'esthétique ou de précision dans les opérations : le premier concerne la personnalisation esthétique (coque de téléphone, figurine à son effigie, réalisation d'un tableau de bord haut de gamme pour l'industrie automobile) ; le second concerne la personnalisation fonctionnelle (implants crâniens ou dentaires adaptés à la morphologie et la physiologie du patient, écouteurs et lunettes fabriquées sur-mesure). Notre analyse démontre que c'est principalement ce dernier cas qui tirera le développement de la fabrication additive pour des applications liées à la personnalisation. En effet, le dernier siècle, marqué par le taylorisme, a contribué à la généralisation de la production de masse et a ainsi habitué le consommateur à des offres de produits standardisés. Il s'agit ici bien d'un frein à

²¹¹ Ou prototypage de présérie.

l'adoption de la personnalisation, qui vient limiter la pertinence d'éventuels modèles économiques viables sur la personnalisation esthétique pour les prochaines années. Il sera cependant possible de généraliser des productions en petite série pour des panels restreints à l'image des personnes handicapées qui peuvent par exemple bénéficier de fauteuils roulants imprimés en 3D et adaptés à leur morphologie.

Dans la mesure où ce scénario intègre une dimension industrielle et qu'il a vocation à réaliser un produit fini, la montée en efficacité des procédés aura un impact certain pour l'amélioration de la qualité de surface, notamment sur les segments haut de gamme ou de luxe. Cependant, c'est avant tout l'évolution et la démocratisation de la demande qui seront le véritable moteur.

Particulièrement adaptée au secteur de la santé et du médical, la personnalisation fonctionnelle devrait se développer activement sur ce segment à l'image des implants crâniens (qui, après 10 ans d'essais cliniques et l'obtention du marquage CE, devraient pouvoir s'écouler désormais en nombre) ou des guides chirurgicaux permettant d'améliorer la précision des opérations.

Cependant, il est important de considérer que sur le plan industriel, le développement de la fabrication additive dans ce scénario sera progressif et concernera avant tout des marchés de niche. On constate finalement que la personnalisation est considérée très différemment d'un secteur à l'autre (production unitaire dans le médical ou le luxe contre plusieurs milliers dans l'automobile) ce qui limite le potentiel de diffusion de la fabrication additive à partir de ces usages. En effet, la filière automobile ne semble pas structurée pour trouver un modèle économique à même de capter un besoin de personnalisation client avancé (limitation actuelle à des choix de couleur et d'accessoires).

Imaginer une ligne de production de grande série où chaque pièce est différente du fait de la morphologie ou des attentes du client pourrait voir le jour vers 2025. En revanche, une augmentation de la diversité des produits proposés sur catalogue du fait de la possibilité de produire en plus petite quantité peut être considérée à moyen terme lorsque la fabrication additive sera industrialisée (avec de bonnes cadences de production et une répétabilité convenable).

Si la diffusion de ce scénario est surtout conditionnée par la consolidation de la demande de produits sur-mesure ou personnalisés, il présente l'intérêt de redévelopper certaines activités artisanales ayant quasiment disparu au profit des grands groupes, à l'image des lunetiers qui espèrent profiter de cette nouvelle opportunité pour pénétrer un marché des montures d'1,8 milliard d'euros et généraliser la fabrication additive dans leur activité d'ici 2020. D'autres secteurs pourraient rapidement être concernés, comme le prêt à porter, la cordonnerie (fabrication de chaussures)...

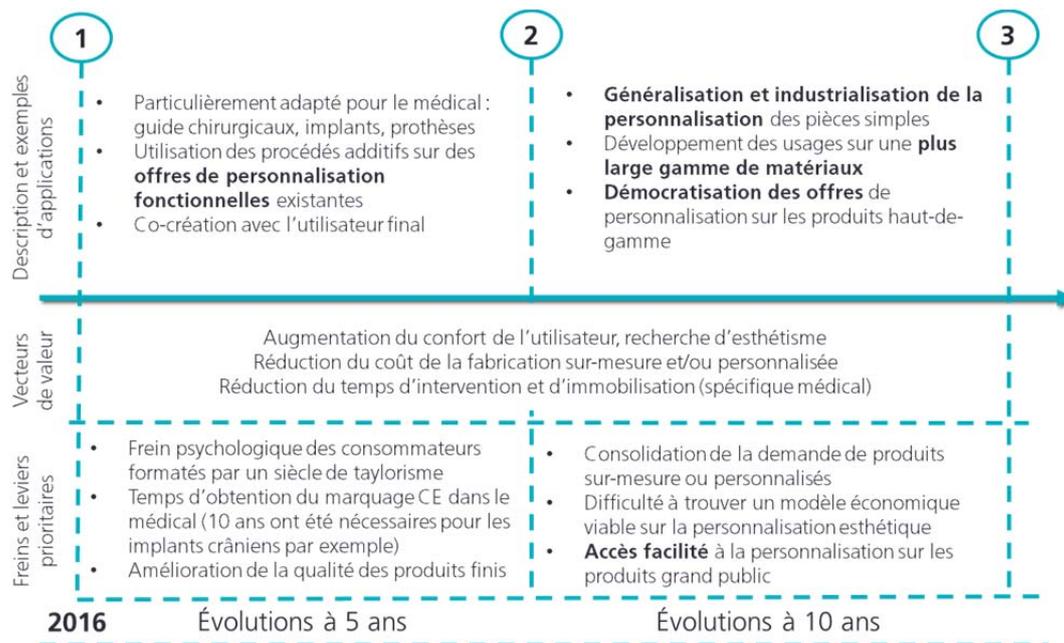


Figure 68 : Industrialisation de la personnalisation : de l'esthétique au fonctionnel

Exemple de la fabrication d'un boîtier de clé²¹² :

- Illustration du scénario 1 : prototypage indirect *via* la fabrication de moules polymères à bas coût ;
- Illustration du scénario 2 : un cas d'usage pour répondre à un besoin de personnalisation à différents niveaux.

Introduction

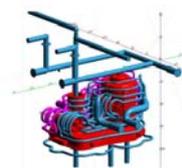
La fabrication de toutes les pièces plastiques pourra, grâce à la fabrication additive, se faire de trois façons : fabrication de pièces directe, injection de pièces dans un moule rapide à bas coût réalisé en fabrication additive polymère, et injection de pièces dans un moule avec régulation optimisée en fabrication additive métallique. Pour illustrer, voici un exemple pour un boîtier de clé de voiture (50 x 15 x 5 mm, 10g) selon 3 axes de lecture.



Pièces directes



Empreintes de moule polymère



Empreintes de moule Conformal cooling

Comparaison avec les procédés conventionnels

Le boîtier de clé de voiture, et plus généralement les pièces plastiques, sont traditionnellement fabriqués en deux étapes : tout d'abord, la fabrication de l'outillage consiste en plusieurs opérations d'usinages d'un bloc d'acier à outillage pour les empreintes et de plaques de moules pour la carcasse. Ensuite, la pièce plastique présentant une épaisseur de 2 à 3 mm est fabriquée par injection plastique ABS.

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

Pour répondre aux demandes d'ultrapersonnalisation tout en limitant (ou diminuant) les coûts unitaires des pièces, trois possibilités d'utilisation de la fabrication additive ont été envisagées en fonction du nombre de pièces à produire :

- **Réalisation de pièces unitaires, prototypes, petites séries** : fabrication additive directe des pièces. L'objectif est d'obtenir des pièces de la façon la plus rapide possible sans réalisation d'outillage. Cependant, les temps de fabrication, les matériaux disponibles ainsi que le coût des pièces ne permettent pas d'envisager cette solution pour des volumes de pièces importants (moins de 1 000 pièces) ;

²¹² Synthèse de l'analyse réalisée par l'IPC, partenaire du consortium. Analyse complète disponible en annexe.

- **Réalisation de moules rapides à bas coûts** : il est possible de fabriquer des empreintes de moule en fabrication additive polymère ce qui permet de réaliser des outillages à bas coûts (quelques centaines d'euros) pour injecter des pièces de façon « classique ». Cette méthode est réservée à des petites ou moyennes séries (entre 100 et 10 000 pièces) ;
- **Réalisation d'empreintes de moule *conformal cooling*** : la fabrication additive permet de fabriquer des outillages incluant des canaux de régulation complexes permettant de diminuer les temps de cycle et d'améliorer la qualité des pièces fabriquées par injection. Le prix de l'outillage étant élevé, cette méthode de fabrication est réservée aux grandes séries de fabrication (un million de pièces ou plus).

On peut aujourd'hui considérer que les trois scénarios vont évoluer en parallèle en fonction du niveau de personnalisation attendu.

Chacune des trois méthodes de fabrication nécessite une technologie et des matériaux différents :

- Fabrication directe :
 - o Technologies de fabrication additive polymère : FDM, SLS, SLA/DLP...
 - o Matériaux courants en plasturgie : ABS, PA...
- Moules à bas coûts :
 - o Technologies de fabrication additive polymère : FDM, SLS, SLA/DLP...
 - o Matériaux techniques et/ou chargés pour résister à l'abrasion et la température du polymère injecté (PEI, PPS, PEEK, Composites, Polymère chargé céramique...)
- Moule *conformal cooling* :
 - o Technologie de fusion laser de poudres métalliques : SLM ;
 - o Acier à outillage : acier *maraging*, H11, H13...

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

Chacune des trois méthodes de fabrication possède des verrous différents :

- Fabrication directe :
 - o Prix des pièces ;
 - o Temps de fabrication ;
 - o Matériaux disponibles ;
 - o État de surface (comparé à l'injection plastique) ;
- Moules à bas coûts :
 - o Technologie peu connue ;
 - o Réticence d'utiliser des outillages polymères pour injecter un polymère ;
 - o Temps de cycle supérieur ;
 - o Cinétique de cristallisation du polymère différente d'un moule métal (propriétés du polymère différentes) ;
- Moule *conformal cooling* :
 - o Matériaux non usuels ;
 - o Temps de fabrication des empreintes ;
 - o Surcoût des empreintes par rapport à une version usinée.

Les verrous exprimés précédemment devraient être levés peu à peu dans les prochaines années du fait de :

- La diminution du prix des machines et de la matière première ;
- L'amélioration des technologies afin de pouvoir utiliser une plus grande variété de matières premières (notamment des matières usuelles métal et polymère) ;
- La démocratisation et les preuves de concept liées à l'emploi de la fabrication additive.

Impacts sur la chaîne de valeur

La fabrication additive permettra de démocratiser la personnalisation à bas coût avec des modes de production adaptés aux différentes séries.

L'impact sur la filière classique de fabrication additive est l'implication directe de l'utilisateur final de la pièce (le client) dans la conception, ce qui oblige à réduire les temps de conception et de production. D'ici 2030, il est envisageable de trouver des sites de production « locaux » pour répondre aux demandes des clients avec un délai minimum en évitant les intermédiaires et les temps de livraison.

Focus sur le grand public, l'artisanat et les biens de consommations

Dans le grand public et les biens de consommations, la personnalisation semble être une grande tendance de fond à long terme et l'impression 3D présente le potentiel de généraliser le concept de la longue traîne (très grand nombre de produits vendus très peu souvent à l'opposé des stratégies des « best-sellers » où un petit nombre de références représentent un gros volume). À l'image de Netflix ou d'Amazon, la commercialisation d'offres de service numériques²¹³ est particulièrement adaptée à ce concept dans la mesure où le coût de stockage est quasi nul. Cependant, il est difficile de voir la personnalisation à un niveau industriel à court terme sur ces applications. Il est plus probable de l'envisager en tant que service pour les particuliers pour les usages de la vie courante ou pour la création de nouveaux produits.

En effet, si les industriels des biens domestiques ou de consommation de masse semblent privilégier à court terme une stratégie de personnalisation des accessoires ou des pièces détachées plutôt que du produit complet basé sur l'impression 3D, le marché n'est pas encore assez mature pour présenter de réelles opportunités économiques pour ces acteurs. L'expérience a démontré, dans l'automobile par exemple, que proposer plusieurs carrosseries extérieures sur un produit fabriqué en grand volume avec des procédés conventionnels était peu pertinent dans la mesure où celles-ci avaient plutôt tendance à alourdir les stocks avant d'être jetées.

Cependant, ouvrir l'accès à la morphologie extérieure de certains produits pour laisser le consommateur imaginer son propre accessoire afin de lui proposer un service complémentaire semble plus probable. En effet, plutôt que de laisser l'industriel reconcevoir un produit pour une faible quantité personnalisée, l'enjeu est de proposer un objet facilement personnalisable par le consommateur lui-même.

Du fait de leur dynamisme et de leur réactivité, les *start-up* seront vraisemblablement les moteurs de la personnalisation de masse avec des consommateurs qui auront des exigences fortes sur leurs produits (couleurs, accessoires, formes).

Enfin, il est important de garder en tête que la personnalisation d'un produit implique d'avoir des compétences fortes en conception et en modélisation ou un accès à des bibliothèques d'objets facilement modifiables. Ainsi, afin de favoriser la démarche de cocréation avec l'utilisateur grand public dans un premier temps (prise de mesures, choix des couleurs) puis éventuellement la fabrication de produit personnalisé par le particulier lui-même, les facteurs de développement clés sont les suivants :

- Développement de technologies de scan 3D fiables et accessibles au grand public (basé sur l'utilisation d'un smartphone par exemple) ;
- Simplification des interfaces pour faire intervenir l'utilisateur tôt dans la conception ;
- Accès à des banques d'objets 3D mis à disposition par les fabricants.

Conclusions et enseignements :

- Un scénario industriel tiré de manière quasi exclusive par le médical et certaines niches haut de gamme (joaillerie, aviation d'affaires, course automobile) ;
- Freins prioritaires : qualité de surface, demande de personnalisation, facilitation de cocréation avec l'utilisateur final avec des interfaces et des banques d'objets.

²¹³ Exemple de banque de fichiers numériques, d'outils ou de services disponibles en ligne...

Scénario 3 – Vers la production série directe et indirecte pour le gain de performance

Aujourd'hui, reproduire une pièce à l'identique par fabrication additive ne présente pas d'intérêt économique dans la grande majorité des cas. En effet, la production série ne possède pas d'intérêt économique spécifique pour la fabrication additive sauf dans le cas de pièces unitaires ou lorsque la forme souhaitée est impossible à obtenir à l'aide d'un procédé de production conventionnel et que le gain de performance justifie le surcoût associé. Ainsi, pour devenir une réalité industrielle, un effort important de reconception des pièces existantes et de développement de nouveaux produits pour la fabrication additive est attendu.

Dans un premier temps, le surcoût de production unitaire associé à la fabrication additive pourra être compensé par la réduction du nombre d'étapes d'assemblage sur certaines pièces composées de nombreux sous-systèmes et ainsi justifier une production en volume plus importante (plusieurs centaines à plusieurs dizaines de milliers d'unités). En effet, la fabrication additive peut permettre de produire des pièces en un nombre réduit d'opérations voire en une seule étape et ainsi de s'affranchir des nombreuses étapes de mise en forme et d'assemblage associées aux procédés traditionnels.

Cela implique non seulement une transformation profonde de la chaîne de production et de l'activité de maintenance, mais aussi une augmentation des performances du produit (meilleure durabilité notamment). Si ce modèle semble aujourd'hui viable pour des éléments composés d'un nombre important de sous-systèmes à l'image des pièces de micromécanique, vannes, collecteurs ou échangeurs, l'industrialisation des procédés et la baisse des coûts de production associés permettent d'envisager un développement progressif de ce scénario sur des pièces moins complexes, composées de moins de sous-ensembles.

Par ailleurs, l'amélioration de la performance produit obtenue grâce à de nouvelles formes complexes, à l'image du support d'antenne de RUAG Space ou des moules avec canaux de régulation, est une motivation qui devrait multiplier ces cas sur des pièces unitaires. Le segment des outillages est effectivement à considérer dans les évolutions continuistes dans la mesure où la fabrication indirecte est moins contraignante en termes de réglementation et répond à un besoin d'amélioration continue de performance des procédés existants.

Dans un second temps, la production de pièces de série dont la forme et la complexité ont été repensées pour augmenter leurs performances tout au long du cycle de vie (exemple des amortisseurs de chocs à l'aide de variation d'alvéoles) se positionne comme un véritable aboutissement de l'industrialisation de la fabrication additive. La recherche de complexité sur les produits implique des compétences supplémentaires, au travers de nouvelles méthodologies et compétences métiers (en effet, la complexité sera permise par la bonne intégration de nouvelles méthodologies de conception, ainsi que par leur automatisation au travers des logiciels de CAO et de FAO). Aujourd'hui, seulement 20 % des pièces issues de la fabrication additive sont reconçus, tandis que ce chiffre devrait atteindre les 60 % à l'horizon 10 ans.

Il convient de noter par ailleurs que les acteurs travaillent généralement avec des matériaux utilisés couramment afin de rassurer le marché, bien que ce choix puisse parfois être remis en question. Au même titre que pour la conception, la situation actuelle n'est pas représentative de ce qu'il sera possible de faire à l'avenir et une grande partie des pièces qui seront produites dans dix ans n'existent pas aujourd'hui. Ainsi, les importants progrès réalisés sur la partie logicielle (qui devrait arriver à maturité dans les cinq ans selon les industriels) devraient aider à lever l'un des principaux verrous de la fabrication additive : celui du raisonnement en termes de fonctionnalités lors des étapes de conception.

En gardant à l'esprit qu'il a fallu près de trois ans à un groupe tel que Michelin pour déployer une unité centralisée de production additive comportant une vingtaine de machines pour produire des millions de pièces avec une qualité identique grâce à une mise sous contrôle du procédé, les leviers de développement prioritaires de ce scénario sont les suivants :

- Faible capacité du procédé pour produire en série des pièces de qualité identique : il existe une véritable incertitude quant à la répétabilité de la production de pièces à machines, paramétrages et matières identiques ;
- Un constat fort : Les machines actuelles souffrent d'un mauvais positionnement, ni adapté pour le prototypage, ni pour la production industrielle :
 - o Nécessité d'améliorer la capacité industrielle à s'appropriier la technologie mais aussi à transformer et à retravailler le procédé à l'image de Materialise ou FMAS ;
 - o Un besoin de développement des machines industrielles pour augmenter la productivité globale.
- Réduction des opérations de post-traitement : dans certains cas, environ 50 % du coût des pièces FA sont liés au parachèvement et au contrôle. D'ici dix ans, ce chiffre pourrait se réduire à 30 %. Cela peut passer, par exemple, par l'élimination des supports grâce à des stratégies de fusion.

Enfin, la question de la qualification et de la validation des matériaux et des pièces est un problème récurrent dans l'industrialisation de la fabrication additive, notamment dans les secteurs de l'aérospatial et du médical. À titre d'exemple, il n'est pas possible de mélanger plusieurs lots de matières pour ces raisons, ce qui entraîne des pertes matières importantes.

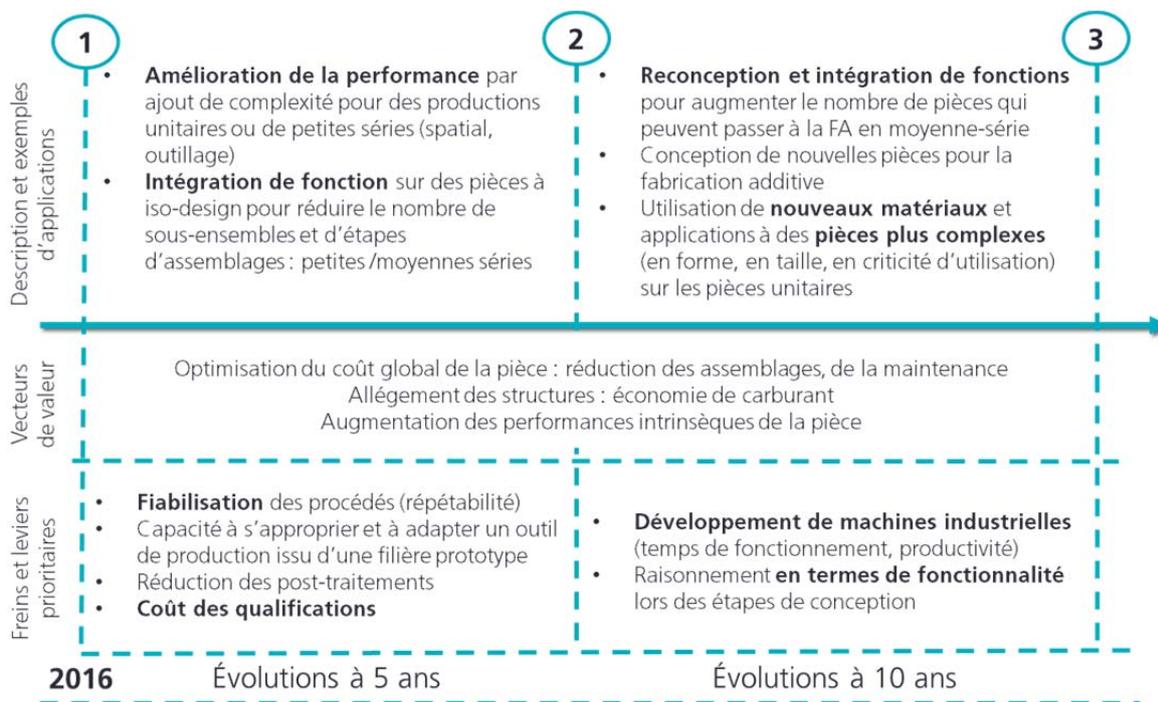


Figure 69 : Production série et gain de performances

Exemple de la fabrication d'un tableau de bord²¹⁴ :

- Illustration du scénario 3 : des gains de performance au niveau de la chaîne de production.

Introduction

L'analyse est ici menée sur le cas des outillages pour les casquettes de compteurs, il s'agit de pièces de dimensions moyennes de l'ordre 165 x 40 x 175 mm pour une masse de près de 14 kg.



²¹⁴ Synthèse de l'analyse de pièces réalisées par l'IPC, partenaire du consortium. Analyse complète disponible en annexe.

L'utilisation de la fabrication additive pour la réalisation des empreintes de moule a permis d'accélérer le temps de reprise d'usinage, de diminuer les temps de cycle et d'améliorer l'aspect de la pièce. Le retour sur investissement peut être immédiat car le surcoût lié à la fabrication additive est immédiatement amorti par la suppression d'une étape de peinture.

Comparaison avec les procédés conventionnels

Les casquettes de tableaux de bord sont traditionnellement fabriquées en deux étapes : tout d'abord, la fabrication de l'outillage consiste en plusieurs opérations d'usinages d'un bloc d'acier à outillage pour les empreintes et de plaques de moules pour la carcasse. Ensuite, la pièce plastique est fabriquée par injection plastique de polyamide.

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

Dans ce cas, la fabrication additive a permis de réduire le temps de cycle de 35 %. Le refroidissement étant plus rapide et surtout plus homogène, l'étape de peinture a pu être supprimée ce qui a permis de réduire le coût unitaire des pièces. La meilleure gestion thermique a également permis de réduire de 50 % le temps de mise au point de l'outillage ce qui représente l'une des plus grosses économies sur l'outillage, les mises au point étant très onéreuses.

L'empreinte de moule a été fabriquée par fusion laser de poudres métalliques (SLM) car c'est la seule technologie de fabrication additive métallique qui permet la réalisation de pièces incluant des canaux de régulation à géométries complexes en utilisant un matériau compatible avec les sollicitations d'un outillage d'injection plastique à savoir l'acier *maraging*. Le retour sur investissement a été quasi immédiat du fait de la suppression de l'étape de peinture.

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

Les verrous majeurs à l'adoption de la fabrication additive sont :

- **Le surcoût des empreintes** par rapport aux méthodes de fabrication « classiques » (de 20 à 30 %) ;
- **L'acier *maraging* disponible sur les machines de fusion laser n'est pas un acier usuel** dans le milieu de l'outillage (H11 ou H13 par exemple) ce qui provoque quelques craintes quant à la tenue en service des pièces ;
- **La méconnaissance des possibilités de la fabrication additive** dans le domaine de l'outillage ralentit sa démocratisation.

Les trois verrous exprimés précédemment devraient être levés peu à peu dans les prochaines années du fait de :

- La diminution du prix des machines et de la matière première (poudres métalliques) ;
- L'amélioration des technologies afin de pouvoir utiliser une plus grande variété de matières premières (notamment des matières usuelles) ;
- La démocratisation et les preuves de concepts liées à l'emploi de la fabrication additive dans le domaine de l'outillage.

Un scénario continuiste envisageable est la généralisation de la fabrication additive dans le domaine des outillages.

Impacts sur la chaîne de valeur

Pour l'outillage, la fabrication additive n'a que peu d'impacts sur la chaîne de valeur car cela représente simplement une nouvelle façon de répondre au besoin de régulation thermique des empreintes de moule.

Focus sur le grand public, l'artisanat et les biens de consommations

Pour les applications grand public et les biens de consommation, le développement de la fabrication additive selon ce scénario semble très limité à court terme. En effet, l'adoption de la technologie représente des investissements importants en plus de la machine (post-traitement, intégration de la chaîne logistique) et les producteurs de biens de consommation privilégient souvent une stratégie de gros volumes.

La demande dans les cinq années à venir porte plutôt sur la fabrication d'outillages de présérie et de série pour augmenter les cadences de production des procédés actuels (meilleure régulation thermique obtenue grâce à des canaux de refroidissement plus complexes et l'intégration de capteurs à l'intérieur de l'outillage. Dans la mesure où les gains de performances apportés par une reconception de la pièce sont relativement plus limités et répondent à des besoins très restreints voire inexistant, ce scénario ne devrait pas être moteur pour ces applications. À titre d'exemple, en ce qui concerne les petits professionnels et le grand public, les designers commencent à repenser leur conception mais n'utilisent toujours pas l'optimisation topologique ou le DfAM (Design for Additive Manufacturing) dans son ensemble. Une réelle adoption semble difficile à envisager ici avant une dizaine d'années.

Exemple de la fabrication de mobilier de jardin²¹⁵ :

- Illustration du scénario 3 : application aux biens de consommation.

Introduction

La fabrication de mobilier de jardin en plastique (table, chaise...) requiert l'utilisation de moules de très grandes dimensions (plusieurs mètres et plusieurs dizaines de tonnes). L'analyse est ici menée sur le cas des outillages destinés aux plateaux supérieurs de table de jardin en plastique, il s'agit de pièces d'environ 3 000 x 1 500 x 300 mm pour une masse de près de 30 tonnes.



Les temps de cycle de ces grandes pièces sont souvent imposés par les points chauds lors de l'injection, c'est-à-dire les zones avec une mauvaise régulation thermique. La fabrication additive permet de réguler de façon optimale les zones les plus complexes de ces moules.

Comparaison avec les procédés conventionnels

Les plateaux supérieurs de tables de jardin sont traditionnellement fabriqués en deux étapes : tout d'abord, la fabrication de l'outillage consiste en plusieurs opérations d'usinages d'un bloc d'acier à outillage pour les empreintes et de plaques de moules pour la carcasse. Ensuite, la pièce plastique est fabriquée par injection plastique de polypropylène chargé CaCO₃.

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

Les moules de grandes dimensions présentent des pièces avec des détails parfois difficiles à réguler dans l'outillage. La première zone intéressante pour un outillage régulé est le canal d'arrivée de la matière plastique fondue. Une régulation efficace de la « carotte » permet de diminuer les temps de cycle de plusieurs secondes.

Les gains attendus sont un temps de cycle inférieur (extrêmement important vu le taux horaire des presses utilisées), une qualité de pièce supérieure et un nombre de cycles de démarrage réduit.



Le moule (carcasse + empreintes) devra être fabriqué par les méthodes conventionnelles (fonderie, usinage...). Il sera cependant utile de rajouter des systèmes de régulation conforme fabriqués par fusion laser de poudres métalliques (SLM). Ces systèmes de régulation optimisée permettront d'augmenter la qualité des pièces avec des refroidissements plus homogènes sur la pièce plastique.

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

Les verrous majeurs à l'adoption de la fabrication additive sont :

- La dimension maximale des pièces en fusion laser ;
- Nécessité d'ajouter des étapes (fabrication, finition et assemblage) pour la réalisation des inserts réalisés en fabrication additive ;
- L'assemblage des inserts dans le moule ;
- Réticence quant à la tenue en service des pièces en acier *maraging* ;
- Méconnaissance des possibilités de la fabrication additive dans le domaine de l'outillage.

²¹⁵ Synthèse de l'analyse de pièce effectuée par l'IPC, partenaire du consortium. Analyse complète disponible en annexe.

Les verrous exprimés précédemment devraient être levés peu à peu dans les prochaines années du fait de :

- La diminution du prix des machines et de la matière première (poudres métalliques) ;
- L'augmentation des volumes de fabrication ;
- Amortissement du surcoût dès la mise au point de l'outillage avec une gestion thermique de l'outillage optimisée ;
- L'amélioration des technologies afin de pouvoir utiliser une plus grande variété de matières premières (notamment des matières usuelles).

Impacts sur la chaîne de valeur

Pour l'outillage, la fabrication additive n'a que peu d'impacts sur la chaîne de valeur car cela représente simplement une nouvelle façon de réaliser la régulation thermique des inserts situés au niveau des points chauds du moule.

Conclusions et enseignements :

- Dans l'aéronautique ou le ferroviaire, 2 à 5 % des pièces devraient trouver un modèle économique pour passer en fabrication additive dans les cinq à dix ans ;
- Un scénario qui devrait se développer à court terme selon deux axes :
 - Une généralisation des outillages complexe qui justifient l'utilisation de la fabrication additive pour augmenter les performances des procédés conventionnels sans pour autant impacter l'ensemble des pratiques,
 - Une phase d'apprentissage et de validation sur la fabrication additive directe à iso-design (comme pour l'outillage il y a plusieurs dizaines d'années) avant de se lancer sur la reconception ;
- Freins : machines industrielles, répétabilité du procédé, post-traitement, conception.

Scénario 4 – Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande

Les technologies de fabrication additive vont être à l'origine de nombreuses transformations au niveau de la chaîne de valeur des produits et services. Ces transformations se matérialiseront notamment par une flexibilité nouvelle des outils de production, autorisant une production à la demande et une évolution profonde de la chaîne logistique et des territoires.

Alors que la réduction des stocks ou des coûts de transport grâce à la fabrication additive représentent des opportunités intéressantes, les principaux vecteurs de valeur de ce scénario reposent sur la réduction du temps d'immobilisation des actifs d'exploitation ou de production en cas de rupture d'approvisionnement de pièces détachées et/ou obsolètes. En effet, la fabrication additive offre la possibilité d'effectuer des réparations malgré des obsolescences possibles (procédés, fournisseurs ou matériaux non disponibles) pour un coût et un délai bien plus intéressant que dans le cas d'une réindustrialisation. Cependant, la gestion des obsolescences soulève un certain paradoxe : le besoin d'avoir à disposition des matériaux relativement anciens pour réparer des pièces en aéronautique ou dans le ferroviaire est réel mais ce sont souvent des alliages bas de gamme qui ne représentent pas des volumes suffisants pour convaincre les producteurs de matières.

Notre analyse tend à conclure sur le fait que, selon ce scénario, la production devrait pouvoir à moyen terme être relocalisée à proximité des zones géographiques où se situe le besoin, sous forme de mini-usines capables de concentrer les équipements nécessaires, partagés entre plusieurs clients utilisateurs à l'image du parc d'activités nouvelles génération Lil'Aeroparc qui prévoit d'accueillir les premières entreprises à l'horizon 2020.

Dans un premier temps, les procédés additifs devraient alors impacter prioritairement le secteur de la réparation et de la maintenance, ainsi que toutes les pièces simples en position de stock mort. L'objectif est alors de proposer une disponibilité rapide de produits en rupture d'approvisionnement ou obsolètes, sans obligatoirement impliquer une production sur le lieu d'utilisation à court terme. Progressivement, il sera possible d'apporter la flexibilité des procédés additifs aux pièces plus complexes pour une baisse des stocks généralisée.

Ces évolutions auront toujours lieu en premier pour les pièces les plus simples et les moins critiques pour évoluer progressivement vers des pièces plus complexes et à plus fort enjeu. Dans une dynamique similaire à celle du scénario précédent, les évolutions impliquant une production distribuée, mais concentrée au sein de mini-usines, seront dépendantes du développement de machines plus industrielles et plus fiables en intégrant ici une notion plus importante de flexibilité, si celles-ci sont partagées entre plusieurs clients.

Dans le cadre de produits qui demandent un très bon aspect esthétique, il existe un véritable goulot d'étranglement au niveau des moyens de post-traitements et de contrôle qualité qui ne permet pas d'envisager la production distribuée et atomisée avant au moins une dizaine d'années. En effet, la maturité actuelle de la technologie implique de nombreuses opérations de finition et donc des équipements supplémentaires qui ne peuvent pas être installés chez chaque utilisateur final pour des raisons économiques évidentes. Cependant, suivant le produit, des tolérances esthétiques devront être acceptées afin de permettre le déploiement de la technologie. Ainsi, les premières pièces ciblées dans l'automobile par exemple sont des pièces non visibles et qui – à partir du moment où elles sont techniquement conformes – pourront se passer de post-traitement. Aujourd'hui, il est d'ailleurs plus intéressant d'aller faire fabriquer sa pièce dont l'aspect esthétique est primordial en Espagne ou Roumanie car les coûts de post-traitements sont moindres du fait des opérations manuelles et du coût de la main-d'œuvre associé. Il est ainsi possible d'envisager, dans un premier temps, une relocalisation plus forte à l'échelle macrorégionale (zone euro-méditerranée) dépendante des niveaux concurrentiels des coûts salariaux sur les différentes zones géographiques de proximité.

Dans le médical par exemple, le faible nombre d'unités rayons gamma pour la stérilisation d'implants sur le territoire est un frein à la production distribuée dans les hôpitaux. De ce fait, il

est difficile d'imaginer un garagiste ou un acteur de la maintenance aéronautique pouvoir faire produire ses propres pièces détachées avant 15 ans, sans oublier les questions évidentes de sécurité et de réglementation que cette production atomisée et distribuée soulève.

Un scénario pourrait se dégager à moyen terme sur des pièces non critiques aux fonctionnalités dégradées dans les cas où le client final accepte un état de surface limité : des réflexions concernant les objets de liaison pour l'assemblage aéronautique ou des pièces détachées pour des véhicules utilitaires ont été lancées en ce sens. En considérant que l'ensemble des opérations de post-traitements ne pourra pas être supprimé, l'automatisation et l'intégration du parachèvement au sein de machines hybrides se présentent comme de vrais leviers de développement pour l'implantation d'unités de production indépendantes chez l'utilisateur. En effet, si on commence à entrevoir des développements en ce sens à l'image de la machine MetalFab1 (Additive Industries) ou des ateliers clés en main de FMAS, une miniaturisation de ces dispositifs est importante pour faciliter l'adoption de ce scénario en 2030.

Cette évolution étant certainement la plus disruptive et à plus fort impact pour les économies et les territoires sur le plan industriel, elle soulève en parallèle la question des leviers suivants :

- Répétabilité de la production : pour que le modèle de la production distribuée ait un sens, il faut pouvoir produire la même pièce avec une qualité identique indépendamment du lieu de fabrication. La maturité actuelle de la technologie ne permet pas de l'envisager à court terme.
- Qualification de la fabrication additive pour gérer la fin de vie des nouvelles pièces dans plusieurs dizaines d'années : la reconception des pièces (obsolètes ou non) et le développement de nouveaux produits offrent la possibilité de qualifier plusieurs procédés dont la fabrication additive pour gérer la fin de vie du produit. Cela représente certainement le levier le plus fort pour une adoption à l'horizon 2025 dans la mesure où il sera alors beaucoup plus facile de fabriquer les pièces détachées en additif puisqu'elles auront été pensées pour (même si la production série se fait initialement par un procédé conventionnel).
- Ce scénario pose la question de la caractérisation des nouveaux modèles économiques émergents (vente de licence, de modèles 3D de pièces, de plans...). Les problématiques de protection des données seront ici centrales et déterminantes pour l'avènement de ce scénario.

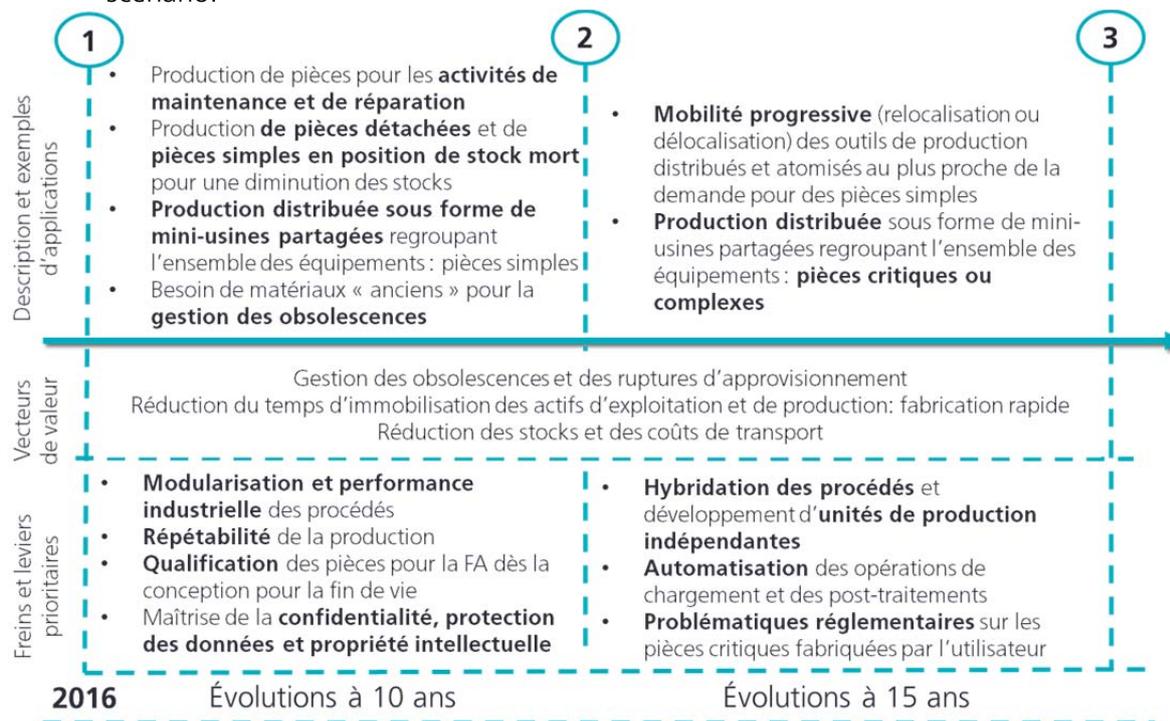


Figure 70 : Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande

Exemple de la fabrication d'implant crânien²¹⁶ :

- Illustration du scénario 2 : un cas de sur-mesure, ou personnalisation unitaire ;
- Illustration du scénario 4 : une transformation de la chaîne de valeur.

Introduction

L'analyse est ici menée sur le cas des implants chirurgicaux en céramique pour la reconstruction osseuse faciale/crânienne. Il s'agit de produits qui présentent des dimensions allant jusqu'à 150 x 150 x 5 mm et un poids pouvant atteindre 300 g. La fabrication additive d'implants crâniens ou maxillo-faciaux en céramique permet d'obtenir rapidement un implant sur-mesure, durable, facilitant l'ostéo-intégration, à partir de l'image du scanner du patient.

Dans ce domaine, l'avantage procuré par la FA vient principalement des nouvelles fonctions qui peuvent être conférées à l'implant, ainsi que de la possibilité de réaliser des pièces de surface supérieure à 25 cm² (en cas d'impossibilité de prélever un greffon sur le patient). Le rôle du chirurgien devient également prépondérant et conduit à un rapprochement fort entre professionnels de santé et fabricants de dispositifs médicaux.



Comparaison avec les procédés conventionnels

Les implants chirurgicaux pour la reconstruction osseuse faciale/crânienne sont traditionnellement fabriqués par moulage ou usinage en plusieurs semaines et quasi systématiquement en production unitaire (l'implant crânien est par définition une pièce unique).

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

La chirurgie réparatrice crânienne ou maxillo-faciale requiert des implants sur-mesure pour s'adapter à l'anatomie de la perte osseuse. Pour cette raison, la réalisation des implants par fabrication additive apporte de réelles améliorations par rapport aux procédures conventionnelles : sur-mesure et rapidité d'exécution par rapport aux méthodes de moulage et d'usinage ; implants de grande taille, diminution des temps d'hospitalisation et des risques infectieux par rapport aux autres méthodes de greffe osseuse.

L'utilisation de technologies de fabrication additive des céramiques permet notamment de réaliser des pièces légères, biocompatibles et favorisant la repousse osseuse. Dans ce cas, la porosité de l'implant est structurée de façon particulière pour une meilleure ostéo-intégration.

L'utilisation des technologies de fabrication additive permet dans un premier temps d'obtenir un implant de synthèse parfaitement adapté à la morphologie de la perte osseuse. De plus, les technologies FA permettent d'augmenter la complexité des implants en comparaison aux méthodes de fabrication par moulage ou usinage, ce qui conduit à des améliorations sensibles, par exemple en allégeant le poids de la pièce par des évidements, tout en garantissant la résistance mécanique des zones de plus faibles épaisseurs.

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

- **Un gain de prix qui n'est pas immédiat** : Les coûts des implants issus de la FA sont similaires voire légèrement supérieurs aux coûts de ceux réalisés par des méthodes conventionnelles. Toutefois, les avantages intrinsèques des implants céramiques réalisés par fabrication permettent d'envisager des diminutions importantes des temps d'hospitalisation et des coûts sociétaux sur le long terme ;
- **Implication du praticien dans la fabrication selon un mode opératoire nouveau ;**
- **Une nouvelle solution qui a nécessité plus de 10 ans d'études cliniques ;**
- Une diminution du temps de fabrication aux impacts limités.

Impacts sur la chaîne de valeur

Le design spécifique et individualisé pour chaque implant n'est possible que si le chirurgien, qui a l'expertise nécessaire, devient coconcepteur de l'implant. Deux scénarios sont alors possibles : soit l'implant est conçu et réalisé en milieu hospitalier et ceci demandera des évolutions des réglementations pour les dispositifs médicaux, soit la conception devient collaborative entre professionnels de santé et entreprises, ce qui nécessitera probablement une évolution organisationnelle

²¹⁶ Synthèse de l'analyse de pièce réalisée par le CTTC, partenaire du consortium. Analyse complète disponible en annexe.

des uns et des autres. Cette démarche de cocréation devrait impliquer davantage une relation de proximité avec le fabricant de dispositifs médicaux sans toutefois aller jusqu'à fabriquer à l'hôpital à court terme.

Focus sur le grand public, l'artisanat et les biens de consommations

La fabrication additive représente une opportunité pour lutter contre l'obsolescence programmée dans les biens de consommation ou le petit électroménager, par l'exploration d'un nouveau créneau de marché présentant des marges de rentabilité. Ces applications impliquent des petits volumes de pièces accessoirisées sur des centaines de références et un danger relativement plus faible pour le consommateur. Il est probable que l'adoption de la fabrication additive se développe selon ce scénario à court ou moyen terme chez les fabricants afin non seulement de réduire les stocks mais aussi et surtout de fidéliser le client et de renforcer l'image de marque en offrant la possibilité à l'utilisateur de réparer son bien au lieu de le jeter. Ce modèle économique est relativement difficile à chiffrer mais semble être une réalité à plus court terme (surtout sur les pièces plastiques) que la fabrication personnelle.

En effet, l'impression d'une pièce détachée par le consommateur semble peu envisageable avant cinq à dix ans dans la mesure où celui-ci est encore peu sensibilisé et ne dispose pas de machines suffisamment performantes (en termes de qualité de surface par exemple). La fabrication à destination des particuliers pourrait être favorisée par un changement de l'environnement comprenant par exemple un accès simple aux banques d'objets 3D mis à disposition par les équipementiers, le développement de technologies de scan 3D pour smartphone de meilleure qualité (les solutions actuelles impliquent des reprises importantes et ne sont pas accessibles au grand public).

Par ailleurs, il est important de garder en tête que beaucoup de consommateurs préfèrent actuellement payer pour avoir un objet fini et de bonne qualité plutôt de le fabriquer eux-mêmes. Un très bon exemple porte sur les imprimantes photos personnelles qui connaissent aujourd'hui un creux de désillusion : la mauvaise qualité d'impression, le prix élevé des cartouches d'encre et la consommation importante ont favorisé l'émergence de bornes d'impression ergonomiques dans les centres commerciaux ou les bureaux de presse et le recours à un professionnel pour faire son tirage photo.

La proximité entre le lieu de production et d'utilisation peut amener une personnalisation de l'objet ou un service différent d'une production classique plus centralisée. Si on peut produire localement, on peut créer des communautés locales qui produisent et consomment. Ces communautés peuvent mettre en place une logique qui n'est plus une logique de marché mais une logique de besoin et pourraient petit à petit créer un écosystème productif durable. Les artisans commerçants peuvent répondre au besoin et ont vraiment une place à prendre sur ce segment de la fabrication additive.

Enfin, les artisans et les commerces de proximité semblent avoir une place à prendre sur ce scénario de développement de la fabrication additive dans la mesure où ils peuvent répondre au besoin de proximité et développer une forme d'économie de quartier. Faire fabriquer par ces intermédiaires locaux avant d'envisager l'impression par le particulier est plus probable. Des initiatives de mises en relation entre professionnels et particulier et de modèles d'affaires C2C²¹⁷ ont vu le jour ces dernières années à l'image de 3DHubs. Cependant, on peut se demander si cet avenir n'est pas encore trop lointain et si ces acteurs ne se sont pas lancés trop tôt.

²¹⁷ Consumer To Consumer : échanges de biens et de services entre plusieurs consommateurs sans passer par un intermédiaire.

Exemple de fabrication de pièces en céramiques²¹⁸ (arts de la table ou sanitaire) :

- Illustration du scénario 3 : des gains de productivité et une capacité d'innovation renforcée ;
- Illustration du scénario 4 : une nécessité d'adaptation profonde de la chaîne de valeur et des opportunités de mobilité des outils de production.

Introduction

L'analyse est ici menée sur le cas des pièces de céramique traditionnelle destinées aux sanitaires ou aux arts de la table. Il s'agit de produits qui présentent des dimensions allant jusqu'à 1800 x 800 x 500 mm et un poids pouvant atteindre 30 kg. Dans un contexte international fortement concurrentiel, la fabrication française d'articles céramiques à usage domestique recentre ces productions sur des produits haut de gamme « Made in France », impliquant des pièces de plus en plus complexes et une diminution des séries. De ce fait, les méthodes de fabrication conventionnelles ne sont pas adaptées à cette évolution, notamment parce qu'elles imposent la fabrication de modèles puis d'outillages au sein d'un processus long et coûteux.



Comparaison avec les procédés conventionnels

Les pièces de céramique traditionnelles sont fabriquées par le procédé de moulage en plâtre ou coulage sous pression. Les matériaux le plus souvent utilisés sont la porcelaine et le grès et les opérations de mise en forme sont régulièrement organisées au sein d'un mode de production centralisé chez le fabricant.

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

L'intérêt de la fabrication additive est ici de substituer certaines étapes des procédés conventionnels de conception et de fabrication de pièces céramiques par des étapes de conception et fabrication numérique, sans recourir à la fabrication de modèles ou d'outillages (moules). Ce scénario mènerait à des gains significatifs pour la durée de la phase de conception (- 50 % environ), ainsi que pour les coûts de production pour les petites séries (de - 20 à - 50 %).

Pour parvenir à l'adoption des technologies de la fabrication additive et obtenir les gains de productivité attendus, c'est cependant toute la chaîne de valeur qui doit évoluer : fournisseurs de matière première, bureaux d'études, équipementiers, manufacturiers.

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

Les technologies additives ne sont pas adaptées en l'état au secteur des céramiques traditionnelles. Ces technologies doivent être développées spécifiquement pour la céramique et intégrées à un procédé de fabrication plus large que la seule étape de mise en forme. Les verrous techniques sont notamment :

- **L'inexistence de matières premières** à la fois adaptées aux technologies additives et aux prérequis pour des applications céramiques (couleur, procédé de cuisson, résistance mécanique, coût faible, recyclabilité...). En effet, les acteurs sont aujourd'hui obligés de retraiter la matière et de préparer leur pâte céramique ;
- **Des procédés qui n'intègrent pas forcément les spécificités des céramiques** (poudres ultrafines, frittage haute température, sensibilité aux chocs thermiques...);
- Un traitement de la chaîne numérique qui doit **tenir compte des forts retraits observés lors du frittage et d'éventuelles déformations.**

Le business model de la plupart des équipementiers de la FA qui recherchent une valorisation forte des matières n'est pas en phase avec la chaîne de valeur des céramiques traditionnelles, les usines manufacturières achetant des matières disponibles en fort tonnage et à des coûts faibles.

L'adoption des technologies de la fabrication additive nécessite ainsi une offre complète sur toute la chaîne de valeur : matière, équipement, produit, service, formation. Cela implique donc une transformation profonde de la filière, envisageable à un horizon de cinq – dix ans.

²¹⁸ Synthèse de l'analyse de pièce réalisée par le CTTC, partenaire du consortium. Analyse complète disponible en annexe.

Impacts sur la chaîne de valeur

La chaîne de valeur est potentiellement impactée à tous les niveaux par l'arrivée de ces technologies. Les équilibres sont toutefois conservés et l'effet direct pour tous les acteurs est une augmentation de la compétitivité des entreprises, un positionnement renforcé sur le haut de gamme et l'innovation, ainsi que des possibilités de croissance importante.

Conclusions et enseignements :

- Scénario le plus disruptif et le plus impactant pour les territoires mais qui ne devrait pas se concrétiser avant une dizaine d'années ;
- Les marchés des pièces détachées et de la maintenance représentent des volumes d'activités importants pour la fabrication additive ;
- Un véritable enjeu pour intégrer dès à présent la fabrication additive dans les stratégies de fin de vie des pièces (obsolescences, rupture d'approvisionnement) pour développer ce scénario dans 10 ans ;
- Freins prioritaires : opérations de post-traitement, répétabilité du procédé.

Impact des scénarios prospectifs sur les différents marchés d'intérêt

Ce travail de synthèse cherche à établir une vue d'ensemble des principales tendances dégagées lors de cette étude, sans pour autant prétendre à la validation définitive du potentiel des différents scénarios sur les segments de marché analysés. En effet, au sein d'un même marché et pour des matériaux similaires, les acteurs peuvent adopter une stratégie de développement et un positionnement tout à fait différents : c'est le cas notamment d'Airbus et de Safran où le premier semble orienter ses réflexions sur les pièces de grandes tailles tandis que le second sur des pièces complexes à haute valeur ajoutée.

Scénario Marché	Prototypage et expérimentation	Personnalisation	Production série et gain de performance	Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande
Aérospatial	Moyen (nouveaux matériaux, pièces de grandes tailles)	Faible (niche sur l'aviation de luxe, intérieurs)	Fort (allègement, intégration de fonction)	Fort (gestion des obsolescences, réduction du temps d'immobilisation)
Médical	Faible	Fort (segment porteur de la personnalisation)	Moyen (introduction de porosités sur certaines pièces)	Moyen (production d'implant à l'hôpital peu probable, réduction du stock sur certaines prothèses)
Outillage	Fort (segment porteur à court terme)	Faible	Fort (canaux de régulation et introduction de capteurs)	Faible (le procédé conventionnel est toujours utilisé)
Automobile	Faible	Faible (niche sur le sport automobile et le haut de gamme)	Moyen (variation d'alvéoles, pot catalytique)	Moyen (segment de la pièce détachée non critique)
Bien de consommation et grand public	Faible (moins de 5 % de la population)	Moyen (réalisé par un prestataire en impression 3D)	Faible	Faible (la fabrication personnelle pas envisagée avant 2030)
BTP	Moyen	Faible	Moyen (peaux de coffrages et corniches complexes)	Moyen (construction d'habitat sur site)
Énergie	Faible	Faible	Moyen (intégration de fonctions : échangeurs et microfluidique)	Fort (réparation)
Ferroviaire	Faible	Faible (la mise en concurrence des TER pourrait être un facteur de développement)	Faible	Fort (gestion des obsolescences, réduction du temps d'immobilisation)

Tableau 14 : Évaluation de l'impact des scénarios prospectifs sur les différents marchés cibles de l'étude

Conclusion : des scénarios mixtes, de l'intégration des compétences à une réorganisation productive d'envergure

Les scénarios, tel qu'ils ont été définis, cherchent à expliciter des usages indépendants avec un fort potentiel de complémentarité. Ainsi, au sein de l'ensemble des secteurs industriels concernés, il sera possible d'observer de nombreuses combinaisons différentes avec des temporalités d'avènement tout à fait différentes suivant les contraintes industrielles propres à chacun. Ainsi, la fabrication additive va inévitablement évoluer selon des scénarios mixtes, impliquant par exemple la production de pièces complexes et personnalisées au plus proche de la demande à l'horizon 2030.

Les facteurs transverses, qui n'ont pas tendance à favoriser l'évolution d'un scénario plus qu'un autre, n'ont pas été considérés comme leviers de développement prioritaire dans l'analyse prospective et ont été plutôt disséminés tout au long de ce rapport. C'est notamment le cas des questions liées au recyclage de la matière, aux aspects qualité-sécurité-environnement, ou de la propriété intellectuelle. En revanche, il est important de garder en tête que ces problématiques transverses peuvent potentiellement freiner, voire stopper, le processus d'adoption de la fabrication additive. En effet, après avoir développé en détail chacun des scénarios prospectifs, il semble judicieux d'imaginer ici le cas pessimiste où la technologie ne se développe pas.

Il existe ainsi des facteurs considérés comme non bloquants mais qui ont le potentiel de remettre profondément en question la diffusion de la technologie :

- L'absence de réglementation précise sur les licences et les droits de propriété intellectuelle associés aux produits de la fabrication additive et à la responsabilité de l'ensemble des acteurs provoque une véritable incertitude. En cas de défaillance ou de problème, il n'y a ainsi pas de cadre juridique permettant aux assurances de se positionner sur le sujet. Ainsi, si les industriels admettent être conscients du risque et impliquer de plus en plus de juristes dans les réunions sur la fabrication additive, les aspects liés à la sécurité des modèles et la propriété industrielle ne sont pas considérés comme des freins majeurs. En revanche, une infraction majeure ou un procès très médiatisé impliquant des pièces contrefaites par impression 3D peut réellement avoir un impact négatif. La contrefaçon présente un caractère d'autant plus dangereux lorsqu'il s'agit de pièces de sécurité et le risque de voir des copies envahir le marché n'est pas une utopie. On peut avoir en tête notamment la première arme à feu fabriquée par impression 3D ;
- Encore peu investigués par les organismes en charge de la prévention des risques professionnels, les risques encourus lors de l'utilisation de la fabrication additive sont nombreux (composés chimiques toxiques, explosions) et laissent entrevoir la possibilité d'un accident ou d'un scandale qui ternirait l'image de la technologie. D'une explosion dans une usine du fait de l'accumulation de charges électrostatiques (ou du mélange de poudres métalliques avec l'air) au scandale sanitaire majeur via l'apparition des premiers cancers, le risque est réel. Paradoxalement, l'investissement pour atteindre ce niveau de sécurité nécessaire est trop important pour la plupart des acteurs de la filière qui mettent rarement en place les démarches associées ;
- Enfin, du fait de la faible maturité industrielle de la fabrication additive et le manque de recul sur le comportement en fatigue des pièces, on peut redouter des cas de ruptures de pièces imprimées en 3D en fonctionnement qui mettraient en danger des vies humaines. Cependant, ce risque n'est pas propre à la fabrication additive et peut être généralisé à toutes les innovations aussi bien matériaux que procédés.

Il est difficile aujourd'hui d'anticiper le comportement des acteurs industriels, politiques et grand public si des scandales de ce type venaient à apparaître. Cependant, si cela peut potentiellement freiner le développement de la filière fabrication additive, il est également probable que tous ces

risques soient considérés dans l'option générale comme la courbe d'adoption classique d'une nouvelle technologie et de progression des acteurs clés. Cela soulève par ailleurs la question d'interprétation par les politiques de développements des différentes zones géographiques à l'image du développement inégal des exploitations de gaz de schiste (massivement exploité aux États-Unis et considérablement freiné par les politiques sécuritaires européennes).

Une autre réalité industrielle semble toutefois se dégager à plus court terme : celui des gabarits, fixations et autres outillages d'assistances opérationnelles utilisés tout au long des processus de fabrication. En effet, dans un objectif de réduire les coûts tout en accélérant la production, les industriels vont être de plus en plus incités à fabriquer en interne ce type de pièces (principalement polymères dans un premier temps).

Par exemple, modéliser et produire par impression 3D une fixation soi-même plutôt que de l'usiner ou de faire exécuter cette opération dans un atelier externe permet de réduire considérablement le coût et le délai d'approvisionnement. Pour les acteurs un peu plus matures, la liberté de conception offerte par la fabrication additive devrait permettre d'augmenter les performances des différents outillages : le poids, l'équilibre et la position ont un impact direct sur le confort du technicien et la cadence des opérations de production et d'assemblage.

Déjà initié par BMW sur certaines de ses lignes de montage, ce scénario mixte combine l'ensemble des vecteurs de valeurs identifiés précédemment et se place dans une logique d'amélioration continue de la ligne de production, un exemple à suivre pour diffuser largement les technologies de fabrication additive dans les secteurs industriels et les territoires, en parallèle d'une pénétration plus marquée des outillages à haute performance (exemple des moules).



Figure 71 : Exemple d'outillage (fixation, préhenseur) réalisés par impression 3D (Source Strasys)

Cette évolution des pratiques est donc d'ores et déjà une réalité. Elle permet de faciliter l'intégration de ces nouvelles technologies dans l'industrie. Dans une vision plus prospective, des évolutions à plus fort impact sont cependant attendues.

Dans de nombreux cas d'application industriels, les opérations de maintenance impliquent en effet une centralisation des flux de pièces détachées en provenance de sous-traitants industriels et de fournisseurs extérieurs, avant une redistribution sur le territoire. L'intégration des technologies de fabrication additive permettra dans un premier temps de réduire les importations de pièces pour une production centralisée avant une redistribution en fonction du besoin. Dans un second temps, il sera possible d'envisager une production distribuée, au plus proche du besoin. On retrouve cette évolution sur le graphique suivant.

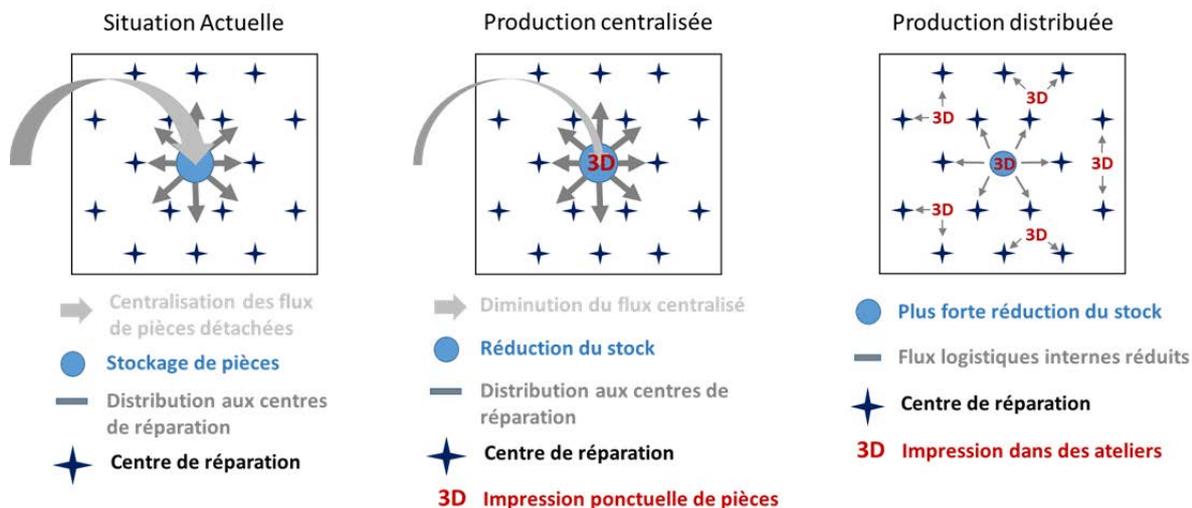


Figure 72 : Évolution possible de la chaîne logistique pour l'industrie des pièces détachées

Face à ces opportunités d'évolution et de mobilité des outils de production, plusieurs modèles de fonctionnement adaptés aux différents territoires devraient permettre de répondre à la demande.

Dans un premier temps, la cartographie, le référencement et la caractérisation des différents outils de production et compétences de notre territoire est un prérequis essentiel à une réelle réorganisation de la chaîne productive. En effet, les technologies de la fabrication du numérique incitent à des **coopérations transverses entre les acteurs**. Ces coopérations invitent alors l'émergence de **print factory**, sous le format d'investissements mutualisés entre différents industriels pour la mise en commun d'outils de production. Il s'agit là d'un scénario à moyen/long terme.

Il existe ainsi ici un arbitrage entre la gestion d'un réseau de fournisseurs et de partenaires pour l'accès à un assemblage de compétences décentralisées, et la gestion de plateformes mutualisées proposant les compétences et les outils permettant de répondre aux besoins industriels des territoires.

Une telle évolution continue de poser la question de la captation de la valeur ajoutée en lien avec le processus de production. En effet, avec la décentralisation progressive de la production industrielle, la répartition de la valeur ajoutée au sein de la chaîne de valeur du produit va être progressivement modifiée, en fonction des acteurs qui maîtriseront les nouvelles technologies de production.

Il peut s'agir du réparateur lui-même, d'un acteur tiers à proximité qui dispose d'outils de production mutualisés, d'un fournisseur local ou du fabricant qui gère à distance un outil de production installé chez le réparateur. Ces différents scénarios de capture de la valeur ajoutée associés au processus de production dépendront de la configuration des différentes chaînes de valeur concernées.

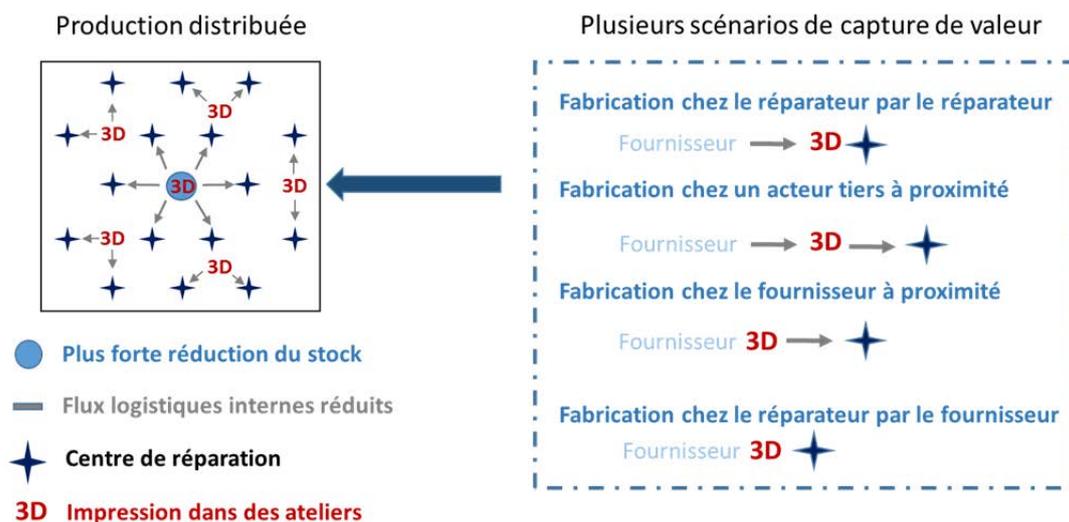


Figure 73 : Plusieurs scénarios de capture de la valeur ajoutée associés à la production décentralisée de pièces

La décentralisation progressive des outils de production, pour le marché des pièces détachées, devrait être un processus progressif au cours des prochaines années. Les autres domaines industriels seront vraisemblablement affectés par des mécanismes similaires (bien qu'adapté à chaque contexte spécifique), avec un important décalage temporel fonction de la réorganisation de la chaîne productive attendue.

Conclusions générales :

- La fabrication de maquette et le prototypage sont déjà ancrés depuis près de 30 ans dans les habitudes. Une adoption généralisée au sein des petites entreprises est attendue, sans pour autant représenter d'importants volumes ;
- Le segment le plus porteur à l'horizon de cinq-huit ans semble être la fabrication d'outillage, dans la mesure où le niveau de maturité actuel de la technologie permet d'augmenter les performances des lignes de production dans une démarche d'amélioration continue ;
- La fabrication directe à l'échelle industrielle est en cours d'émergence et ne devrait se développer qu'à partir de 2022-2025 ;
- L'impression personnelle par le particulier peut être rendue plus difficile à court et moyen termes, et passera certainement par une adoption préalable par les commerces de proximité.

RECOMMANDATIONS ET FICHES ACTIONS

Les propositions de recommandations et les fiches actions qui en découlent sont issues de l'ensemble des analyses développées dans ce rapport. En effet, l'identification des variables de développement et des verrous associés aux différents scénarios d'évolution a permis de dégager un ensemble de mesures à prendre à court et moyen termes pour accompagner la structuration de la filière française et augmenter la compétitivité de notre industrie sur le plan international. Les recommandations et les propositions d'action sont associées à un facteur de développement majeur et ont été hiérarchisées en fonction de leur impact économique, de leur degré de priorité, court, moyen ou long terme, et en fonction des acteurs qu'elles impliquent. Les fiches actions présentées ci-dessous ont été catégorisées par un code couleur en fonction de leur gamme et de leur portée : technologique (rouge), accompagnement (vert), visibilité (bleu) et formation (gris). Enfin, il est important de préciser que les recommandations sont issues d'un travail de réflexion prospective complémentaire aux travaux de l'Alliance pour l'industrie du futur et n'ont pas vocation à être exhaustive pour le développement de la filière.

Concernant la structuration des acteurs et dans l'objectif de porter la fabrication additive à une échelle industrielle en phase avec les exigences techniques et économiques des donneurs d'ordres, il est important de promouvoir de réelles stratégies de partenariat avec les acteurs de la sous-traitance, qui peuvent s'associer avec certains équipementiers pour bénéficier de leurs compétences industrielles, de leur connaissance des marchés cibles et d'une couverture géographique souvent mondiale. Afin de répondre aux problèmes de masse critique, la mise en réseau des sous-traitants est en effet essentielle. La fabrication additive est un outil supplémentaire et complémentaire pour la fabrication de pièces, et cela nécessite certaines compétences et une certaine expérience. Il est nécessaire d'intéresser les entreprises à ce sujet avant de mettre en place des actions de formation à grande échelle pour répondre à un besoin de main-d'œuvre qui reste à créer.

L'État devrait ainsi permettre de favoriser les expérimentations avec l'enseignement public. Il faut inciter les acteurs à travailler ensemble, avec des technologies qui peuvent fonctionner entre elles, et à différents niveaux. De telles expérimentations possèdent le potentiel de commencer un déploiement à grande échelle, qui semble nécessaire afin d'améliorer significativement la sensibilisation du grand public à ces nouvelles technologies, et ainsi d'en favoriser le développement.

Pour ce faire, il est essentiel que les différents territoires apportent un réel soutien aux différentes initiatives structurantes qui émergent progressivement, en réponse aux besoins locaux exprimés par les acteurs. Il n'est plus possible de laisser se développer indépendamment les différentes initiatives territoriales sans une réelle structuration nationale, au bénéfice global du développement de la filière.

Enfin, en ce qui concerne les freins transverses tels que les problématiques de santé, de sécurité ou encore de propriété intellectuelle, il est important de mentionner et de communiquer davantage sur les éléments et initiatives existantes à l'image du rapport de l'INPI actualisé chaque année. Une vulgarisation de ces sujets est par ailleurs attendue par ces organismes (table ronde, conférence et promotion des études existantes).

Par exemple, l'INPI a récemment collaboré avec la Fédération de la plasturgie et des composites à un livre blanc sur Impression 3D et propriété industrielle²¹⁹. En effet, le développement de la fabrication additive doit s'effectuer en limitant le plus possible ses effets néfastes pour la propriété industrielle des entreprises. Les enjeux identifiés de ce livre blanc sont la lutte contre la contrefaçon, et la responsabilité induite par la défektivité des produits imprimés (ou comment conserver une qualité produit ?). Des pistes opérationnelles pour les entreprises se font jour, et

²¹⁹ La Propriété industrielle de l'impression 3D dans la plasturgie et ses enjeux réglementaires, Fédération de la plasturgie et des composites en collaboration avec l'INPI et l'Alliance pour l'industrie du futur, <http://www.laplasturgie.fr/livre-blanc-plasturgie-impression-3d/>

seront forcément évolutives en fonction de l'avancée technologique de la fabrication additive et de modifications éventuelles du droit français et international.

Extrait des conclusions de l'étude concernant l'impression 3D et la question de la redevance pour copie privée :

Suite au rapport de l'INPI sur l'impression 3D²²⁰ et en réponse à la question de la redevance pour copie privée, il a été mis en avant que l'utilisation collective des imprimantes 3D fait de l'extension de la redevance pour copie privée une réponse inadaptée²²¹. Il est urgent d'adapter le statut des intermédiaires de l'impression 3D à l'évolution de leurs activités. Il est pour cela nécessaire de mener une réflexion par filière afin de mettre en place une offre légale spécifique à chaque type de produit.

Anne-Sophie Cantreau, avocate chez Alain Bensoussan Avocats, apporte également des pistes de recommandations afin d'éviter des litiges en matière de propriété intellectuelle et de responsabilité pour défectuosité des produits :

- Vérifier l'absence d'atteinte à des droits antérieurs par des recherches ;
- Veiller aux clauses de garantie et aux clauses de responsabilité dans les contrats et les conditions générales ;
- Surveiller les nouvelles techniques de traçabilité des produits et les normes associées.

Par ailleurs, le livre Dunod « Fabrication additive : du prototypage à l'impression 3D » recense de façon exhaustive les risques et les aspects liés à la sécurité pour chaque opération pour l'ensemble des familles de procédés. Afin de sensibiliser les agences nationales de sécurité telles que l'ASNM, ASN ou l'EPSF, un guide annuel impliquant des organismes tels que l'INERIS pourrait être créé selon le modèle de l'INPI. En dehors des aspects de propriétés intellectuelles qui ne font pas l'objet d'une fiche dédiée, les recommandations liées à la santé et à la sécurité seront détaillées dans la septième fiche. Au niveau du recyclage, si les utilisateurs de fabrication additive polymère recyclent en se basant sur les filières existantes, le développement des technologies métalliques peut être précurseur d'une nouvelle filière de retraitement des matières. Cependant, les industriels ne considèrent pas ces aspects comme stratégiques actuellement.

²²⁰ L'impression 3D et la question de la redevance pour copie privée, Fatima Ghilassene, Observatoire de la Propriété intellectuelle, Rapport du sous-groupe de travail « impression 3D » du CNAC ; Mars 2016.

²²¹ Suite aux conclusions de l'étude : L'impression 3D et la question de la redevance pour copie privée, Fatima Ghilassene, Observatoire de la Propriété Intellectuelle, Mars 2016.

Fiche action 1 : Soutenir la démarche de l'Alliance pour l'Industrie du Futur pour favoriser l'industrialisation des technologies en construisant une *roadmap* technologique

Objectif(s) :

- Industrialiser la fabrication additive selon le triptyque matériaux/procédés/contrôle

Pilote(s) :

- Alliance pour l'Industrie du Futur
- Contributeurs : industriels membres de l'AIF

Délai :

- À mettre en œuvre immédiatement (2017)
- Rédiger une *roadmap* de développement technologique pour prioriser et jalonner les programmes de R & D

Obstacle(s) :

- Réussir à hiérarchiser des axes de travail pour prioriser les investissements ;
- Éviter de réinvestir dans des technologies non stratégiques déjà maîtrisées dans d'autres pays.

- Sous-actions et étapes associées à la fiche : Au vu de la complémentarité avec l'initiative de l'AIF, il est important de mentionner et de soutenir l'action engagée par l'Alliance pour l'Industrie du futur. Il est nécessaire de prioriser les développements en construisant une *roadmap* technologique en phase avec les scénarios prospectifs et les leviers identifiés dans le cadre de cette étude. Dans un premier temps, un prérequis fondamental à cette action consiste à faire l'inventaire des projets en cours et des plateformes existantes en appréciant leur niveau de maturité, structurer la cohérence nationale de l'ensemble (en relation avec la fiche de l'action 2)
 - Lister et analyser les différentes *roadmaps* Européennes et internationales sur la fabrication additive ainsi que les grands acteurs européens et internationaux ;
 - Reprendre la *roadmap* AIF ;
 - Consolider ces *roadmaps* pour en tirer les grandes lignes ;
 - Mettre en avant les priorités, les jalons à atteindre avec des données quantifiées si possible et identifier un plan d'actions (après analyse des points obtenus dans la fiche 2).

Actions associées :

- Simuler la fabrication en environnement virtuel pour faciliter l'exécution ;
- Intégrer plus d'informations dans le fichier grâce à des formats moins restrictifs ;
- Dans un premier temps, viser l'augmentation du nombre de produits fabriqués de façon additive ;
- Augmenter le nombre de machines disponibles sur le marché *via* des actions de R & D pour adapter les machines existantes et/ou faire de la fabrication sur-mesure (les solutions actuelles sont issues d'une filière prototype, ce qui laisse prévoir de nombreuses améliorations en termes de vitesse par exemple) ;
- Optimiser les opérations de post-traitements afin de réduire le coût global de la fabrication additive ;
- Augmenter la stabilité du procédé grâce à une meilleure maîtrise de l'interaction matériau/procédé (grâce à une mise sous contrôle du procédé ou une modélisation des performances par exemple) ;
- Mettre en place une base de données mutualisée sur les caractéristiques mécaniques des pièces.

Fiche action 2 : Réaliser un bilan actualisé des sept familles de procédés et un guide d'aide à la décision à destination des entreprises

Objectif(s) :

- Pour les trois typologies de matériaux (polymères, métaux, céramiques), caractériser l'ensemble des opportunités d'application et les besoins de développements associés ;
- Informer les acteurs sur l'obsolescence rapide des technologies et éviter des investissements inutiles ;
- Prendre du recul par rapport à l'engouement actuel vis-à-vis des poudres et considérer la fabrication additive dans son ensemble.

Pilote(s) :

- Réseau des CTI, DGE, AIF
- Contributeurs : Centres techniques industriels

Délai :

- Action à démarrer rapidement (sur une durée de neuf mois)
- À actualiser chaque année

Obstacle(s) :

- Trouver le financement pour réaliser l'étude ;
- Difficulté à être exhaustif ;
- Coordination et consolidation des résultats ;
- Diffusion massive des travaux pour éviter les doublons.

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

- Effectuer une analyse comparative des performances permettant d'appréhender le potentiel des différentes technologies dans leur globalité (idéalement avec des exemples concrets sur des pièces de références) ;
- Réaliser un guide de bonnes pratiques et d'aide à la décision à destination des entreprises ;
- Mettre en place une démarche pour obtenir une maîtrise complète des aspects numérique/machine et matière ;
- Publier un rapport annuel sur l'avancement et l'obsolescence des technologies.

Fiche action 3 : Renforcer les actions de sensibilisation à tous les niveaux

Objectif(s) :

- Sensibiliser les acteurs à la fabrication additive à tous les niveaux ;
- Augmenter le niveau d'adoption des technologies de fabrication additive dans les PME et les artisans ;
- Réduire le risque de fracture numérique entre les gros industriels et les petits acteurs ;
- Orienter les financeurs sur les verrous technologiques à lever en priorité.

Obstacle(s) :

- Besoin de soutien de la part des structures locales et régionales.

3.1 : Sensibilisation du grand public

Pilote(s) :

- Réseau français des FabLabs (commission grand public à créer ?), création d'une commission grand public à l'AIF

Délai :

- À préparer pour 2017

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

- Inviter le grand public à des démonstrations gratuites ;
- Renforcer le rôle du réseau national des FabLabs en tant que nœud d'acculturation de la population
 - Organiser une journée nationale porte ouverte dédiée à la fabrication additive où la communication sera coordonnée et concentrée,
 - Participer à l'organisation de rencontres régionales pour que les gens se connaissent, échangent et travaillent ensemble.

3.2 : Sensibilisation des PMI

Pilote(s) :

- CCI, Pôles et régions
- Contributeurs : Centres techniques industriels, Plateformes Technologiques

Délai :

- À coordonner avec des démarches d'accompagnements complémentaires (cf. Fiche 5)

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

Cette action rentre bien dans le cadre des initiatives collectives régionales qui existent déjà sur d'autres sujets de soutien à l'industrie :

- Rappeler les aides disponibles sur le suramortissement des machines ainsi que l'amortissement accéléré (non limité aux robots) ;
- Dupliquer les initiatives du type Plan Performance PME de la région Rhône-Alpes « Premiers pas vers la fabrication additive pour les PME en région » pour sensibiliser et accompagner les acteurs du territoire dans leur opération de mutation technologique. Cette action, composée de huit demi-journées de *coaching* et de quatre journées de présentation des différents aspects de la fabrication additive est prise en charge à 65 %. Autre exemple, IPC s'est vu confier la construction et la mise en œuvre du programme *Starter Pack 3D*, dédié aux PME ;
- Sensibiliser les PME et les artisans au numérique et à la 3D (CCI, CMA) ;
 - S'appuyer sur les initiatives existantes (exemple du Cirtes et du projet FRI (DRP Méca – MEC 4.0) du Club Impression 3D ou de l'appel à manifestation d'intérêt du pôle Aerospace Valley et de la DIRECCTE Languedoc-Roussillon-Midi-Pyrénées pour accompagner les PME et ETI dans la réalisation d'études de faisabilité dans le domaine de la fabrication additive) ;
- Encourager les fabricants de machine à accompagner leurs clients dans leur démarche d'industrialisation avec une méthodologie de mise sous contrôle et de qualité.

3.3 : Sensibilisation des pouvoirs publics et des financeurs

Pilote(s) :

- Alliance pour l'Industrie du Futur
- Réseau français des FabLabs

Délai :

- À lancer rapidement pour pouvoir financer les actions opérationnelles

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

- L'Alliance pour l'Industrie du futur se positionne comme acteur leader sur les actions à dimensions industrielles. En effet, on ne peut pas imposer une démarche aux financeurs et aux collectivités mais il est possible de les informer intelligemment sur les besoins de la fabrication additive afin d'éviter le gaspillage et les doublons. On obtient ainsi une vraie identification de ce qui est investi et une garantie que les nouveaux investissements sont en phase avec les enjeux économiques et les forces déjà présentes sur le territoire ;
- Suite aux résultats obtenus en fiche 1, il sera important de travailler avec nos tutelles pour lancer des plans de financements (ANR, Carnot, IA, etc.)
 - La sensibilisation des financeurs publics à l'image de l'ANR, BPI afin de démontrer les enjeux associés au développement de la fabrication additive en France,
 - L'identification des axes majeurs où il faut investir pour faire progresser la filière ;
- Le Réseau français des FabLabs se positionne comme acteur *leader* pour développer la sensibilité et l'écosystème grand public par des actions davantage à dimensions territoriales et sociales telles que :
 - La sensibilisation des organismes de financement de la formation professionnelle tels que les OPCA,
 - La clarification des missions et du positionnement de chaque FabLab du territoire pour faciliter les financements complémentaires par l'État sur les missions du service public. En effet, ceux-ci devraient clarifier quelles contreparties économiques, de formation ou encore territoriales ils cherchent à développer.

Fiche action 4 : Faciliter le développement et l'accès à de nouvelles compétences en s'appuyant sur les plateformes, pilotes et FabLabs existants

Objectif(s) :

- Adaptation des profils des collaborateurs aux technologies et aux pratiques associées à l'impression 3D ;
- Créer une offre de formation professionnelle qualifiante pour les ingénieurs/techniciens/opérateurs déjà en poste ;
- Compléter l'offre de formation initiale encore très orientée vers les procédés de fabrication soustractifs avec des moyens et des modules dédiés à la fabrication additive.

Obstacle(s) :

- Complexité et temps nécessaire à la certification d'une nouvelle formation et son inscription au registre national ;
- Besoin de soutien de la part des structures locales et régionales ;
- Adoption des mesures par les universités et écoles d'ingénieurs ;
- Atomisation des efforts de communication autour de la fabrication additive pour attirer le public dans les FabLabs.

4.1 : Renforcer la collaboration entre les FabLabs et les établissements d'enseignement primaires et secondaires

Pilote(s) :

- Réseau français des FabLabs
- Ministère de l'Éducation nationale
- Contributeurs : FabLab, plateformes technologiques

Délai :

- À préparer pour 2017
- Un travail de fond pour développer les compétences de demain en fabrication additive

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

- Primaire : l'enseignement du numérique dans les écoles n'étant pas une chose aisée, un certain doute persiste sur l'intérêt de l'utilisation de l'impression 3D dans les écoles primaires. Pour cela, il serait judicieux de mener une évaluation de l'impact et du retour d'expérience des initiatives françaises et étrangères sur l'arrivée des imprimantes 3D dans les établissements primaires avant tout agissement et concentrer les actions opérationnelles sur le secondaire ;
- Secondaire : établissement d'un partenariat entre le Réseau français des FabLabs et le ministère de l'Éducation nationale pour encourager les collaborations entre les FabLabs et les collèges/lycées ;
 - S'appuyer sur les FabLabs pour organiser les premiers niveaux de formation : actions de sensibilisation, organisation d'atelier de formation. Au-delà de la technologie, la pédagogie est l'élément clé pour enseigner l'impression 3d dans le secondaire,
 - Organiser un concours national des collèges et lycées sur l'impression 3D ;
 - Concours de la semaine de l'industrie (en articulation avec les FabLabs malgré leur diversité).

4.2 : Définir un référentiel national de formation pour les formations continues et initiales

Pilote(s) :

- Fédération de la plasturgie et des composites
- Contributeurs : Éducation nationale, entreprises, organismes de formation, Agence régionale d'innovation, Plateformes technologiques

Délai :

- Études à lancer rapidement pour évaluer les besoins humains et matériels et définir des référentiels pour 2018

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

- Dans l'optique d'avoir un corps enseignant formé à la fabrication additive et capable de transmettre leur intérêt et leur compréhension à leurs étudiants, il est important d'organiser la formation des enseignants en technologie par des professionnels qualifiés (exemple du Cirtes) :
 - S'appuyer sur les plateformes technologiques existantes et les centres techniques qui possèdent une vraie vision industrielle,
 - La Fédération de la plasturgie et des composites ainsi que l'observatoire de la métallurgie ont notamment déjà engagé des initiatives en ce sens ;
- Définir des référentiels de formation pour rendre les formations qualifiantes et professionnalisantes car les offres présentes actuellement sur le territoire ne sont pas prises en charge, ce qui est un vrai frein :
 - Sensibiliser les organismes financeurs (OPCA, région, Pôle Emploi, Agefiph) aux bénéficiaires des personnes qui demandent des prises en charge de formation dans la fabrication additive,
 - Financement de la formation continue pour avoir des modèles économiques plus solides ;
- Recenser les besoins en formation et en recrutement à court et moyen termes :
 - Prise en compte des moyens humains, en expertise et en équipement associés ;
 - Mettre l'accent sur la formation de techniciens et ingénieurs :
 - Conception : développement d'une capacité à fournir une analyse fonctionnelle, connaissance des outils d'optimisation topologique et de simulation, prévision des finitions nécessaires ou évaluation des intégrations de fonction possible,
 - Industrialisation : méthodes, contrôles et mesures ;
 - Si selon certains acteurs interrogés, la formation des opérateurs semble moins prioritaire dans la mesure où les compétences à acquérir sont plus proches des procédés mécaniciens traditionnels, la tâche d'opérateur machine reste essentielle dans la réussite de la mise en œuvre complète (connaissance poussée des machines, respect des choix effectués lors de la préparation et adaptation des post-traitements pour ne pas dégrader la pièce) ;
- Rédiger des fiches de postes pour chaque profil type et une gestion prévisionnelle des emplois et des compétences pour estimer le volume de personnes qu'il faudra former à court et à moyen terme. En ce sens, le réseau national de la métallurgie mène une étude sur les besoins en formation en métallurgie des poudres pour la fabrication additive.

4.3 : Établir une cartographie des potentiels de formation initiale sur le territoire

Pilote(s) :

- Fédération de la plasturgie et des composites/UIMM
- Contributeurs : Agence régionale d'innovation, plateformes

Délai :

- À lancer en 2017 pour identifier les potentiels de formation qui absorberont les investissements en équipements

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

- Recenser les principales formations en fabrication additive présentes sur le territoire national et à l'international afin de comparer la position de la France ;
- Identifier les éventuels projets mis en place par les lycées professionnels et techniques, les CFA, les universités et écoles d'ingénieurs afin d'engager une réflexion sur les moyens requis pour mettre en place une formation cohérente avec les besoins du secteur ;
- Cette action pourra être menée en complémentarité avec l'Alliance pour l'Industrie du Futur qui a mis en place un groupe de travail sur les aspects liés à la formation pour l'Usine 4.0 de façon plus générale.

Fiche action 5 : Lancer un programme national d'accompagnement des entreprises

Objectif(s) :

- Réduire le risque de fracture numérique avec les acteurs de taille plus modeste ;
- Faciliter l'accès aux technologies de fabrication additive et leur diffusion dans les territoires ;
- Soutenir la collaboration plateforme technologique/PME pour minimiser les risques avant internalisation de la fabrication additive par la PME.

Pilote(s) :

- Coordinateur : DGE et/ou Symop (ou autre syndicat)
- Contributeurs : Centres techniques, plateformes ou bureaux d'études

Délai :

- Nécessite une phase préparatoire importante pour convaincre les financeurs publics
- Lancement à prévoir pour 2018

Obstacle(s) :

- Analyse des retours d'expériences des actions similaires.

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

- Mise en place d'un programme d'accompagnement des PME sur les sujets de la fabrication additive selon le modèle RobotStartPME ou DE-FI Composites afin de faciliter la compréhension et l'appropriation des technologies ; Ce programme pourrait contenir par exemple des dispositifs d'aide à l'achat d'équipements ou des enveloppes dédiées au conseil opérationnel par des experts locaux en fabrication additive ;
- Accompagner les entreprises dans leur démarche d'internalisation de la FA pour en démultiplier les usages.

Fiche action 6 : Renforcer la présence française sur la scène internationale

Objectif(s) :

- Constat : la France est déjà très présente et active sur le plan de la normalisation au niveau mondial ;
- Exporter le savoir-faire national et nouer des collaborations internationales sur des projets de R & D.

Obstacle(s) :

- Volonté de développer à tout prix l'ensemble des compétences technologiques sur le territoire ;
- Dépendance des acteurs aux financements publics nationaux.

6.1 : Encourager et faciliter l'accès aux financements européens et aux collaborations internationales

Pilote(s) :

- Pôle de compétitivité
- Ministère des Affaires étrangères et du Développement international qui développe des programmes d'internationalisation des pôles
- Contributeurs : centres techniques

Délai :

- Point majeur où il faut agir vite surtout au niveau technologique où la France est en retard

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

La France est très présente sur la scène internationale au niveau de la normalisation mais ne dépose que trop peu de projets européens. Il s'agit ici d'un véritable paradoxe. Il est également important de rester ouvert sur le fait qu'il n'est pas forcément utile de développer des compétences technologiques qui existent déjà dans d'autres pays :

- Réaliser un recensement du nombre de projets liés à la fabrication additive financés par la commission européenne et de l'activité des pôles de compétitivités sur ces sujets :
 - Au cours de l'année 2014, 23 projets ont été financés dans le cadre d'Horizon 2020 à hauteur de 50 M€ sur un budget total de 57 M€. En juillet 2015, cinq projets ont été financés avec un soutien de l'Union européenne à hauteur de 27 M€ pour un budget de 31 M€ :
 - Objectifs collectifs : 40 projets financés par la commission européenne en 2020,
 - Objectifs français : 10 projets financés par an par la commission en 2020 ;
- Encourager les acteurs à ne pas se reposer que sur les financements nationaux et aller chercher des fonds européens. Une possibilité serait de ne débloquer des fonds nationaux que sous réserve d'obtention de financements européens pour la R & D. À ce sujet, l'ANR vient de lancer un programme pour aider nos Français à déposer des projets européens ;
- Rassembler les acteurs, proposer un accès simplifié aux financements et augmenter le dépôt de projets de recherche collaboratifs européens. Cette mission pourrait être assurée par les pôles de compétitivités dans leur mission internationale pour l'innovation et de montage de projets H2020 ;
- Aider les petites et moyennes entreprises à se familiariser avec les terminologies et les concepts de la commission européennes à l'aide d'un guide dédié afin de mieux explorer les programmes :
 - Faire la promotion des aides aux montages existant auprès des PME du secteur de la fabrication additive,
 - Intégrer davantage des PME spécialisées en montage de dossier dans le consortium pour augmenter les chances de succès,
 - Utiliser davantage le réseau EEN (*European Enterprise Network*) pour encourager d'éventuelles collaborations).

6.2 : Mener des actions d'intelligence économique et de veille internationale

Pilote(s) :

- Coordinateur : ministère des Affaires étrangères et du Développement international, Service de l'information stratégique et de la sécurité économiques (à valider)
- Contributeurs : Business France, CCI Internationales

Délai :

- Préparation nécessaire pour faire travailler tous les acteurs de l'international ensemble
- Lancement à prévoir pour 2018

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

- Effectuer un état des lieux international pour identifier les *leaders* et les domaines d'excellence par spécificités. Les conclusions d'une étude de marché mondial menée par un binôme technique et *marketing* apporteraient des pistes de réflexions pour engager des actions opérationnelles auprès des donneurs d'ordres, des pôles ou renforcer la sécurité économique des acteurs français qui jouent un rôle stratégique ;
- Mieux maîtriser l'environnement international grâce à des actions d'intelligence économique. Souvent délaissé par les PME, il s'agit d'un outil stratégique qui permet de mieux connaître son environnement concurrentiel mais aussi de protéger le savoir-faire national :
 - Stratégie passive : réalisation de bulletins de veille sur l'activité en fabrication additive ;
 - Stratégie offensive pour aller récupérer des informations à l'étranger ;
- Mettre en place de clubs impression 3D à l'étranger pour faciliter les collaborations et la visibilité française sur les actions menées dans d'autres pays ;
- Organiser un réseau d'entreprises et de sous-traitants internationaux.

Fiche action 7 : Favoriser les collaborations multifilières

Objectif(s) :

- Favoriser les transferts de technologies et le partage d'expérience entre acteurs de secteurs différents

Acteur(s) Leader(s) :

- Alliance pour l'industrie du futur en tant que coordinateur
- Centres techniques ou Pôles en tant qu'organisateur

Délai :

- Initier une démarche à court terme, ancrée dans la durée

Obstacle(s) :

- Risque de faible adoption par les autres marchés des matières développées pour l'aéronautique car l'économie pour l'autre pièce ne sera pas adaptée ;
- Partage des cahiers des charges peu réaliste.

Sous-actions et étapes associées à la fiche :

- Organiser des groupes de travail multifilières dans les centres techniques (plasturgie, fonderie, céramique, métallurgie) ou dans les réseaux existants (à l'image du Réseau national de la métallurgie et de sa commission très active sur la fabrication additive) :
 - Partager les qualifications entre industries pour réduire les doublons et accélérer le développement de la FA,
 - Mutualiser les travaux déjà réalisés sur les secteurs moteurs (aéronautique, médical) pour favoriser le transfert de technologie ;
- Créer une dynamique collective pour mutualiser les moyens et avancer plus vite dans la caractérisation des alliages et des formulations ;
- Mettre en place une base de données partagée sur les matières utilisées et sur d'éventuelles paramétries ;
- Demander aux industriels de secteurs différents de faire remonter des besoins similaires (mise en forme d'un alliage ou formulation communs, caractérisation, qualification) ;
- Standardiser en donnant des fourchettes de composition et de granulométrie (spécifique aux poudres) car les industriels ont besoin d'uniformité et de stabilité dans leur procédé ;
- Favoriser les échanges et les discussions entre les différents projets de plateforme afin de se nourrir des retours d'expériences des initiatives existantes :
 - Continuer d'encourager la création de nouvelles plateformes mutualisées au niveau territorial pour partager les risques et mutualiser les compétences au regard de l'écosystème existant,
 - Pérenniser les financements communs pour accélérer les collaborations à l'image d'un PSPC ou d'un Piave Industrie du Futur fléché Fabrication Additive.

Fiche action 8 : Un essor qui doit aller de pair avec la prise en compte des risques et leur réduction au niveau le plus bas possible

Objectif(s) :

- Identifier et évaluer les différents risques pour la santé et la sécurité pour chaque procédé de fabrication additive ;
- Engager des actions structurantes pour réduire ces risques au niveau le plus bas possible.

Pilote(s) :

- Ministère de la Santé
- Contributeurs : Ineris, INRS, organismes de prévention

Délai :

- Travail de fond pour éliminer le risque de scandale sanitaire

Obstacle(s) :

- Interprétation et transposition différentes des règles de sécurité ;
- Investissements complémentaires trop importants (souvent trois fois le prix de la machine) ;
- Risque de surréglementation qui pourrait impacter directement le marché.

Sous-actions et étapes associées à la fiche : La simplicité apparente ne doit pas amener à négliger l'évaluation des risques potentiels pour la santé et la sécurité des opérateurs : exposition à des produits dangereux, risque d'incendie et d'explosion, manipulation de lasers ou de faisceau d'électrons. Il est ainsi fondamental de mettre en place des dispositifs de prévention adaptés et de communiquer davantage sur les travaux existants qui sont de plus en plus nombreux. Il conviendrait ainsi de :

- Mener une investigation avec les organismes de prévention des risques professionnels afin d'évaluer plus précisément les risques encourus et l'élaboration de normes associés pour rendre l'utilisation de la fabrication additive plus sûre ;
- Réaliser un guide de bonnes pratiques Hygiène-Sécurité-Environnement à destination des entreprises et qui évalue les risques et les mesures de prévention associées pour chaque procédé. Afin de sensibiliser les agences nationales de sécurité telles que l'ASNM, ASN ou l'EPSF, un guide annuel impliquant des organismes tels que l'INERIS pourrait être créé selon le modèle de l'INPI ;
- Promouvoir davantage les études existantes comme celles menés par le journal américain Environmental Science & Technology sur les émissions de particules fines et de composés organiques volatils liées aux imprimantes 3D ou le livre Dunod « Fabrication additive : du prototypage à l'impression 3D » :
 - Ce dernier recense de façon exhaustive les risques et les aspects liés à la sécurité pour chaque opération pour l'ensemble des familles de procédés ;
- Être vigilant quant à la manipulation des produits chimiques et notamment l'utilisation de poudres organiques ou inorganiques. Les risques liés aux nanomatériaux (du fait de l'évolution des procédés qui vont tendre vers des poudres de plus en plus fines) sont également à considérer.

ANNEXES

Annexe 1 : retour sur les travaux effectués

Depuis le début de la mission, les moyens mis en œuvre pour la bonne réalisation de la mission ont porté sur :

- La tenue de réunions de travail et d'échanges avec le comité de pilotage
 - Réunion de démarrage le 18 janvier 2016
 - Intégration des commentaires et remarques du comité de pilotage au niveau des outils de consultations : base de contacts, guide d'entretien et lettres de mission
 - Présentation du cahier des charges de la mission à l'Alliance pour l'industrie du futur
 - Comité de pilotage élargi le 15 mars 2016
 - Réunion de démarrage spécifique au volet 4 avec la DGE et le CGET le 30 mars 2016
 - Réunion de démarrage spécifique au volet 8 avec la DGE et l'A3M le 14 avril 2016
 - Comité de pilotage restreint le 15 avril 2016
 - Réunion de démarrage spécifique au volet 7 avec la DGE et l'Aluminium France le 10 mai 2016
 - Comité de pilotage restreint le 31 mai 2016
 - Réunion de travail avec le comité de pilotage restreint le 5 septembre 2016 sur les recommandations de l'étude
- Une **analyse documentaire du secteur approfondie**, en France et à l'international, basée sur l'analyse de bases de données et statistiques (*cf.* : Bibliographie)
- La couverture de huit salons professionnels et d'événements dédiés à la thématique de la fabrication additive ou spécifiques à une filière professionnelle à savoir
 - Advanced Prototyping Solutions Meetings, la convention d'affaires dédiée à la fabrication additive, le prototypage et le développement de produit, 3 et 4 février 2016 à Lyon
 - Techinnov 2016, les rendez-vous B2B de l'innovation, 12 février 2016 à Paris
 - Rail Industry Meetings, rendez-vous d'affaires de la filière ferroviaire, 16 mars 2016 à Lille
 - Journée Rhône-Alpes Fabrication Additive Métallique, 31 mars 2016 à Grenoble
 - Smart Manufacturing Meetings, 25 et 26 mai 2016 à Paris
 - Advanced Manufacturing Meetings, 1^{er} et 2 juin 2016 à Clermont-Ferrand
 - Réunion de réflexion sur la création d'un institut régional de la fabrication additive en Auvergne-Rhône-Alpes, 1^{er} juin 2016 à Saint-Étienne
 - Industrie 2020 First, 15 juin 2016 à Lyon
 - Point d'étape de restitution sur l'action Fabrication Additive de l'Alliance industrie du futur, 24 juin 2016 à Paris
- La réalisation de deux consultations auprès des membres du comité de pilotage :

Structure	Nom	Fonction
Aluminium France	Caroline COLOMBIER	Déléguée générale
A3M	Claire DE LANGERON	Déléguée générale

- La réalisation de vingt-cinq consultations d'industriels utilisateurs de fabrication additive :

Structure	Nom	Fonction
Airbus Group	Vincent BAUDINAUD	Manager senior R&T
Air Liquide	Francis BRIAND	Manager Design et Fabrication
Alstom	Christophe ESCHENBRENNER	Responsable Numérisation de la chaîne logistique
Areva Temis	Gilles BONNET	Directeur technique
Beaba	Laurent NOCA	Directeur Innovation
Cetehor	Pascal HELY	Directeur
Cirtes	Claude BARLIER	Directeur
Décathlon	Eddy CHATELAIN	Responsable Prototypage
Décathlon	Julien GUILLEN	Chef de projet Additive manufacturing
Décathlon	Eddy CHÂTELAIN	Responsable prototypage

Décathlon	Romain COURTECUISSÉ	Responsable prototypage
ESA (Pays-Bas)	Tommaso GHIDINI	Head of ESA's Materials Technology section
Faurecia	Christophe AUFRERE	Directeur stratégie technologique
Fives	Sébastien DEVROE	Directeur Innovation
Groupe SEB	Alain PAUTROT	VP Satisfaction client et SAV
La Poste	Fabien MONSALLIER	Directeur Innovation
RBL Plastiques	Jacques LE BOULIER	Président
PICOM	Aladin MEKKI	Responsable Prospective
PSA	Jérôme DUBOIS	Responsable Innovation Procédés
Renault	Patrice LEROUX	Machining Expert Leader
SERF	Mathieu DARMEDRU	Directeur technique
SNCF	Nathalie PEIGNET	Pilote Fabrication Additive
Snecma	Anne THENAISIE	Responsable Fabrication Directe
Space X (USA)	Michaël TORRE	Directeur des opérations en fabrication additive
Thales Alenia Space	Florence MONTREDON	Coordinatrice Fabrication Additive
Thales Global Service	Yannick CADORET	Expert Matériaux et Procédés
Unicem	Jean-Marc POTIER	Chargé de mission technique
Xtreee	Justin DIRRENBARGER	Responsable scientifique

- La réalisation de dix-neuf consultations d'acteurs français de la filière au niveau de l'offre

Structure	Nom	Fonction
3D Ceram	Richard Gaignon	Président
3D Systems – Phenix	Ziad ABOU	Directeur Division Quickparts
Altair	François WEILER	Directeur Marketing Sud Europe
Anyshape (Belgique)	Bertand HERRY	Directeur
Arkema	Ilias ILIOPOULOS	Directeur Scientifique Matériaux
Creatix 3D	Mehdi CAMUS	Directeur
ERESTEEL	Adeline RIOU	Responsable marketing
Erpro et Sprint	Cyrille VUE	Dirigeant
Fives	Sébastien DEVROE	Directeur Innovation
Fraunhofer (Allemagne)	Wilhelm MEINERS	Responsable FA Laboratoire ILT
Makershop	Alexandre HERAN	Cofondateur
Michelin	Thierry Sortais	Directeur Stratégie Matériaux
Osseomatrix	Dr Didier NIMAL	Directeur général
Polyshape	Élisabeth REY	Directeur Marketing
Prismadd/3DExpertise	Florian FAURE	Ingénieur Fabrication Additive
Spartacus 3D	Charles DE FORGES	Dirigeant
Stratasys	Éric BREDIN	Directeur France, Iberia et FSA
Titan Industries (USA)	Joe MANZO	CEO
Tobeca	Stéphanie GRELET	Responsable marketing
Z3DLab	Jean-Jacques FOUCHET	Cofondateur

- La réalisation de vingt-deux consultations d'acteurs experts dans les stratégies de développement économique et de l'implémentation des technologies innovantes dans les territoires

Structure	Nom	Fonction
ADIRA	Sébastien LEDUC	Chef de projet
AFPR	Alain BERNARD	Vice-président
BPI France	Émilie GARCIA	Expert de la filière Industrie, Direction de l'Innovation
CCI Île-de-France	Pascal MORAND	Directeur général adjoint
Club Impression 3D	Dominique BOUDIN	Directeur
CNAM	Philippe DURANCE	Professeur, chaire de Prospective et Développement durable
DIRECCTE PACA	Grégory GOLF	Chargé de mission développement

ENS Cachan	Camille BOSQUÉ	économique et innovation Thèse sur la fabrication numérique personnelle et les fablabs
Fédération plasturgie FabLab	Jean MARTIN	Délégué général
La Case Mate	Carole THOURIGNY	Directrice
La Fab	Quentin GARNIER	Fab Manager
L'Usine IO	Laurence BERTOUD	Cocréatrice et gérante
Materiaupôle	Benjamin CARLU	Président
Platinum 3D	Arnaud BOUSQUET	Directeur
Plateforme iDPro	Hervé BONNEFOY	Enseignant chercheur à l'IFTS Responsable de la Plateforme technologique
Pôle National d'Innovation du travail des Métaux	Marc BENBAHI	Responsable de pôle
Pole Materialia	Pierrick SECHER	Chef de projet
Réseau de Recherche sur l'Innovation	Gwenaëlle LEVECQUE	Économiste
SAGR PACA	Serge LE ROUX	Chargé de mission Économie numérique, financements innovants
Université Lorraine	Thierry ARPIN-PONT	Directeur Laboratoire ERPI
Via Meca	Laure MOREL	Responsable « Procédés Avancés de Fabrication »
Villes – Innovation	Franck SIMON	Expert en socio-économie urbaine
	Raphaël BESSON	

- **La tenue de quatre ateliers de travail** de validation et de consolidation des scénarios prospectifs
 - Composition du groupe de travail sur les scénarios prospectifs transverses industriels :

Structure	Prénom Nom	Fonction
AFPR	Alain Bernard	Vice-président
CCI du Grand Lille – Club impression 3D	Dominique Boudin	Responsable service innovation/Responsable du club
Pôle Viaméca	Franck Simon	Responsable thématique Procédés Avancés de Fabrication
Five Michelin AS	Jean-Luc Laval	Directeur adjoint Marketing Groupe
Osseomatrix	Didier Nimal	Directeur
iDPro	Marc Benbahi	Responsable de la plateforme
Alstom	Christophe Eschenbrenner	Directeur programme Pièces Détachées
Faurecia 3A	Grégoire Ferré Philippe Vannerot	Responsable Fabrication Additive CEO et Directeur Technique

- Composition du groupe de travail sur les scénarios prospectifs orientés grand public et biens de consommation

Structure	Nom	Fonction
Seb	Alain Pautrot	Vice-président Satisfaction Client
Tobeca	Stéphanie Grelet	Cocréatrice et gérante
Réseau de Recherche sur l'Innovation	Serge Leroux	Directeur adjoint
CNAM	Philippe Durance	Titulaire de la chaire « Prospective & développement durable
Université de Reims	Hervé Bonnefoy	Enseignant-chercheur
CCI du Grand Lille – Club Impression 3D	Dominique Boudin	Responsable service innovation / Responsable du club
Lorraine Fab Living Lab	Mauricio Camargo	Professeur
8FabLab	Carole Thourigny	Gérante
Chambre des métiers de l'artisanat Niort	Pierrick Sécher	Responsable du Pôle National d'Innovation du travail des Métaux

- o Composition du groupe de travail sur les scénarios prospectifs spécifiques aux matériaux métalliques (hors aluminium)

Structure	Nom	Fonction
ERASTEEL	Adeline Riou	Responsable Poudres Fabrication Additive
Fives Michelin AS	Jean-Luc Laval	Directeur adjoint Marketing Groupe
Prodways – Groupe Gorgé	Christophe Sécheret	Responsable Division Aérospatiale
Areva Temis	Ana Paula Serond	Directeur de la Recherche, du Développement et de l’Innovation
Safran	Hugues Bornecque	Chef de projet Fabrication Additive
SNCF	Philippe Féraud	Expert SNCF matériaux métalliques
Air Liquide	Francis Briand	Directeur Fabrication Additive
MBDA	Florian Galliano	Référent Procédés Fabrication Additive
Osseomatrix	Didier Nimal	Directeur

- o Composition du groupe de travail sur les scénarios prospectifs spécifiques aux alliages d’aluminium

Structure	Nom	Fonction
Constellium	Bruno Chenal	Directeur Innovation Stratégique
Poudres Hermillon	Frédéric Billon	Directeur Marketing et commercial
Alcoa Howmet	Romain Rerolle	Directeur général
Spartacus 3D	Charles De Forges	Directeur général
AGS Fusion	Jean-Pierre Wilmes	Directeur général
Fives	Sébastien Devroe	Directeur Innovation
Thales Global Service	Yannick Cadoret	Responsable Procédés et Matériaux
SNCF	Louis-Romain Joly	Responsable Fabrication Additive
Safran	Hugues Bornecque	Chef de projet Fabrication Additive

Annexe 2 : technologies de fabrication additive et matériaux associés

Les procédés de fabrication

La fabrication additive regroupe une grande variété de procédés qui permettent de fabriquer des pièces fonctionnelles directement à partir d'un modèle numérique CAO (Conception Assistée par Ordinateur), par addition de matière (métal, polymère ou céramique) à partir de poudres, fils ou plaques. Cette fabrication est faite sans outillage préalable, sous l'effet d'une source de chaleur (rayonnement UV, laser, faisceau d'électrons, cartouche chauffante). Elle permet de réaliser des produits de forme complexe en prototypage ou en petite série. Elle autorise l'obtention de formes irréalisables par les technologies de fabrication conventionnelles (usinage, forgeage, emboutissage) et la réalisation de pièces avec des structures internes complexes de type réseaux en trois dimensions (lattices) ou des canaux de régulation thermique de formes complexes. Ses avantages résident notamment dans la réalisation de pièces finies avec les caractéristiques mécaniques souhaitées sans utilisation d'outillage spécifique et dans la réduction de la consommation de matières. Elle permet également la fabrication rapide de pièces et d'outillages mettant en œuvre des géométries impossibles à réaliser avec des procédés de fabrication classiques (par exemple canaux de régulation thermique dans les moules).

La norme ISO 17 296-2 définit les technologies de fabrication additive en sept familles de procédés que nous détaillons ci-dessous.

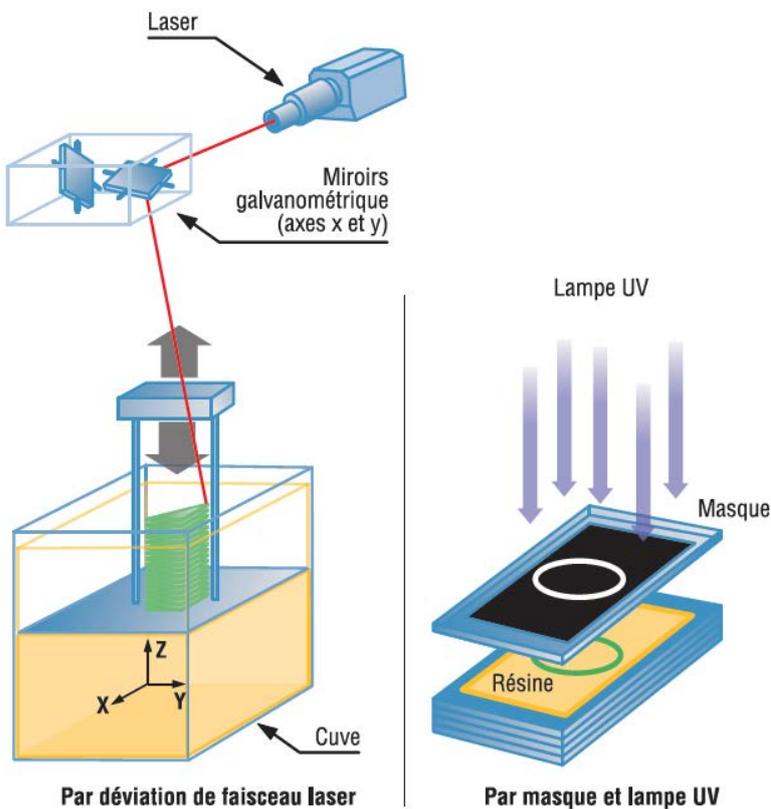
1. Polymérisation d'une résine sous l'action d'un laser

La stéréolithographie (SLA) est le procédé phare de cette famille et l'une des premières techniques qui a permis de fabriquer de façon quasiment automatique des objets solides à partir d'un modèle numérique. Ce procédé est basé sur l'utilisation de résines synthétiques présentant la propriété de réagir à un rayonnement lumineux et à la chaleur. Cette réaction est déclenchée par l'action d'un photo-initiateur qui, grâce à l'apport énergétique induit par la source rayonnante, engendre une polymérisation locale de la résine monomère. Les résines photopolymères commercialisées sont sensibles à plusieurs types de rayonnements : rayons gamma, rayons X, rayons UV, faisceau d'électrons, et lumière visible. En ce qui concerne le procédé de stéréolithographie, l'action des UV et de la lumière visible est utilisée comme durcissant.

Deux systèmes ont été proposés pour piloter la photopolymérisation. Le plus connu est celui qui met en œuvre un balayage laser de la surface à insoler, le second utilise un principe de masquage pour « flasher » la section de la pièce en une seule fois. Le premier système connaît une variante notable qui utilise deux sources d'insolation afin d'obtenir une plus grande précision.

Les principaux vendeurs de machines utilisant cette technologie sont 3D Systems (USA), Formlab (Allemagne), DWS Lab (Italie) et Prodways (France).

Comme pour la majorité des procédés de fabrication additive, les matériaux disponibles sont le plus souvent des matériaux propriétaires spécifiques à chaque fabricant. Ce sont des matériaux plastiques photopolymères ainsi que des solvants permettant le retrait des supports. Ces matériaux peuvent avoir plusieurs couleurs et présenter des caractéristiques mécaniques plus ou moins intéressantes. Certains matériaux peuvent être souples, caoutchouteux ou encore chargés de poudres plastiques, céramiques, métalliques afin de créer des pièces en matériaux composites.



Polymérisation d'une résine sous l'action d'un laser - Stéréolithographie - SLA
© CIRTES et © DUNOD 2015

Figure 74 : Polymérisation d'une résine sous l'action d'un laser - Stéréolithographie - SLA

Spécificité de l'utilisation de la stéréolithographie pour les céramiques :

Une variante de la technologie SLA réside dans l'utilisation d'une résine photosensible chargée en céramique (alumine, zircone, hydroxyapatite...) créant une pâte photosensible qui permet, après déliantage et frittage (chauffes successives pour éliminer le polymère et conserver les charges céramiques), la fabrication d'objet en céramique dense.

La SLA est généralement réservée aux céramiques techniques et permet d'obtenir des pièces ayant des propriétés mécaniques élevées. L'introduction d'une charge céramique dans les pâtes photopolymérisables entraîne une élévation de la viscosité qui impose d'équiper les machines avec des systèmes de mise en couche spécifiques (procédé Optoform). L'apport d'énergie peut se faire indifféremment par un LASER UV ou un projecteur DLP (*Digital Light Processing*). Le procédé conduit à une pièce composite tridimensionnelle qu'il convient de convertir en céramique par un traitement de frittage à haute température, cette étape entraîne un retrait volumique de la pièce que l'homme du métier aura veillé à anticiper lors de la CAO. En France, la technologie SLA pour les céramiques fait l'objet d'une protection (brevet FR FR2835827 propriété de CTTC).

Le DLP de Prodways (France), une technologie utilisée dans la fonderie :

Le DLP en mouvement MOVINGLight®, technologie introduite sur le marché par Prodways, est un procédé de photopolymérisation permettant de fabriquer des modèles pour la fonderie à cire perdue ou des maîtres modèles pour la duplication par coulée sous vide avec une haute résolution et à des vitesses élevées (0,3 à 3 L/h). La technologie de Prodways projette une image de 40 x 70 mm de 2 millions de pixels qui balaie l'ensemble de la surface de résine polymère en apportant ainsi une résolution active de 40 microns par pixel sur toute la plateforme

(max 800 x 660 x 550 mm). L'élimination de la résine, une fois la carapace réalisée, se fait dans des fours flash avec aspiration des gaz. Deux résines ont été développées pour les applications de fonderie à cire perdue, les résines Cast100 et Cast200.

2. Projection de gouttes de matière

Ces technologies utilisent des têtes d'impression qui peuvent s'apparenter à celles utilisées dans les imprimantes 2D par jet d'encre. Il s'agit principalement des technologies de dépôt par jet d'encre (IJP), par jet d'aérosol (AJP) et d'autres technologies de dépôts localisés. Elles utilisent des encres chargées qui sont déposées par une tête d'impression selon un motif bi ou tridimensionnel sur un plateau de construction ou sur un substrat. Le principal avantage de ces technologies est la capacité à réaliser des composants multimatériaux à l'aide d'un système multitête.

Les principaux vendeurs de machines utilisant cette technologie sont Solidscape (USA), Stratasys (USA) et 3D Systems (USA).

En France, la technologie jet d'encre multimatériaux fait l'objet d'une protection (brevet FR0310300 propriété du CNRS).

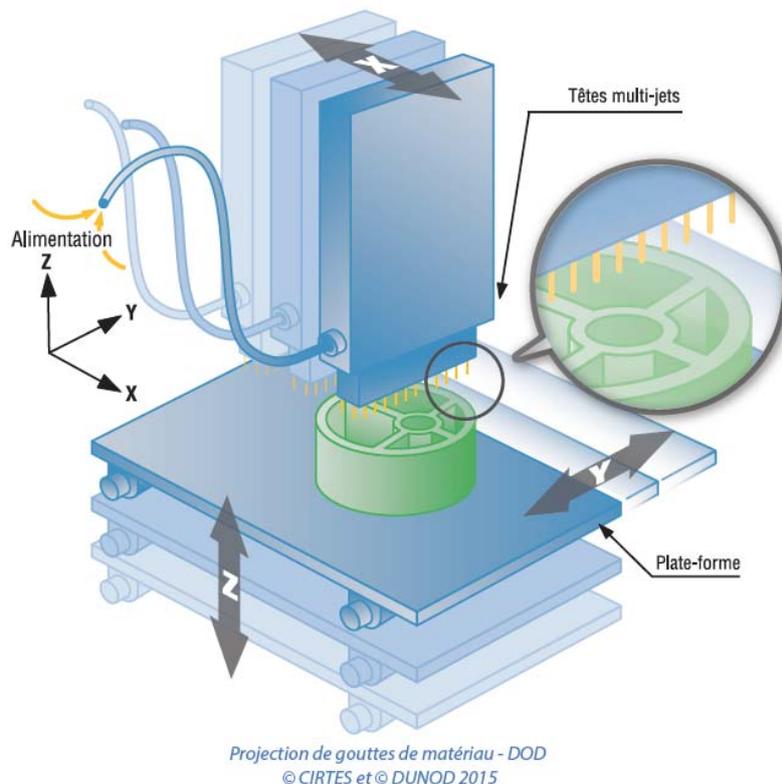


Figure 75 : Projection de gouttes de matière - DOD

Spécificité de la technologie de Solidscape :

Les imprimantes Solidscape allient la technologie « Drop On Demand », déposition de cire de construction ou de support (matériaux propriétaires) goutte à goutte à l'aide de deux têtes de construction avec une résolution (dpi) de 5 000 x 5 000 x 8 000 mm XYZ. Un fraisage sur chaque couche est réalisé pour maîtriser l'épaisseur de couche entre 0,00625 et 0,0762 mm.

Ce procédé ne nécessite pas de post-traitement ou de retouche du modèle, les pièces sont utilisables directement pour l'obtention de pièces métalliques grâce au procédé de fonderie cire perdue, pour la duplication par moule ou encore pour la pressée de céramique.

Spécificité de la technologie CPX de 3D system :

Cette technologie est principalement utilisée pour le moulage en fonderie, tant pour des pièces mécaniques, des pièces d'art, dans l'odontologie que pour la fabrication des bijoux. Plusieurs types de cire sont disponibles sur le marché tel que la VisiJet Prowax, la VisiJet Hi-Cast et la VisiJet Dentcast Dental Wax-up pour les imprimantes 3D ProJet 3 500 et ProJet 5 000 qui fonctionnent sur la technologie MultiJet.

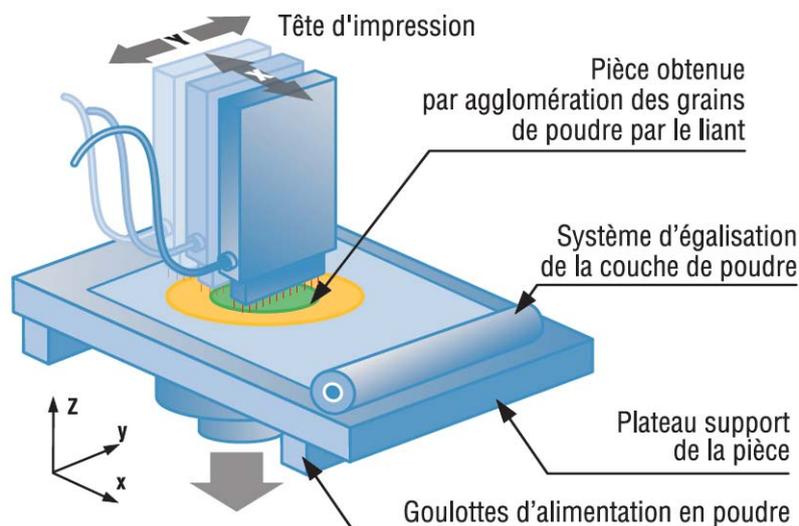
3. Projection d'un liant sur un substrat de type poudre

Cette famille de procédés est à la fois très proche de celle des procédés de projection de gouttes de matériau (présentée ci-dessus) et de celle des procédés de solidification de poudres sous l'action d'une source d'énergie (présentée ci-après). En effet, elle a conservé la projection de gouttes de liant et d'encre des premiers et le lit de poudres des seconds. Cette famille, développée au MIT, est souvent utilisée pour la modélisation de concepts et nouveaux produits parmi lesquels nous pouvons citer les implants osseux, des mécanismes, des modèles de moulage, des objets *marketings* et décoratifs...

Cette technologie fonctionne suivant un principe de fonctionnement simple, une tête d'impression d'encre à canaux multiples vient déposer un liant liquide sur un lit de matériau en poudre dans lequel l'objet est construit. Les particules de poudres sont alors liées dans les zones où le liant est déposé formant ainsi une couche de l'objet. Comme dans le frittage au laser, une fois la couche terminée, une nouvelle épaisseur de couche (entre 50 et 500 μm selon les matériaux et propriétés souhaitées) est déposée sur le lit de poudres. Une fois la dernière couche réalisée, l'objet doit être extrait de la poudre compactée (par le système de mise en couche) mais non liée.

Les principaux vendeurs de machines utilisant cette technologie sont ExOne (USA), Voxeljet (Allemagne) et 3DSystems (USA).

Les matériaux utilisables sont des matériaux propriétaires spécifiques à chaque machine. Ce sont des matériaux en poudre de type plastique, amidon, plâtre ou encore métallique. Il est également possible de fabriquer des pièces avec des poudres minérales : sable, pierre, hydroxyapatite.



Projection d'un liant sur un substrat de type poudre - 3D printing
© CIRTES et © DUNOD 2015

Figure 76 : Projection d'un liant sur un substrat de type poudre - 3D Printing

Spécificité des pièces céramiques :

L'utilisation de la technologie de projection de liant (*Binder Jetting*) pour le domaine des céramiques nécessite, comme pour les autres technologies en lit de poudres, de parvenir à un étalement correct et une densité de compaction propice au frittage. La liaison des grains peut être réalisée avec les mêmes stratégies que pour les moules et les noyaux de fonderie en sable (liants phénoliques...) ou par l'emploi d'autres formulations de liant adaptées aux céramiques techniques ou aux argiles (silice colloïdale...). Cette technologie mène à des pièces tridimensionnelles de faible densité, typiquement inférieure à 50 %, qui subiront des post-traitements dont un traitement thermique de frittage à haute température. Cette technologie se développe principalement pour la fabrication de pièces céramiques de grande taille à moindre valeur ajoutée que les pièces produites par SLA.

4. Solidification de poudres sous l'action d'une source d'énergie (laser ou faisceau d'électron)

Cette famille de procédés a été une des premières à avoir été commercialisée et le procédé de frittage laser sélectif (SLS) en a été le premier représentant. Initialement basée sur une fusion de poudres polymères pour la fabrication de prototypes en matières plastiques, cette technique a rapidement proposé la mise en œuvre de poudres céramiques et métalliques tout d'abord en frittage indirect puis en frittage direct. Le frittage indirect réalise la fusion et la solidification d'une couche de polymère enveloppant un grain de poudre métallique ou céramique. Le frittage direct relève d'une fusion du grain même de la poudre sans liant polymère.

Cette famille est largement utilisée et propose une importante gamme de matériaux polymères, métaux, céramiques et composites, qui sont de plus en plus utilisés pour la fabrication additive de pièces finales grâce aux propriétés des matériaux comparables à celles des matériaux classiquement utilisés dans l'industrie.

Chaque couche formant l'objet est réalisée par le balayage d'un faisceau laser ou faisceau d'électron qui apporte l'énergie suffisante pour fritter ou fusionner les poudres. Un système d'étalement permet de déposer et compacter les couches successives de poudres. Afin de limiter les phénomènes d'oxydation (surtout pour les métaux), le procédé se déroule dans une chambre de fabrication avec atmosphère neutre (azote ou argon selon le matériau). Une étape de traitement thermique est nécessaire à l'issue du procédé de fabrication pour :

- Diminuer l'anisotropie²²² due à la fabrication couche par couche ;
- Diminuer les contraintes résiduelles ;
- Améliorer les propriétés matériau en fonction de l'application visée.

Cette famille de procédés utilise un fichier CAO représentant l'objet à construire. Ce modèle CAO est traité par un logiciel afin d'y ajouter des supports qui permettront de lier l'objet au plateau de construction, de faciliter son détachement, de soutenir la pièce lors de sa construction et d'éviter la surchauffe (« overheating ») de la pièce sur des parties fines. L'étape suivante consiste à représenter en tranches l'objet CAO et ses supports en une multitude de couches. L'épaisseur de chaque couche est déterminée par l'utilisateur en fonction de différents critères inhérents au procédé et à la matière (granulométrie de la poudre, nature de l'alliage, dimensions de la pièce et tolérances géométriques, importance ou non de l'esthétique de l'objet). Le fichier est ensuite importé dans le logiciel de la machine de fabrication directe, Des paramètres de construction lui sont appliqués :

- Énergie qui doit être apportée au matériau
- Vitesse avec laquelle le faisceau laser balaye la zone à fusionner
- Stratégie de construction pour chacune des couches

²²² Propriété d'être dépendant de la direction.

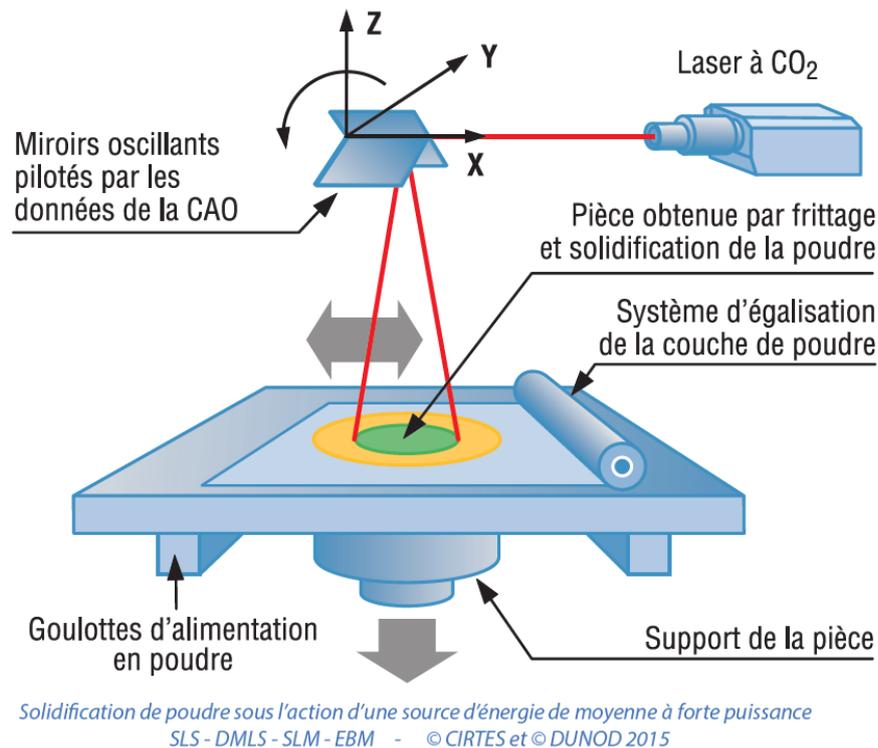


Figure 77 : Solidification de poudre sous l'action d'une source d'énergie de moyenne à forte puissance

Selective Laser Sintering (SLS)

Le procédé *Selective Laser Sintering* (SLS) ou frittage laser sélectif en français est un procédé de fabrication additive par agglomération de poudres et fusion partielle. Initialement, *Selective Laser Sintering* était le nom commercial utilisé par la société 3D Systems pour sa technologie de fusion en lit de poudres de polymères. Cette appellation est maintenant élargie à tout type de matériau. Néanmoins, le polymère et notamment le polyamide (nylon) restent la famille de matériaux la plus répandue surtout pour la fabrication de prototypes.

- Procédé : le système de mise en couche (rouleau ou racleur) amène une couche de poudres qui est fusionnée à la couche inférieure par laser. La plateforme mobile descend d'une couche, et ainsi de suite.

Dans le cas de la technologie SLS, la poudre est chauffée à une température proche de la température de fusion de façon à accélérer la vitesse de balayage laser et aussi diminuer la puissance du laser (ce qui représente la pièce la plus onéreuse d'une machine).

À la suite du frittage, un nettoyage de la pièce est nécessaire et éventuellement dans le cas des métaux un passage au four pour le déliantage, diffusion/infiltration de bronze.

- Consommable : poudre très fine, jusqu'à 20 μm , avec un liant.
- Matériaux : plastiques, céramiques, verre, métaux.

Les matériaux polymères disponibles pour cette technologie sont essentiellement des polyamides (famille des nylons) avec des différents grades. Il existe des polyamides avec différents renforts pour retarder la propagation de flamme, améliorer les caractéristiques du matériau (renfort alumide ou carbone) ou encore avec des colorants pour teinter les pièces. Il est également possible de réaliser des pièces avec des matériaux à haute performance tels que le PEEK (polyether ether ketone) mais le prix de ces pièces reste très important comparé aux autres matériaux et surtout aux autres procédés de mise en forme de matières plastiques.

Pour les métaux : procédé DMLS (Direct Metal Laser Sintering). Aciers inoxydables, aciers à outils, aciers *maraging*, Inconel 625 et 718, Titane Ti6AlV4, principalement. À présent les métaux sont mis en forme *via* la technologie SLM afin d'augmenter la densité et améliorer les propriétés mécaniques.

À la différence de la technologie SLA, les céramiques peuvent être frittées pendant la construction de la pièce à l'aide d'un laser de puissance de 100 watts et plus. Compte tenu de la réfractarité élevée des matériaux céramiques, le lit de poudres est généralement préchauffé. La technologie met donc en œuvre plus un procédé de frittage (SLS) que de fusion (SLM) même si certaines compositions céramiques peuvent contenir en partie des phases fusibles. La principale difficulté de l'emploi de ce procédé dans le domaine des céramiques vient du compromis à trouver entre une taille de particule suffisamment élevée pour faciliter la mise en couche du matériau et néanmoins suffisamment fine pour assurer une bonne réactivité au frittage. Cette problématique ainsi que les problèmes de retraits volumiques et de chocs thermiques à résoudre mènent généralement à ne pas pousser le frittage à son stade final par SLS, celui-ci étant réalisé par une cuisson ultérieure.

- Applications : outillages (moules), dentisterie, aérospatiale, automobile, architecture, décoration, design, etc.
- Dimensions de pièces possibles : volume de travail : 700 x 580 x 380 mm. Épaisseur minimale des parois : 0,5 mm.

Selective Laser Melting (SLM)

Le procédé SLM (*Selective Laser Melting*) ou Fusion Laser Sélective en français se différencie de la technologie SLS par le fait que la matière est fondue sous l'action du laser. L'énergie nécessaire à la fusion du matériau est apportée par un laser qui balaye de son faisceau la zone de construction recouverte de poudres et cela couche par couche.

Le procédé de fabrication se déroule de la manière suivante : le râtelier amène une couche de poudres qui est fusionnée à la couche inférieure par laser de très forte puissance. La plate-forme mobile descend d'une couche, et ainsi de suite.

La fabrication additive par procédé SLM appliquée aux métaux présente un potentiel exceptionnel pour la réalisation de structures et de pièces complexes. Ainsi, on peut réaliser un insert de moule d'injection qui intègre des canaux de refroidissement impossibles à réaliser par aucun autre procédé de fabrication, où bien créer des pièces légères et résistantes présentant une structure alvéolaire autoportante.

Le procédé SLM présente des exigences en termes de qualité de la poudre métallique utilisée : morphologie et sphéroïdité des grains, granulométrie de la poudre.

- Consommable : poudre très fine, jusqu'à 20 µm.
- Matériaux : métaux uniquement. Aciers inoxydables, aciers à outils, aciers *maraging*, Inconel 625 et 718, Titane Ti6AlV4, principalement
- Dimensions de pièces possibles : volume de travail : jusqu'à 400 x 400 x 400 mm mais la taille des pièces est limitée car les contraintes résiduelles induites lors des expositions laser successives peuvent entraîner la rupture des pièces pendant la fabrication.
- Épaisseur de couche : 20 à 100 µm selon le matériau et les propriétés attendues.
- Avantages par rapport au frittage laser : pièces pleine matière beaucoup plus denses. Pas de liant, fusion véritable du métal grâce à la puissance du laser.
- Inconvénient par rapport au frittage laser : taille des pièces encore limitée.
- Applications : médical, aéronautique, automobile, inserts de moules.

La fabrication par procédé SLM de bijoux creux à partir de poudre d'or a été étudiée expérimentalement par le Ceteoh (Centre technique de l'industrie horlogère).

Les principaux constructeurs de machines de fusion laser de lit de poudres métalliques sont les suivants : 3D Systems France, Aspect, Arcam, Concept Laser (Allemagne), EOS (Allemagne), Farsoon High-Tech, FMAS (Fives Michelin Additive Solutions), Phenix Systems (France) racheté par 3D Systems, Realizer GmbH, Renishaw (GB), Sisma, SLM Solutions (Allemagne), et TRUMPF.

La technologie EBM

La différence majeure entre cette technologie et la technologie SLM réside dans le fait que l'apport de chaleur se fait par l'intermédiaire d'un faisceau d'électrons. Le faisceau d'électrons

permet d'augmenter la densité d'énergie ainsi que la vitesse de balayage du faisceau qui est beaucoup plus rapide que la tête scanner du laser. En effet, le balayage du faisceau d'électrons n'est pas réalisé par une tête scanner avec des miroirs motorisés mais par l'intermédiaire de lentilles.

La technologie EBM consiste à préchauffer le lit de poudres avec un passage rapide du faisceau puis à fusionner. Cette action de préchauffage a pour effet de fritter légèrement la poudre. L'état de surface final des pièces est donc moins bon qu'avec la technologie SLM par contre, il est possible de fabriquer des pièces avec géométries complexes sans utiliser de supports de constructions mécaniques. La poudre frittée maintient la pièce mais il est parfois utile de placer des supports sous les parties « suspendues » des pièces pour mieux dissiper la chaleur produite par le faisceau d'électrons et ainsi éviter la surchauffe de la matière.

L'utilisation d'un faisceau d'électrons nécessite d'obtenir le vide dans la chambre de fabrication. Le fait de réaliser la fusion sous vide permet d'éviter les problèmes de corrosion et d'inclusions gazeuses dans les pièces fabriquées. Le procédé EBM est particulièrement adapté au traitement CIC (Compactage Isostatique à Chaud²²³) afin d'augmenter la densité apparente des pièces fabriquées.

Le procédé EBM peut être utilisé avec des poudres de granulométrie plus importante que le SLM (100 µm). Les principaux matériaux disponibles sont le titane et le chrome cobalt. Cependant, la volatilisation des éléments légers (Al, Mg) à cause du vide est un défaut d'importance du procédé. Cela peut poser problème pour les alliages de titane tels que le TA6V ou le TiAl, ou pour les alliages d'aluminium.

L'unique vendeur de machines EBM est Arcam protégé notamment du fait des brevets en cours.

5. Projection de matière (poudre ou fil) dans un flux d'énergie (laser ou plasma)

La technique de dépôt de poudre fondue par laser est dérivée du rechargement laser (laser *cladding*). Au lieu de fondre le matériau préalablement étalé sur un lit de poudres, les poudres sont transportées par un gaz et injectées dans un faisceau laser, puis se déposent fondues sur les couches précédentes de la pièce en cours de fabrication. Bien que ce procédé ne permette pas aujourd'hui de fabriquer des pièces aussi complexes que la fusion sur lit de poudres²²⁴, il offre l'avantage entre autres de pouvoir être appliqué pour la réalisation de pièces de grandes dimensions. Cette technique présente un fort potentiel de développement, en complément des autres procédés de fabrication additive et se décline sous diverses identités en fonction des fournisseurs.

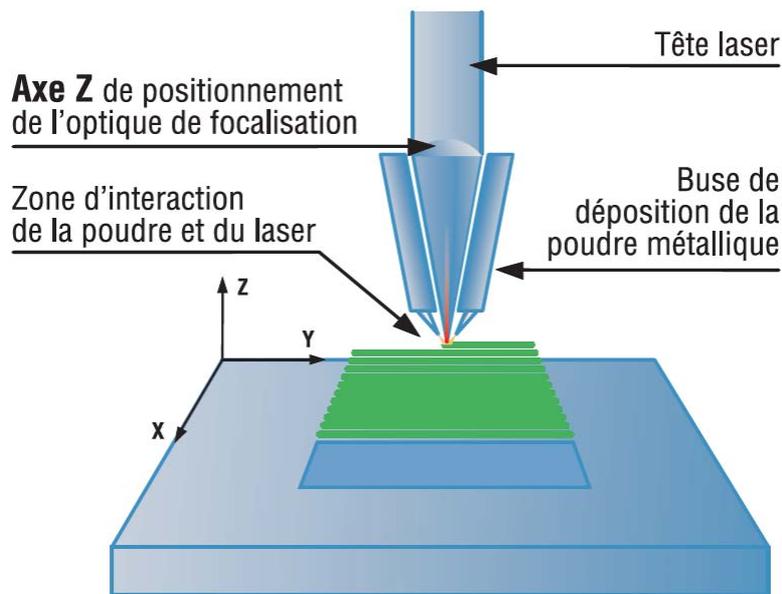
Le principe du dépôt de poudre fondue par laser consiste à fusionner un matériau d'apport métallique ainsi qu'une très mince couche de la surface du substrat de manière à assurer une liaison métallurgique. Grâce au faisceau laser focalisé, l'apport thermique est précis et localisé.

Les machines de fabrication directe par laser de la jeune pousse BeAM (France) utilisent le procédé CLAD®.

Les applications sont outre la réalisation de pièces industrielles neuves, la réparation de pièces et dans les domaines aéronautique ou médical, la réalisation sur-mesure de prothèses comme la prothèse de palais.

²²³ Processus de fabrication utilisé pour éliminer la porosité interne dans les pièces moulées métalliques et autres matériaux.

²²⁴ Les technologies SLM et EBM mêlent par ailleurs les deux techniques.



Projection de poudre (ou fusion de fil) dans un flux d'énergie (laser ou plasma) - LENS - DMD - CLAD
© CIRTES et © DUNOD 2015

Figure 78 : Projection de poudre (ou fusion de fil) dans un flux d'énergie (laser ou plasma)

Spécificité des céramiques :

Le *Laser cladding* (LC) de céramiques est rare mais possible et étudié pour des applications dans le domaine des revêtements de protection thermique. La faible mouillabilité des matériaux céramiques sur les métaux impose toutefois de recourir à des couches intermédiaires ou à des ajouts de phases liantes. Une autre technologie de dépôt énergétique spécifique aux matières céramiques est la méthode INPACT développée au CTTC (brevet FR1160790) qui consiste à piloter une buse projetant un aérosol sec de particules céramiques à vitesse supersonique sur un substrat ; le dépôt obtenu est cohésif, dense et nanostructuré sans qu'il y ait besoin de recourir à une source énergétique externe (laser ou chaleur).

Les principaux vendeurs de machines utilisant cette technologie sont BeAM (France), Optomec (USA) et TRUMPF (Allemagne).

6. Fusion de fil au travers d'une buse chauffante

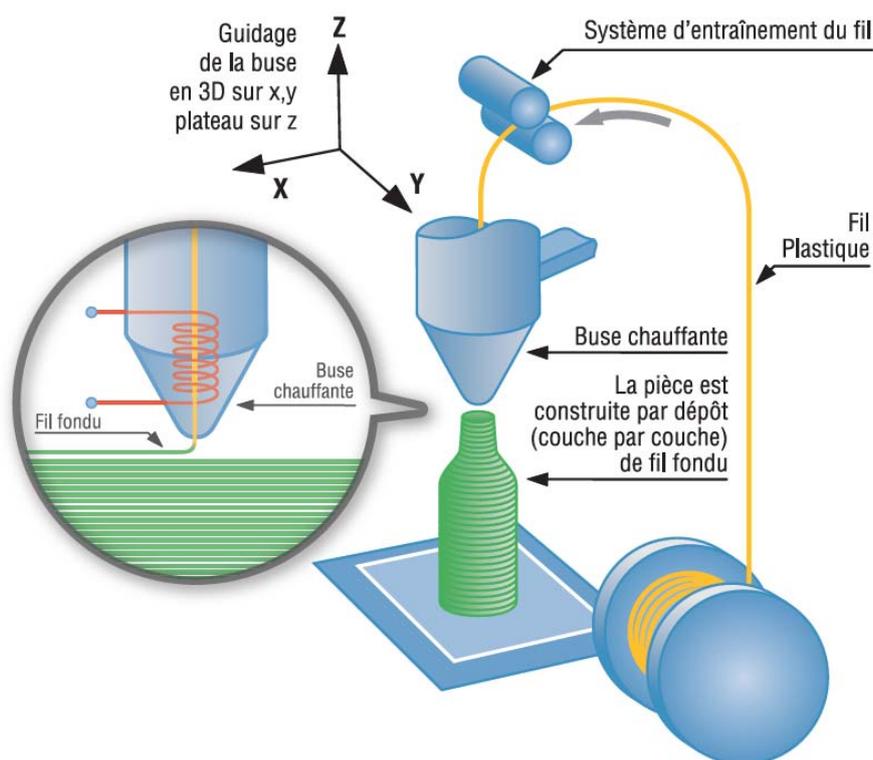
La technologie FDM (*Fused Deposition Modeling*) consiste à extruder du fil pour fabriquer des pièces. C'est un procédé rapide et bon marché, ce qui en fait un procédé relativement grand public. Le principe étant relativement facile à maîtriser, de nombreuses machines ont été conçues par des amateurs passionnés et peuvent être réalisées par tout un chacun sur la base de plans *open source* disponibles sur Internet (le principe des machines RepRap). Ces créations sont souvent le fruit d'un travail collaboratif à l'instar des logiciels *open source* et ont été pour la plupart à l'origine des développements des FabLabs. La technologie d'extrusion thermoplastique est ainsi devenue une des technologies de fabrication additive les plus couramment utilisées et certainement l'une des plus connues du grand public. Cependant, on trouve également des technologies de fusion de fil métallique.

Une bobine délivre un fil calibré de matière plastique de 1,75 ou 3 mm de diamètre à travers une buse d'extrusion qui va chauffer ce matériau entre 180°C et 240°C et le comprimer afin de générer un écoulement constant de matière en fusion. Le plastique se refroidit et durcit immédiatement au contact de la couche précédente et se lie ainsi à elle. L'accroche entre les

différentes couches reste le point négatif majeur de cette technologie du fait des faibles propriétés mécaniques des pièces fabriquées. En effet, lors du dépôt du fil sur la couche inférieure, le choc thermique entraîne pour certains matériaux un phénomène de collage et non de soudage. Ce manque de tenue entre les différentes couches peut entraîner un délaminage des différentes couches. Cette technologie offre également la possibilité d'utiliser plusieurs buses de dépôt pour mixer les matériaux ou déposer du fil soluble (ou fusible à basse température) pour réaliser des structures complexes incluant des supports à retirer.

Les principaux fabricants de machine utilisant cette technologie sont Stratasys (USA), Makerbot (USA), 3D systems (USA), Seraph Robotics (USA), XYZ Printing (Taïwan) et beaucoup d'autres petits fabricants partout dans le monde. Les matériaux disponibles pour cette technologie sont nombreux. Les plus répandus sont le PLA (acide polylactique), l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) et le nylon du fait de leur température de fusion inférieure à 300°C et à leur facilité de mise en œuvre. Des matériaux spécifiques ont été développés par des vendeurs de machines pour obtenir des propriétés mécaniques supérieures. C'est notamment le cas de l'ULTEM, un matériau thermoplastique par dépôt de fil fondu développé par Stratasys.

Dans le cas des matériaux céramiques, cette technologie peut être mise en œuvre à l'aide d'imprimantes à fil conventionnelles pour lesquelles le filament utilisé est un composite thermoplastique/céramique ou à l'aide d'un dispositif de micro-extrusion piloté utilisant un dispositif de dépôt pour fluide visqueux à vis ou piston. Les pièces doivent subir des traitements thermiques après impression (séchage et/ou cuisson).



Fusion de fil au travers d'une buse chauffante - FDM
© CIRTES et © DUNOD 2015

Figure 79 : Fusion de fil au travers d'une buse chauffante - FDM

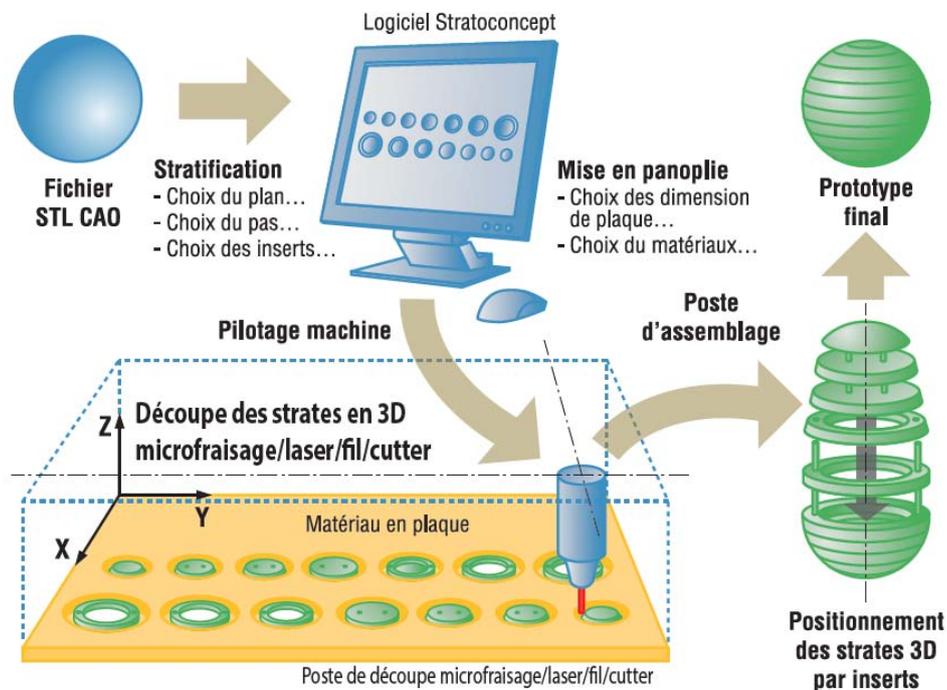
7. Assemblages de couches à partir de feuilles ou de plaques découpées

D'une manière générale, cette famille de technologie de fabrication additive se base sur la découpe de matériau en feuille. Plusieurs variantes de cette technologie ont été proposées depuis la fin des années 1980. Ces technologies ont donc compté parmi les technologies pionnières et ont pu présenter des versions commerciales dès le début des années 1990. Cette

famille peut être scindée en deux sous-catégories mettant en œuvre deux types de matériaux en feuilles différents : les feuilles fines et les feuilles épaisses (plaques). Le principe de ces technologies reste semblable : les couches sont découpées, empilées et assemblées, dans un ordre différent selon le procédé.

Le procédé Stratoconception® consiste à décomposer la pièce, par calcul, en un ensemble de couches élémentaires, appelées « strates », dans lesquelles sont introduits des renforts et inserts. Les pièces élémentaires sont identifiées et fabriquées directement par des procédés rapides, simples et connus, à partir de matériaux en plaques. Ces pièces élémentaires sont ensuite assemblées pour reconstituer le produit final. L'assemblage est pris en compte dès la décomposition, il est conçu pour participer à la tenue aux sollicitations mécaniques subies par la pièce dans son contexte d'utilisation. Les inserts jouent un rôle de positionnement et de liaison entre couches.

Cette technologie est utilisée pour réaliser des maquettes en bois, polymère, résine, des outillages en polymère et en métal particulièrement de grande taille. Par exemple, en fonderie pour réaliser des modèles en polystyrène fusibles destinés aux pièces de grandes dimensions (plusieurs tonnes) en acier ou en fonte.



Assemblage de couches à partir de plaques découpées - Stratoconception
© CIRTES et © DUNOD 2015

Figure 80 : Assemblage de couches à partir de plaques découpées - Stratoconception

Les principaux constructeurs de machines avec cette technologie sont MCOR Technologies (Irlande), Cirtes (France).

Les matériaux utilisés pour la fabrication additive

Matériaux métalliques utilisés en fabrication additive

Cas des procédés avec fusion – Exemple du SLM

Les métaux éligibles à la fabrication additive doivent répondre à trois principaux critères : être soudable, disponible sous forme de grains sphériques et d'une granulométrie suffisamment fine (plus fine pour les procédés en lit de poudres que pour les procédés avec fusion). Le critère de soudabilité métallurgique est primordial pour les procédés avec fusion. Pour un matériau donné deux conditions doivent être satisfaites :

- L'existence d'une paramétrie (énergie, quantité de matière, etc.) de mise en œuvre validée ;
- L'existence de sous-traitants expérimentés.

Le Cetim a répertorié récemment plus d'une cinquantaine de nuances de métaux disponibles élaborés par une quinzaine de fournisseurs dans le monde, parmi lesquels on trouve AMA, Sandvik (Suède), ERASTEEL (Paris), Carpenter (USA), Oerlikon (France), TEKNA (Canada), Höganäs (Suède). Les principales catégories de métaux disponibles sous forme de poudres sont les suivantes :

- Aciers : 100Cr6, 20Ni Cr Mo2, 16Mn Cr5, etc.
- Aciers à outils : maraging 300, X100CrMoV5, X40CrMoV5, ASP 2060, Vanadis23, etc.
- Aciers inoxydables : 304L, 316L, 17-4PH, Duplex 25Cr, CX (outillage), etc.
- Alliages réfractaires : Tungstène ou par exemple le développement récent du Vibenite 60, acier à dispersion de carbures à 7 % Mo et 6,5 % W
- Titane commercial pur
- Alliages de titane : Ti-A6V, TA6V ELI (médical)
- Alliages d'aluminium : AlSi12, AlSi10Mg, etc.
- Alliages base nickel : Inconel 625, Inconel 718, superalliages (applications très hautes températures) : Waspaloy, Hastelloy, EOS HX...
- Alliages chrome-cobalt
- Alliages cuivreux
- Or
- Argent

Cette liste s'allonge année après année. Des collaborations s'opèrent entre fabricants de systèmes de production et leurs clients, par exemple entre EOS et Morris Technologies, filiale de GE Aviation (acier 17-4 PH) pour le procédé DMLS. Rp+m a développé un matériau en tungstène fritté pour les systèmes ExOne. Ce matériau s'intègre dans le développement de matériaux réfractaires.

Matériaux utilisés avec le procédé CLAD

Colonne CLAD : fabrication additive

Colonne Cladding : réparation ou rechargement

tested materials	general applications tested at IREPA LASER	CLAD*	Cladding
SS 316L	corrosion resistance	▲▲▲	▲▲▲
Cp Ti	bio-medical applications	▲▲▲	
TA6V	structure parts, bio-médical applications	▲▲▲	▲▲▲
alloy TiSn	parts for aeronautics	▲▲▲	
yellow gold 750/1000	jewelry	▲	
base Cu	surface reinforcement on Al or interface layers	▲▲	▲▲▲
W	High T° resistance	▲▲	
alloys Al (Si, ...)	repairing	▲	▲▲
INCO 718	high T° resistance	▲▲▲	▲▲▲
INCO 625	parts for aeronautics	▲▲	▲▲
INCO 713	parts for aeronautics	▲	
APX4	Corrosion resistance	▲▲▲	▲▲▲
stellite 1	abrasive resistance		▲
Stellite 6, 12, 21, 25	abrasive resistance		▲▲▲
WC + base Ni, Co, ...	abrasive resistance		▲▲▲
tool steel H13, D7, T15	dies, molds, ...		▲▲
tool steel CPM 10V, M2	dies, molds, ...	▲▲▲	▲▲▲
Waspalloy	parts for aeronautics	▲▲	▲▲
SS 410, 440, ...	corrosive resistance average		▲▲ ↔ ▲▲▲
Hatfield steel	abrasive resistance		▲▲▲

Figure 81: Exemples de matériaux utilisés pour le procédé CLAD® (Source : IREPA Laser)

Cas des procédés sans fusion

Les procédés n'utilisant pas de fusion laser ont pour principe de déposer une succession de couches de poudre métallique dont les grains sont agglomérés par une projection de liant polymère qui est éliminé par combustion avant que le squelette métallique soit consolidé par frittage. Tout matériau sous forme de poudre étant frittage, tous les aciers sont *a priori* éligibles et peuvent être associés à des céramiques ou des carbures.

La filière industrielle poudre alimente depuis longtemps la métallurgie des poudres qui comprend des procédés comme le MIM (Metal Injection Moulding), la projection thermique ou le CIC (compression isostatique à chaud) ou HIP en anglais. Les critères de la fabrication additive en lit de poudres demandent les mêmes poudres que le MIM, et les procédés d'apport direct de matière les mêmes que la projection thermique.

Cas particulier du dépôt de fil métal

Le procédé Sciaky est basé sur la fusion de métal apporté sous forme de fil à la place de la poudre. La source de matière première est identique.

Matériaux polymères utilisés en fabrication additive

Pour la fabrication additive des matériaux polymères, il existe quatre types de matière première ou *feedstock* : le fil pour le procédé FDM, la poudre pour les procédés SLS et *binder jetting*, la résine liquide (avec ou sans charge) pour le procédé SLA et les granules ou les plaques pour les procédés *material jetting* et LOM. En fonction des procédés de fabrication, des additifs sont ajoutés aux polymères pour améliorer les caractéristiques des pièces fabriquées mais aussi améliorer le comportement du matériau lors du *process* de fabrication (amélioration de la tenue en température, de l'adhérence des couches entre elles...).

Actuellement, chaque procédé travaille principalement avec une famille de polymère assez réduite :

- SLS → famille des polyamides : PA11, PA12, PA coloré, PA chargé aluminium, PA chargé carbone, PA avec retardateur de flamme...
- SLA → résines photopolymères rigides, chargées, souples, transparentes...

- FDM → thermoplastiques (amorphes de préférence) : PLA, ABS, PA, PC, POM...

Pour les machines « professionnelles », la matière est très souvent vendue par le vendeur de machines et pour certaines machines, il est impossible d'utiliser une matière non vendue par le fournisseur de machines. C'est le cas, par exemple, des machines Stratasys pour lesquelles il est impossible de modifier les paramètres de fabrication pour adapter un fil polymère non fourni par Stratasys.

Il est important de noter que des matériaux polymères ont été qualifiés pour des applications aéronautiques. C'est le cas de l'ULTEM, un PEI (polyétherimide) fourni au départ par la société Sobic qui a été mis en œuvre par Stratasys (ULTEM 1010 et ULTEM 9085) pour répondre aux besoins de la société Airbus. Le matériau est donc « avionable » et sera utilisé pour la fabrication de pièces pour l'A350.

Cas particulier des procédés polyjet

La plupart des procédés multijet utilisent deux types de cire, une pour la construction du modèle et une autre pour le support lors de la construction couche par couche de la pièce.

Les matériaux principalement utilisés pour la réalisation de modèles fusibles sont des cires de modelage, des thermoplastiques à bas point de fusion et des photopolymères. Les propriétés importantes de ces résines et cires destinées à la fonderie cire perdue²²⁵ sont le taux de cendre restant une fois l'opération de décirage réalisée, la dilatation de la cire lorsque l'on chauffe la grappe de coulée afin de ne pas déformer/endommager la carapace ainsi que la résistance mécanique de la cire pour que le modèle ne se déforme pas sous sa propre masse. Plus les caractéristiques du matériau sont élevées, plus il sera possible d'avoir une géométrie petite et complexe avec des parois minces.

Ce qui différencie les technologies, c'est la façon dont la cire support est enlevée. Selon les fabricants, cela peut être de façon manuelle ou à l'aide d'un solvant qui dissout le matériau support dans un bain-marie.

Matériaux polymères	SLA	MJ	BJ	FDM	SLS	LOM	CLAD
Photopolymères	X	X					Pas de polymères
Photopolymères rigides	X						
Photopolymères chargés	X						
Photopolymères flexibles	X						
Photopolymères transparents	X						
Photopolymères opaques	X						
Cire	X	X	X				
ABS		X	X	X			
POM				X			
HIPS		X		X			
PC		X	X	X			
PET				X			
PLA				X			
PA			X		X		
PA 11					X		
PA 12				X	X		
PA flexible					X		

²²⁵ Procédé de moulage à partir d'une sculpture originale en cire

PA glass filled					X	
PA mineral fibre filled					X	
PA carbob fibre filled					X	
PVA				X		
PP		X		X	X	
ASA				X		
PEI (Ultem)				X	X	
PPSF				X		
TPU				X	X	
PAEK					X	
PEA					X	
PS		X			X	
HDPE		X				
PMMA		X				
EDP		X				
PVC						X
PEEK					X	

Figure 82 : Matériaux polymères utilisés en fabrication additive

Material Jetting	Projection de matières
VAT	Comme du SLA
MJ	Projection de matière
BJ	Étalement de poudres puis projection de liants
DED	Comme du DMD ou <i>Cladding</i>
LOM	Collage feuille par feuille, similaire à de la stratoconception

Matériaux céramiques utilisés en fabrication additive

Liste des matériaux céramiques et technologies de fabrication additives associées et leurs applications industrielles :

Matériaux	SLA	SLS	BJ	FDM	IJP/AJP	DED
Céramiques structurales						
Oxyde de zirconium (ZrO ₂)	X	X	X	X	X	
Alumine (Al ₂ O ₃)	X	X	X	X	X	
Alumino-silicates (Al ₂ O ₃ / SiO ₂)	X	X		X		X
Al ₂ O ₃ / SiO ₂ / Mullite / ZrSiO ₄	X					
Carbure de silicium (SiC)		X	X			
Nitrure de silicium (Si ₃ N ₄)	X			X		
Oxynitrure et oxycarbure de silicium (Si-O-C / Si-O-N)	X					

MAX Phase			X	X		X
Céramiques fonctionnelles						
Céramique piézoélectrique (PZT)	X	X		X	X	
Titanate de barium (BaTiO ₃)				X	X	X
Oxyde d'indium-étain (ITO)				X	X	
Biocéramiques						
Alumine (Al ₂ O ₃)	X	X		X		
Oxyde de zirconium (ZrO ₂)	X		X		X	
Phosphate de calcium tri ou tétracalcique (TCP/TTCP)	X		X	X		
Hydroxyapatite (HA)	X	X	X	X		
Autres céramiques et liants hydrauliques						
Porcelaine et argiles		X	X	X		
Béton			X	X		

Figure 83 : Matériaux céramiques utilisés en fabrication additive

Le cas particulier des sables

Il existe plusieurs fabricants de machines de projection de liant adaptés pour la fabrication de pièces en sable. La principale application des pièces en sable concerne les noyaux pour les moules de fonderie. En effet, la fabrication additive permet de réaliser des noyaux très complexes sans avoir recours à une maquette. Les liants utilisés pour le sable sont des résines furanique, phénolique ou inorganique (moins utilisée en fonderie). La résine furanique est la plus utilisée à ce jour mais du fait de la difficulté de recyclage et la précision, la résine phénolique est en train de s'imposer peu à peu.

Annexe 3 : une dynamique internationale

Analyse des brevets

Quelques données de la littérature

La fabrication additive fait partie des six innovations de rupture identifiées par l'Office mondial de la propriété intellectuelle (WIPO) :

- Aéronautique
- Antibiotiques
- Semi-conducteurs
- Impression 3D
- Nanotechnologies
- Robotique

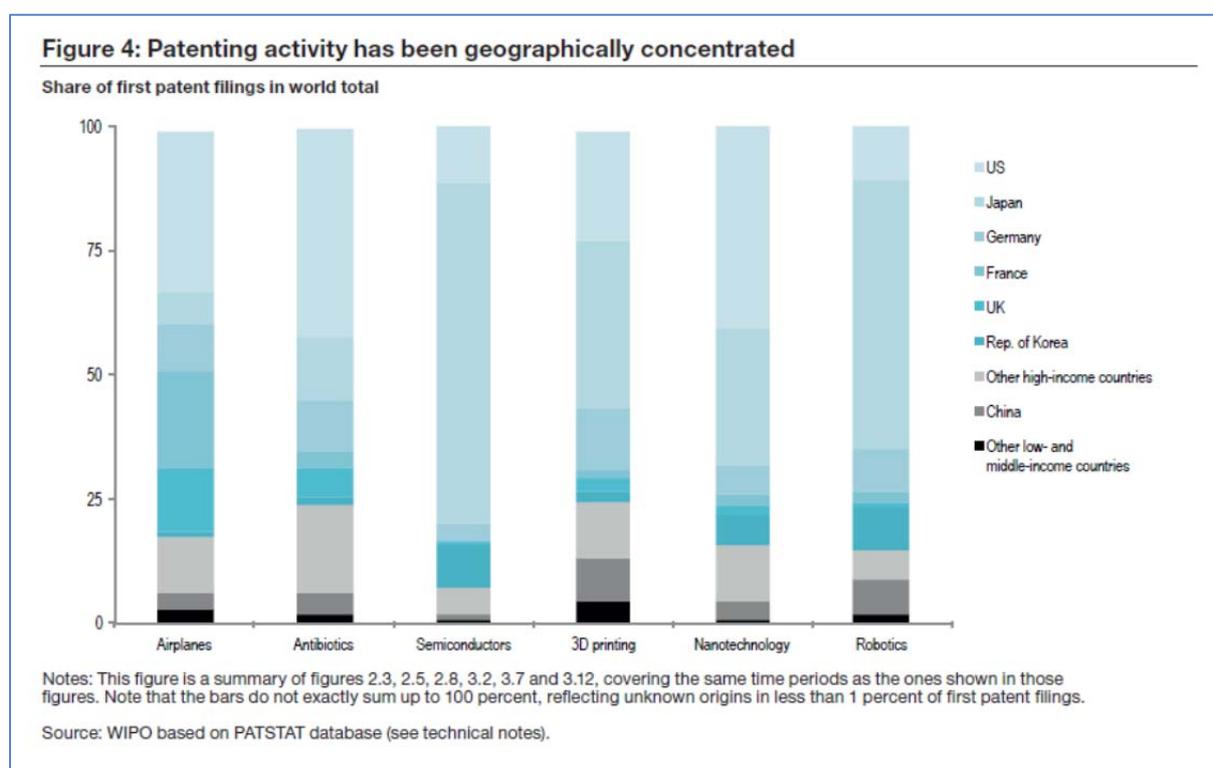
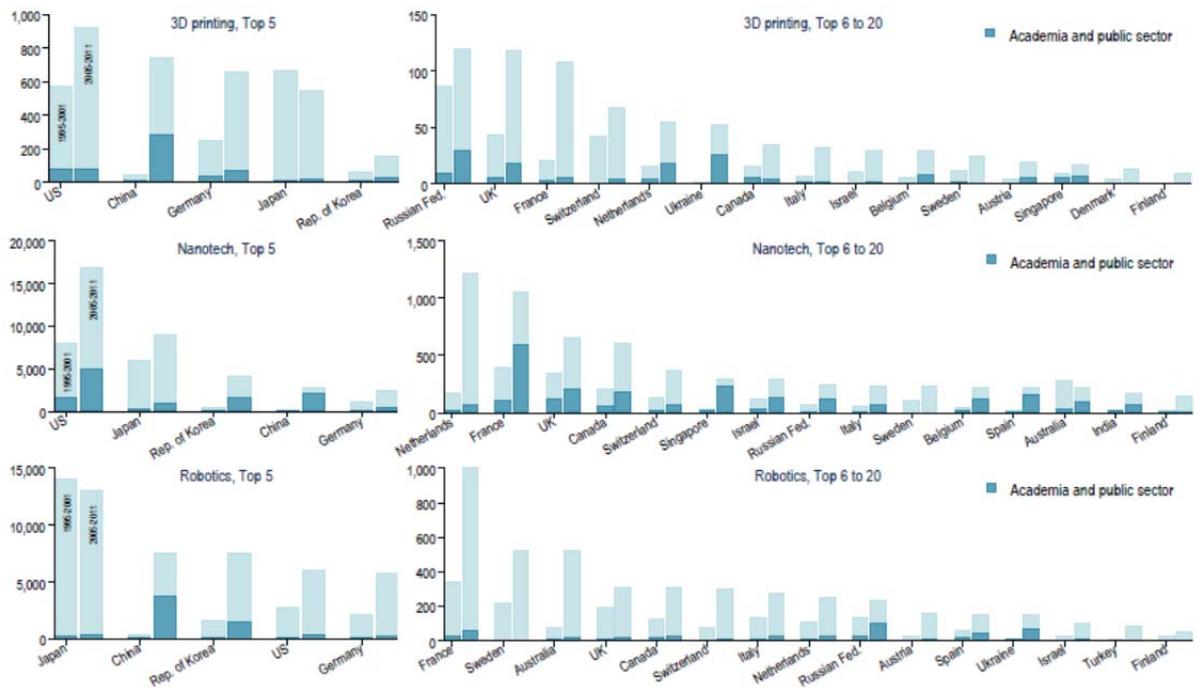


Figure 84 : Part des principaux pays pour chacune des six technologies de rupture dont la fabrication additive

Sur la période 2005-2011, en nombre de premiers dépôts de brevets, la France se situe en 8^e position après les États-Unis, la Chine, l'Allemagne, le Japon, la Corée du Sud, la Russie et le Royaume-Uni. Avec plus de 100 dépôts sur la période, elle est en très forte progression par rapport à la période 1995-2005. La fabrication additive est toutefois en France beaucoup moins l'objet de brevets que les nanotechnologies ou que la robotique qui compte chacune environ 1 000 demandes sur la période. La France apparaît donc comme un pays de rang 2 en termes de propriété industrielle dans le domaine de la fabrication additive.

Figure 5: Which countries drive patenting in 3D printing, nanotechnology and robotics?

Top 20 origins in first patent filings, 1995-2001 and 2005-2011



Source: WIPO based on PATSTAT database (see technical notes).

Figure 85 : Pays moteurs du dépôt de brevets en fabrication additive, nanotechnologies et robotique

Table 3.1: A select few 3D printing processes

Year*	Technology	Type	Original Inventors	Company
1984	Stereolithography	Vat photopolymerization technique – a liquid photopolymer is solidified by a control light source, i.e. an ultraviolet laser. This laser hardens the exposed regions of the polymer. The process is repeated layer by layer until the object is finished.	Charles Hull (while at UPV, Inc.)	3D Systems
1986	Selective laser sintering	Powder bed fusion technique – a laser beam is applied to a layer of powder deposited on a build platform. The laser sinters the material into the right shape. Then the build platform moves down and the laser draws the next layer.	Carl Deckard (PhD project at University of Texas, Austin)	University of Texas, Austin, licensed to Nova Automation, later renamed DTM Corporation – acquired by 3D Systems in 2001
1989	Fused deposition modeling; generally known as thermoplastic extrusion methods (see box 3.2)	Material extrusion process – material is selectively dispensed through a nozzle or orifice.	Scott Crump	Stratasys
1989	3DP (three-dimensional printing)	Binder jetting process – an inkjet print head disperses glue to locally bind powder material, similar to the workings of a normal inkjet printer.	Emanuel Sachs and team	MIT licensed to several companies for commercialization, notably Z Corporation, which was later acquired by 3D Systems in 2012

*Refers to the first patent filing year.

Source: Bechtold (2015).

Figure 86 : Une sélection de brevets sur la fabrication additive

Les familles de brevets de **Michelin** portent également sur la fabrication à partir de poudres métalliques (10) mais aussi sur le façonnage des plastiques (9). Elles concernent le travail par laser (4) et par faisceau d'électrons (2). Parmi les familles de brevets apparaissant sur le graphique, certaines ne concernent que Michelin et portent sur le caoutchouc, les pneumatiques et leur fabrication.

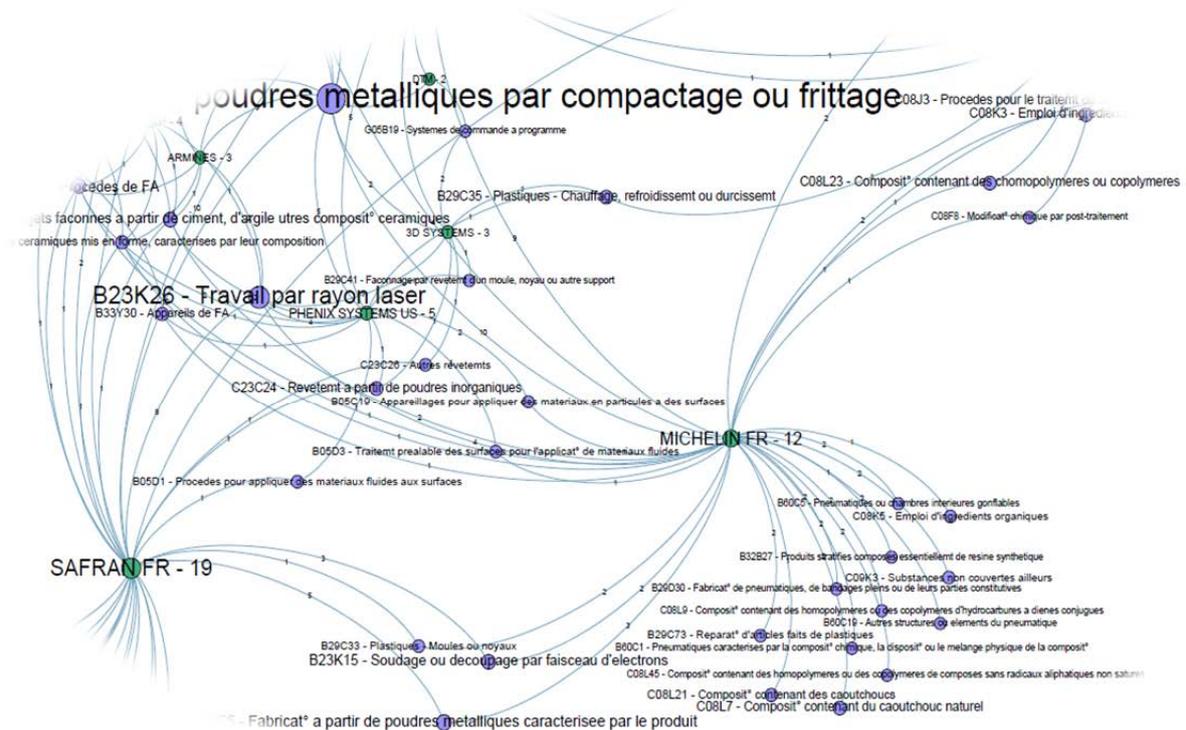


Figure 89 : Cartographie des liens entre Michelin et les rubriques de la Classification Internationale des Brevets

Plusieurs déposants forment un groupe d'acteurs dans le domaine de la chimie, des polymères, des plastiques et de la pharmacie : **Rhodia** (3) – filiale de Solvay depuis 2011, **Arkema** (2) – ex. Total avant 2004 – et **Sanofi-Aventis** (2004-2011) maintenant Sanofi (2). Le classement de leurs brevets présente peu de points communs avec les autres déposants si ce n'est Michelin et plutôt dans le domaine de la chimie.

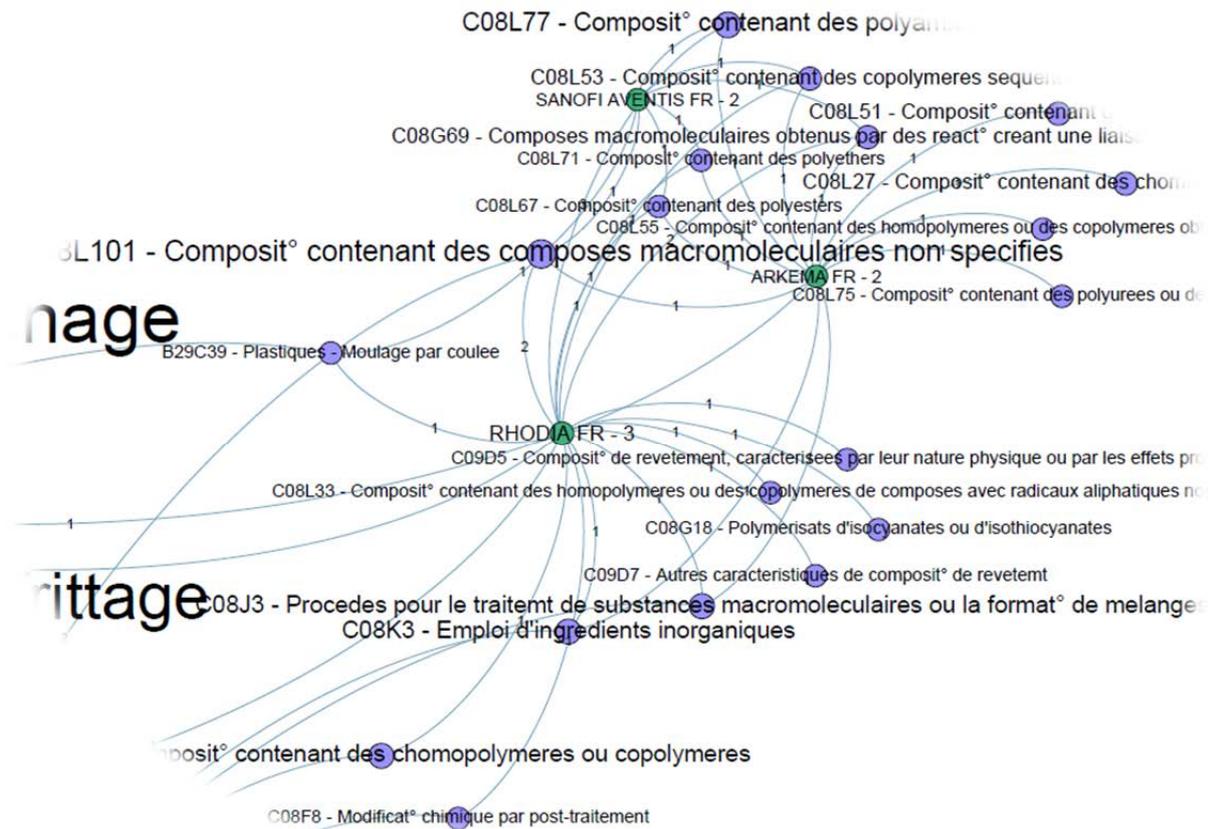


Figure 90 : Cartographie des liens entre Rhodia, Arkema, Sanofi et les rubriques de la Classification Internationale des Brevets

Trois entreprises industrielles apparaissent enfin avec des fréquences plus faibles :

- Deux grands groupes : L'Oréal et Essilor,
- Une PME française spécialisée dans les filtres céramiques dont le marché est mondial, TAMI Industries.

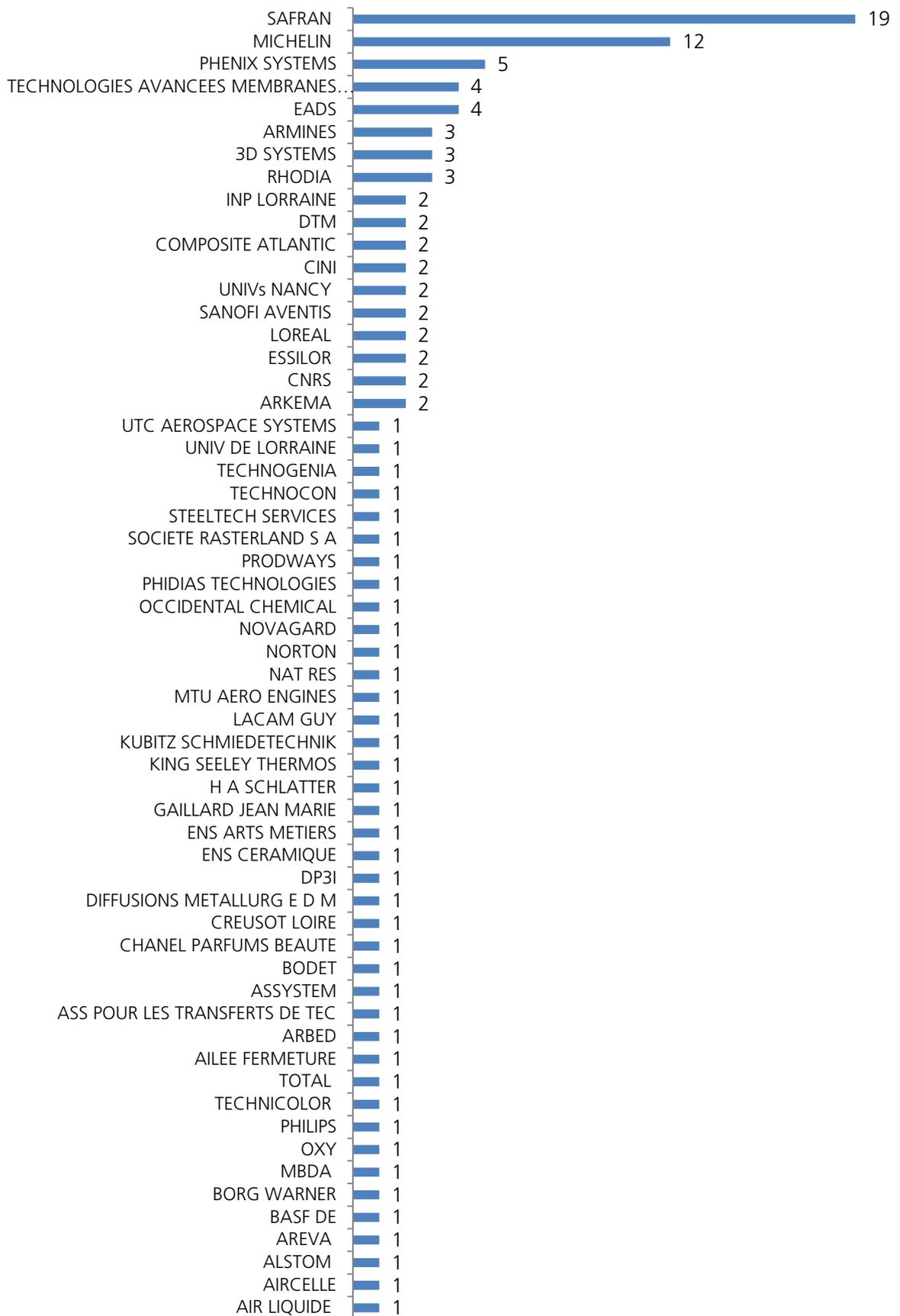


Figure 91 : Les acteurs qui déposent ou étendent leurs brevets en France

Annexe 4 : outils d'analyse utilisés pour l'étude

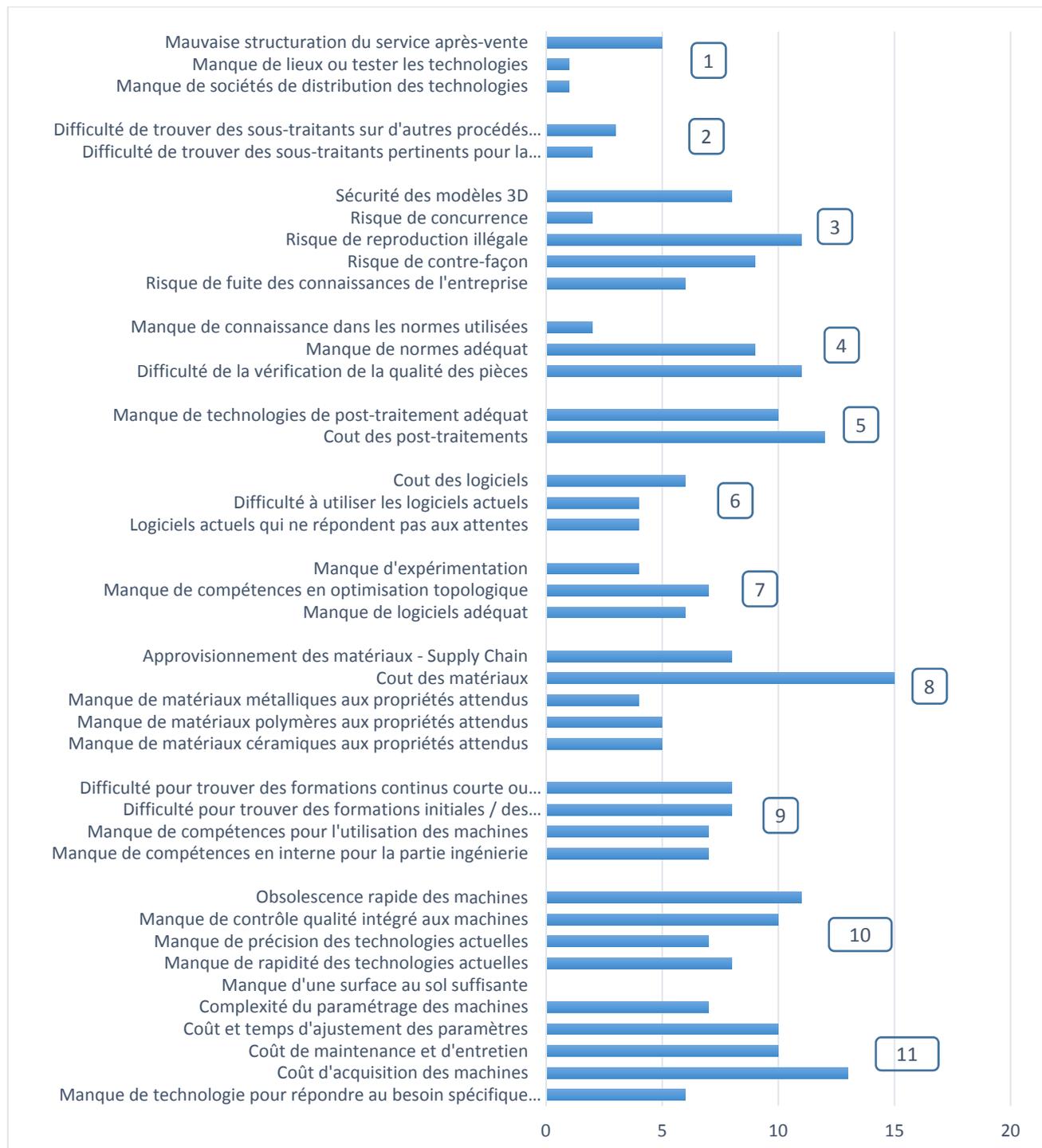


Figure 92 : Principaux freins et menaces à l'adoption de la fabrication additive – Nombre de personnes consultées jugeant le critère comme un frein ayant un impact fort²²⁶

Dans le tableau suivant sont répertoriés des retours d'analyse propre à chaque famille de critère. Lorsque cela est nécessaire, les critères sont identifiés par un niveau de numérotation supplémentaire (exemple 1.1 pour la mauvaise structuration du service après-vente, ou 1.2 pour le manque de lieux où tester les technologies).

²²⁶ La numérotation des familles de freins fait écho au tableau ci-dessous qui cherche à nuancer les retours obtenus en fonction de l'analyse objective et globale de la filière explicitée tout au long de l'étude.

Numéro des familles de freins concernés	Retour d'analyse concernant les résultats
1-2-3	Freins transverses peu bloquants.
4.1	Prioritaire et bloquant pour tout ce qui est nouveau matériaux (normalisation et qualification des pièces/des procédés/des matériaux...) Il n'existe aucun moyen de savoir si une pièce est recevable ou non.
4.3	Confirmé, c'est un problème majeur. Pas tant les outils de contrôle, mais plutôt le référentiel. Peu de coordination entre les acteurs qui ne partagent pas les pratiques de qualification.
5.1 – 5.2	Très important, car les étapes manuelles sont difficilement automatisables. Frein à court terme et majeur pour l'industrialisation et la délocalisation.
6.1 – 6.2	Il s'agit ici de la méthodologie de conception, davantage que de la difficulté d'utiliser le logiciel, qui est bloquante. Risque de la chaîne de production automatisé : manque d'observation humaine, pas d'étapes de validation humaine. Frein bloquant : manque de méthodologie, œillère qu'ont les concepteurs. Il s'agit de problématiques RH. Il est nécessaire de concevoir pour une fonctionnalité, et non pour un procédé de fabrication. Les outils représentent ici les étapes de reconstruction bloquantes à court terme.
7.1 – 7.3	Ce n'est pas prioritaire.
8.1	Problématique des lots de poudres, avec une mauvaise répétabilité des lots. Pas de solutions identifiées par les acteurs pour contrer la mauvaise répétabilité, et la différence de spécifications d'un lot de matière à un autre. Problème de production à la demande, pas de grosses capacités de production, pas de stocks. C'est bloquant pour lancer des programmes industriels.
8.2	C'est un faux problème. À court terme, ça ne se jouera ni sur le prix de la poudre, ni sur le prix du procédé. Le problème est rarement considéré dans sa globalité au niveau des coûts. Même si le prix diminue de 50 %, ça ne changera rien. C'est une opportunité, car on peut proposer des matériaux à plus haute performance. Les industriels utilisent systématiquement le matériau le plus cher, à la vue des prix globalement élevés.
9.1	C'est un frein transverse. Difficulté d'identifier des gisements de compétences pour répondre à la demande. La conception ne doit pas être pensée uniquement pour la fabrication additive, mais pour une fonction précise. Besoin d'experts sur les procédés métallurgiques, avec de multicompetences en optique, matériaux, automatisme et métallurgie.
10.1	Les machines actuelles sont trop artisanales. Ce sont des prototypes machines pour faire des prototypes, et pas pour de la production industrielle. Frein court terme pour des PME, frein à l'investissement car c'est dur de trouver une rentabilité. Véritable attente, car les machines actuelles ne sont pas satisfaisantes. Verrou : machines artisanales pas suffisamment industrialisées. Attentes : machines industrielles.
10.2 – 10.4	Il s'agit ici partiellement de critères de fond. Problème de la répétabilité des pièces. Principal frein à l'industrialisation pour de la production série : pour une même machine, on n'arrive pas à obtenir des pièces identiques. Mauvaise répétabilité (sauf Michelin qui y est arrivé au bout de 3 ans).
10.7	Coût des machines : c'est surtout l'obsolescence. C'est comme le prix de la poudre. Ce n'est pas un problème pour faire de la production. Sur le bas de gamme, le coût va diminuer. Mais sur les machines industrielles, ça risque d'augmenter. On aura les mêmes performances pour moins cher, ou on ira plus vite pour le même prix.

Freins à l'adoption	Aéro	Spatial	Auto	Ferroviaire	Médical	Énergie	Retail	Grand Public	BTP	Sous traitance	Joallerie
Procédés											
Manque de technologie pour répondre au besoin spécifique de l'utilisateur									X		
Coût d'acquisition des machines		X	X	X		X		X			X
Coût de maintenance et d'entretien			X	X					X	X	
Coût et temps d'ajustement des paramètres			X	X	X	X			X	X	
Complexité du paramétrage des machines				X	X	X			X	X	
Manque d'une surface au sol suffisante											
Manque de rapidité des technologies actuelles			X				X	X		X	
Manque de précision des technologies actuelles	X				X					X	
Manque de contrôle qualité intégré aux machines		X		X		X				X	
Obsolescence rapide des machines	X	X			X					X	
Compétences											
Manque de compétences en interne pour la partie ingénierie								X	X	X	
Manque de compétences pour l'utilisation des machines					X				X		
Difficulté pour trouver des formations initiales/des personnes formées en sortie d'école	X	X				X				X	X
Difficulté pour trouver des formations continues courte ou longue durée			X			X				X	
Matériaux											
Manque de matériaux céramiques aux propriétés attendus		X				X			X		
Manque de matériaux polymères aux propriétés attendus						X			X		
Manque de matériaux métalliques aux propriétés attendus						X			X		
Coût des matériaux			X		X	X	X		X	X	X
Approvisionnement des matériaux - <i>Supply Chain</i>	X	X			X	X		X	X		
Conception											
Manque de logiciels adéquat						X			X		
Manque de compétences en optimisation topologique						X		X	X		
Manque d'expérimentation								X	X		
Logiciels											
Logiciels actuels qui ne répondent pas aux attentes											
Difficulté à utiliser les logiciels actuels							X				
Coût des logiciels										X	X

Post-traitement										
Coût des post-traitements	X		X	X			X			X
Manque de technologies de post-traitement adéquat		X								X
Qualité - Normes										
Difficulté de la vérification de la qualité des pièces	X		X	X		X				X
Manque de normes adéquat				X	X	X				X
Manque de connaissance dans les normes utilisées				X			X			
Sécurisation - Propriété intellectuelle - concurrence										
Risque de fuite des connaissances de l'entreprise	X			X						
Risque de contrefaçon				X						
Risque de reproduction illégale			X	X		X	X			
Risque de concurrence			X	X						
Sécurité des modèles 3D		X		X			X			
Sous-traitance										
Difficulté de trouver des sous-traitants pertinents pour la fabrication additive						X				X
Difficulté de trouver des sous-traitants sur d'autres procédés complémentaires (usinage...)		X								
Distribution - Plateformes										
Manque de sociétés de distribution des technologies										
Manque de lieux ou tester les technologies										
Mauvaise structuration du service après-vente						X	X			

Figure 93 : Analyse statistique des principaux freins par marchés d'applications

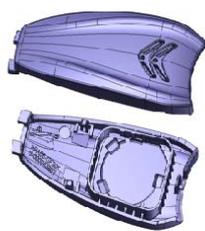
Annexe 5 : analyse de pièces (versions complètes)

Analyse de la fabrication d'un boîtier de clé

Introduction

La fabrication de toutes les pièces plastiques pourra, grâce à la fabrication additive, se faire de trois façons : fabrication directe de pièces, injection de pièces dans un moule rapide à bas coût réalisé en fabrication additive polymère et injection de pièces dans un moule avec régulation optimisée en fabrication additive métallique. Pour illustrer, voici un exemple pour un boîtier de clé de voiture (50 x 15 x 5 mm, 10g) selon trois axes de lecture.

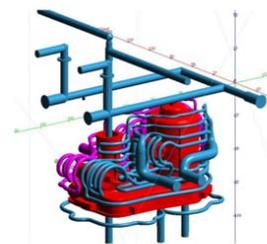
Les habitudes de consommation actuelles tendent vers l'ultrapersonnalisation : chaque acheteur souhaite avoir un produit unique sur-mesure. Pour cela, il est nécessaire de trouver des méthodes de fabrication permettant de fabriquer des pièces en petites séries avec un temps de développement ainsi qu'un coût minimum. L'industrie de la plasturgie est adaptée à la fabrication de pièces en très grand nombre de façons à pouvoir amortir les outillages. Or, il arrive régulièrement d'arrêter les productions de pièces bien avant la fin de vie des outillages du fait des effets de mode et des saisonnalités. La fabrication additive permet de répondre de façon immédiate à ce contexte de personnalisation extrême des produits car chaque pièce fabriquée peut être unique sans besoin d'outillage. Par contre, les temps de fabrication, les taux horaires des machines de fabrication ainsi que le coût des matières premières sont bien loin des méthodes de production « classique ». C'est donc dans ce contexte qu'il est nécessaire de trouver quels sont les critères permettant de justifier l'emploi de la fabrication additive sous différentes formes



Pièces directes



Empreintes de moule polymère



Empreintes de moule Conformal cooling

Comparaison avec les procédés conventionnels

Le boîtier de clé de voiture, et plus généralement les pièces plastiques, sont traditionnellement fabriqués en deux étapes : tout d'abord, la fabrication de l'outillage consiste en plusieurs opérations d'usinages d'un bloc d'acier à outillage pour les empreintes et de plaques de moules pour la carcasse. On peut compter près de 5 semaines de réalisation (avec 2 semaines supplémentaires pour les mises au point). Ensuite, la pièce plastique présentant une épaisseur de 2 à 3 mm est fabriquée par injection plastique ABS en 10 secondes de temps de cycle. Le coût unitaire de production d'un boîtier de clé selon ce procédé conventionnel est d'environ 1€ (sans compter le prix de l'outillage et son amortissement). La matière plastique (1€), utilisation presse 500T (40€/h) qui sont des coûts récurrents, ainsi que la fabrication et la mise au point de l'outillage (120 à 150k€) qui sont des coûts non récurrents.

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

Pour répondre aux demandes d'ultrapersonnalisation tout en limitant (ou diminuant) les coûts unitaires des pièces, trois possibilités d'utilisation de la fabrication additive ont été envisagées en fonction du nombre de pièces à produire :

- **Réalisation de pièces unitaires, prototypes, petites séries** : fabrication additive directe des pièces. L'objectif est d'obtenir des pièces de la façon la plus rapide possible sans réalisation d'outillage. Il est aussi possible de réaliser des formes impossibles à réaliser par les méthodes de fabrication traditionnelles. Cependant, les temps de fabrication, les matériaux disponibles ainsi que le coût des pièces ne permettent pas d'envisager cette solution pour des volumes de pièces importants (moins de 1 000 pièces) ;
- **Réalisation de moules rapides à bas coûts** : il est possible de fabriquer des empreintes de moule en fabrication additive polymère ce qui permet de réaliser des outillages à bas coûts (quelques centaines d'euros) pour injecter des pièces de façon « classique ». Il est néanmoins nécessaire de posséder une carcasse universelle standard pour accueillir les empreintes. La durée de vie d'empreintes polymère

devrait permettre de réaliser quelques dizaines de pièces. Mais étant donné le faible coût des empreintes, il pourra être envisagé de fabriquer plusieurs jeux d'empreintes pour obtenir le nombre de pièces souhaitées. Cette méthode sera donc réservée à des petites ou moyennes séries (entre 100 et 10 000 pièces) ;

- **Réalisation d'empreintes de moules *conformal cooling*** : la fabrication additive permet de fabriquer des outillages incluant des canaux de régulation complexes permettant de diminuer les temps de cycle et d'améliorer la qualité des pièces fabriquées par injection plastique. Le prix de l'outillage étant élevé, cette méthode de fabrication est réservée aux grandes séries de fabrication (un million de pièces ou plus) ou aux pièces nécessitant impérativement une régulation optimisée car s'il est possible de satisfaire tous les critères d'une pièce sans l'emploi de la fabrication additive, le coût sera certainement plus faible.

On peut aujourd'hui considérer que les trois scénarios vont évoluer en parallèle en fonction du niveau de personnalisation attendu. La réalisation de moules rapides à bas coûts est aujourd'hui un excellent levier pour sensibiliser les acteurs à la personnalisation de masse et aller plus loin que les séries limitées, comme c'est l'usage en automobile.

Chacune des trois méthodes de fabrication nécessite une technologie et des matériaux différents :

- Fabrication directe :
 - Technologies de fabrication additive polymère : FDM, SLS, SLA/DLP...
 - Matériaux courants en plasturgie : ABS, PA ...
- Moules bas coûts :
 - Technologies de fabrication additive polymère : FDM, SLS, SLA/DLP...
 - Matériaux techniques et/ou chargés pour résister à l'abrasion et la température du polymère injecté (PEI, PPS, PEEK, Composites, Polymère chargé céramique...)
- Moules *conformal cooling* :
 - Technologie de fusion laser de poudres métalliques : SLM ;
 - Acier à outillage : acier *maraging*, H11, H13...

Le coût unitaire d'un boîtier de clé est d'environ 1€ actuellement (sans compter le prix de l'outillage et son amortissement). Avec les perspectives actuelles de la fabrication additive voici le nombre de pièces permettant de choisir une méthode de fabrication :

- Fabrication directe : coût unitaire de 5,50€ rentable jusqu'à environ 1 000 pièces mais les pièces ne seront pas de même qualité que des pièces injectées (matière utilisée, résistance mécanique, état de surface...) et des post-traitements seront nécessaires pour obtenir une pièce similaire en termes d'état de surface, couleur, brillance...
- Moules bas coûts : coût des empreintes de 200€ pour 100 pièces rentables jusqu'à 10 000 pièces (le changement des empreintes peut entraîner un surcoût non pris en compte) mais avec une qualité supérieure à la fabrication additive directe,
- Moules « *conformal cooling* » : rentabilité à partir de 100 000 pièces par rapport à un moule « conventionnel » pour amortir le surcoût des empreintes obtenues par fabrication additive métallique.

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

Chacune des trois méthodes de fabrication possède des verrous différents :

- Fabrication directe :
 - Prix des pièces,
 - Temps de fabrication,
 - Matériaux disponibles,
 - État de surface (comparé à l'injection plastique) ;
- Moules bas coûts :
 - Technologie peu connue,
 - Réticence d'utiliser des outillages polymères pour injecter un polymère,
 - Temps de cycle supérieur,
 - Cinétique de cristallisation du polymère différente d'un moule métal (propriétés différentes du polymère) ;
- Moules *conformal cooling* :
 - Matériaux non usuels,
 - Temps de fabrication des empreintes,
 - Surcoût des empreintes par rapport à une version usinée.

Les verrous exprimés précédemment devraient être levés peu à peu dans les prochaines années du fait de :

- La diminution du prix des machines et de la matière première ;
- L'amélioration des technologies afin de pouvoir utiliser une plus grande variété de matières premières (notamment des matières usuelles métal et polymère) ;
- La démocratisation et les preuves de concept liées à l'emploi de la fabrication additive.

Impacts sur la chaîne de valeur

La fabrication additive permettra de démocratiser la personnalisation à bas coût avec des modes de production adaptés aux différentes séries. Les acteurs de la plasturgie sont déjà en train d'investir dans les différentes technologies de fabrication additive métal et polymère pour définir les possibilités (et limites) de chaque technologie afin de les utiliser au mieux dans le futur.

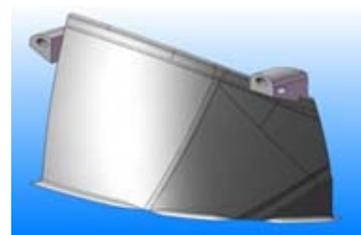
L'impact sur la filière classique de fabrication additive est l'implication directe de l'utilisateur final de la pièce (le client) dans la conception, ce qui oblige à réduire les temps de conception et de production. D'ici 2030, il est envisageable de trouver des sites de production « locaux » pour répondre aux demandes des clients avec un délai minimum en évitant les intermédiaires et les temps de livraison.

Analyse de la fabrication d'un tableau de bord

Introduction

La fabrication des casquettes de compteurs en plastique requiert un moule avec des parois fines à l'extrémité de la pièce. La faible épaisseur empêche de pouvoir réguler la température de l'outillage avec les méthodes de régulation « classique » par perçage. L'analyse est ici menée sur le cas des outillages pour les casquettes de compteurs, il s'agit de pièces de dimensions moyennes de l'ordre 165 x 40 x 175 mm pour une masse de près de 14 kg.

Le fait de ne pas pouvoir utiliser les méthodes de régulation classique dans les moules d'injection plastique oblige à augmenter les temps de cycle pour laisser le moule refroidir sans canaux de régulation. De plus, le refroidissement n'est pas homogène sur l'ensemble de la surface moulante ce qui entraîne des déformations de la pièce plastique lors du refroidissement. La qualité visuelle de la pièce finie est également impactée par ce manque de refroidissement. Dans le cas de la casquette de compteurs, le temps de cycle de fabrication de la pièce plastique avec les méthodes de fabrication conventionnelle est de 70 secondes. De plus, l'aspect de la pièce ne correspond pas au cahier des charges, il est donc nécessaire de réaliser une opération de peinture après l'injection plastique. Une opération de peinture peut représenter 30 à 50 % du prix d'une pièce plastique. L'utilisation de la fabrication additive pour la réalisation des empreintes de moules a permis d'accélérer le temps de reprise d'usinage et diminuer les temps de cycle et d'améliorer l'aspect de la pièce. L'étape de peinture n'est donc plus nécessaire. Dans ce cas, le retour sur investissement peut être immédiat car le surcoût lié à la fabrication additive est immédiatement amorti par la suppression de l'étape de peinture.



Comparaison avec les procédés conventionnels

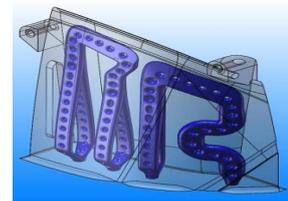
Les casquettes de tableaux de bord sont traditionnellement fabriquées en deux étapes : tout d'abord, la fabrication de l'outillage consiste en plusieurs opérations d'usinages d'un bloc d'acier à outillage pour les empreintes et de plaques de moules pour la carcasse. On peut compter 10 à 12 semaines de réalisation (avec 2 à 6 semaines supplémentaires pour les mises au point). Ensuite, la pièce plastique présentant une épaisseur de 3 à 5 mm est fabriquée par injection plastique de polyamide (PA 6.6) en 70 secondes de temps de cycle. Les coûts de production selon ce procédé conventionnel sont répartis ainsi : matière plastique (1,5€), utilisation presse 500 T (40€/h soit près de 0,8€/pièce) et peinture (0,45€) qui sont des coûts récurrents, ainsi que la fabrication et la mise au point de l'outillage (120 à 150k€) qui sont des coûts non récurrents.

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

Dans ce cas, la fabrication additive a permis de réduire le temps de cycle de 70 secondes à 43 secondes (soit une réduction de 35 %). Sachant que le chiffrage initial des pièces demandait un temps de cycle de 50 secondes, le

transformateur a pu répondre au cahier des charges et éviter des pénalités. Le refroidissement étant plus rapide et surtout plus homogène, l'étape de peinture a pu être supprimée ce qui a permis de réduire le coût unitaire des pièces. La meilleure gestion thermique a également permis de réduire de 50 % le temps de mise au point de l'outillage (soit 2 semaines) ce qui représente l'une des plus grosses économies sur l'outillage, les mises au point étant très onéreuses.

L'empreinte de moule a été fabriquée par fusion laser de poudres métalliques (SLM) car c'est la seule technologie de fabrication additive métallique qui permet la réalisation de pièces incluant des canaux de régulation à géométries complexes en utilisant un matériau compatible avec les sollicitations d'un outillage d'injection plastique à savoir l'acier *maraging*. Une fois la pièce fusionnée, il est nécessaire de réaliser différents post-traitements indispensables pour les pièces en fabrication additive métal (traitements thermiques, usinage, polissage, traitements de surface) mais ces opérations seront plus rapides. Le coût des deux empreintes est d'environ 21 000 € (soit un surcoût d'environ 30 % par rapport aux empreintes usinées). Pour les outillages, les productions sont toujours des petites séries (en fonction du nombre d'empreintes par moule). Le retour sur investissement a été quasi immédiat (environ 10 000 pièces) du fait de la suppression de l'étape de peinture. Les inserts avec canaux complexes obligent à mettre en place une qualité de régulation optimale car en cas d'obstructions par des corps étrangers ou des minéraux, les canaux ne pourront pas être débouchés. De plus, il faut utiliser un fluide de régulation avec des additifs évitant la corrosion de l'acier (exemple eau et glycol).



Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

Les verrous majeurs à l'adoption de la fabrication additive sont :

- **Le surcoût des empreintes** par rapport aux méthodes de fabrication « classiques ». Malgré un retour sur investissement parfois immédiat lors des phases de mise au point, le surcoût (estimation de 20 à 30 %) entraîné par la fabrication additive freine la démocratisation de cet usage.
- **L'acier *maraging* disponible sur les machines de fusion laser n'est pas un acier usuel** dans le milieu de l'outillage (H11 ou H13 par exemple) ce qui provoque quelques craintes quant à la tenue en service des pièces. En effet, la fabrication additive fonctionne mal avec les alliages qui comportent une forte teneur en carbone. Peu d'alternatives sont attendues d'ici 5 ans mais de nouvelles solutions devraient apparaître d'ici 15 ans.
- **La méconnaissance des possibilités de la fabrication additive** dans le domaine de l'outillage ralentit sa démocratisation.

Mis à part certains cas où l'on a des matériaux et des procédés qualifiés comme dans l'aérospatial, le médical ou l'automobile, notamment pour les pièces de sécurité, les industriels sont moins regardant sur les aspects normalisation et qualification car on reste dans la continuité d'un procédé existant (fabrication indirecte). Il convient enfin de noter qu'aucun mouliste ne fabrique des empreintes en fonction de normes ou de qualification, ce qui peut expliquer pourquoi la filière semble être en avance.

Les trois verrous exprimés précédemment devraient être levés peu à peu dans les prochaines années du fait de :

- La diminution du prix des machines et de la matière première (poudres métalliques). En effet, la matière représente pour un moule près de 50 % du prix global dans la mesure où les opérations de post-traitements et de contrôle sont moins nombreuses et moins coûteuses. Pour gagner du temps de fabrication et donc diminuer les coûts, il est possible de fabriquer les inserts de moule en partant d'une embase usinée. En effet, les pièces en fabrication additive avec des canaux complexes ne présentent pas souvent des complexités sur toute la hauteur, ce qui explique pourquoi près de 80% des moules aujourd'hui sont fabriqués de façon hybride. En utilisant une embase, il est possible de réduire les temps de fabrication de 50 à 90 % ;
- L'amélioration des technologies afin de pouvoir utiliser une plus grande variété de matières premières (notamment des matières usuelles). Il convient de noter ici que le fait d'avoir une machine ouverte ou fermée en termes de paramétrage et de matériaux associés n'est pas impactant pour les moulistes dans la mesure où ils ne développent pas de nouvelles matières ou nouvelles pièces ;
- La démocratisation et les preuves de concept liées à l'emploi de la fabrication additive dans le domaine de l'outillage.

Un scénario continuiste envisageable est la généralisation de la fabrication additive dans le domaine des outillages. À titre d'exemple, le centre technique IPC a réalisé sa 500^e empreinte de moule en fabrication additive en un peu moins de 10 ans.

Impacts sur la chaîne de valeur

Pour l'outillage, la fabrication additive n'a que peu d'impacts sur la chaîne de valeur car cela représente simplement une nouvelle façon de répondre au besoin de régulation thermique des empreintes de moule. L'ensemble des acteurs (moulistes, usineurs, transformateurs, plasturgistes...) n'est pas impacté de façon majeure par l'utilisation de la fabrication additive. La fabrication additive apporte une diminution des temps de mise au point et de production ainsi qu'un gain en termes de qualité de pièce.

Les inserts réalisés en fabrication additive permettent de diminuer les temps de cycle et d'améliorer la qualité des pièces. Le fait de réduire le temps de cycle permet de diminuer le coût unitaire des pièces du fait d'une immobilisation réduite de la presse à injection. Or cette réduction du temps de production peut entraîner une baisse d'activités chez l'injecteur qui doit trouver d'autres marchés pour compléter les plannings de charge. Il est également important d'inclure la maintenance et le suivi des inserts de moule avec canaux complexes.

Pour compléter leur offre, quelques moulistes français se sont équipés de machine de fabrication additive afin d'appréhender la technologie et de proposer une offre complémentaire en termes de régulation des outillages. C'est notamment le cas du mouliste DPH basé dans la Plastic Vallée de l'Ain.

Analyse de la fabrication de mobilier de jardin

Introduction

La fabrication de mobilier de jardin en plastique (table, chaise...) requiert l'utilisation de moules de très grandes dimensions (plusieurs mètres et plusieurs dizaines de tonnes). Même la fabrication additive indirecte ne pourra pas rivaliser avec les méthodes de fabrication actuelle pour des pièces de si grandes dimensions (impliquant des délais importants par fabrication additive), c'est pour cela que cette technique de fabrication est utilisée principalement dans des zones spécifiques du moule où la recherche de performance est clé. Au niveau de la fabrication directe, le frein ne réside pas dans la taille des machines dans la mesure où des solutions FDM de grandes dimensions existent mais principalement dans la matière puisque les propriétés obtenues sont complètement différentes. L'analyse est ici menée sur le cas des outillages destinés aux plateaux supérieurs de table de jardin en plastique, il s'agit de pièces d'environ 3 000 x 1 500 x 300 mm pour une masse de près de 30 tonnes.



Les moules de grandes dimensions pour la réalisation de mobilier de jardin, par exemple, représentent un investissement important (entre 150 et 250k€ uniquement pour le plateau supérieur) pour un prix de vente des pièces relativement faible (moins de 200€) et surtout une marge faible pour les fabricants. Le temps de cycle du procédé d'injection est donc très important car plus il sera faible, plus il sera possible de fabriquer une grande quantité de pièces en un minimum de temps et donc d'amortir le coût de l'outillage. Les temps de cycle de ces grandes pièces sont souvent imposés par les points chauds lors de l'injection, c'est-à-dire les zones avec une mauvaise régulation thermique. La fabrication additive permet de réguler de façon optimale les zones les plus complexes de ces moules.

Comparaison avec les procédés conventionnels

Les plateaux supérieurs de tables de jardin sont traditionnellement fabriqués en deux étapes : tout d'abord, la fabrication de l'outillage consiste en plusieurs opérations d'usinages d'un bloc d'acier à outillage pour les empreintes et de plaques de moules pour la carcasse. On peut compter 16 à 20 semaines de réalisation (avec 6 à 8 semaines supplémentaires pour les mises au point). Ensuite, la pièce plastique présentant une épaisseur de 2 à 3 mm est fabriquée par injection plastique de polypropylène chargé CaCO₃ en 60-70 secondes de temps de cycle. Les coûts de production selon ce procédé conventionnel sont répartis ainsi : matière plastique (10 à 12€), utilisation presse 2 200 T (100€/h) et personnel (25€/h) qui sont des coûts récurrents, ainsi que la fabrication et la mise au point de l'outillage (150 à 250k€ selon la provenance) qui sont des coûts non récurrents.

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

Comme expliqué précédemment, il est (et sera) très compliqué de réaliser un moule de grande dimension (plusieurs mètres) intégralement en fabrication additive, du fait des temps de production couplés au coût des

matières premières et aux problématiques de fabrication de pièces métalliques de grandes dimensions (contraintes résiduelles, déformations, dimensions des machines...).

Cependant, les moules de grandes dimensions présentent des pièces avec des détails parfois difficiles à réguler dans l'outillage. La première zone intéressante pour un outillage régulé est le canal d'arrivée de la matière plastique fondue. Ce canal représente la zone la plus épaisse de la pièce car il faut pouvoir alimenter l'ensemble du moule. Une régulation efficace de la « carotte » permet de diminuer les temps de cycle de plusieurs secondes.

Autre exemple, un effet « tressé » (voir photo ci-dessous) sur une pièce plastique implique l'utilisation de structures de petites dimensions qui sont par conséquent difficiles à réguler, surtout dans un moule de plusieurs mètres. Les gains attendus sont un temps de cycle inférieur (extrêmement important vu le taux horaire des presses utilisées), une qualité de pièce supérieure et un nombre de cycles de démarrage réduit.



Le moule (carcasse + empreintes) devra être fabriqué par les méthodes conventionnelles (fonderie, usinage...). Il sera cependant utile de rajouter des systèmes de régulation conforme fabriqués par fusion laser de poudres métalliques (SLM) car c'est la seule technologie de fabrication additive métallique qui permet la réalisation de pièces incluant de canaux de régulation à géométries complexes en utilisant un matériau compatible avec les sollicitations d'un outillage d'injection plastique à savoir l'acier *maraging*. Les éléments fusionnés pourront être rapportés dans les empreintes (par brasage, soudage ou vissage) de façon à limiter les « points chauds » dans le moule et de réduire les temps de cycle. Ces systèmes de régulation optimisée permettront également d'augmenter la qualité des pièces avec des refroidissements plus homogènes sur la pièce plastique. L'acier utilisé pour la réalisation des inserts en fabrication additive devra être compatible avec les outillages de moule en termes de propriétés mécaniques et surtout de coefficient de dilatation thermique.

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

Les verrous majeurs à l'adoption de la fabrication additive sont :

- La dimension maximale des pièces en fusion laser : actuellement la taille maximale des pièces en acier réalisées en fabrication additive est Ø150 mm. Ces pièces de grandes dimensions ont un coût très important du fait des longs temps de fabrication (plusieurs jours uniquement pour la fabrication additive) ;
- Le fait de réaliser un moule totalement en fabrication additive représente un non-sens aussi bien au niveau économique que technique car le moule sera forcément plus cher et plus long à fabriquer (ceci est valable quelle que soit la dimension du moule). Il sera donc nécessaire d'ajouter les étapes nécessaires (fabrication, finition et assemblage) pour la réalisation des inserts réalisés en fabrication additive ;
- L'assemblage des inserts dans le moule : l'étanchéité et la tenue mécanique des assemblages sont encore mal connues ;
- L'acier *maraging* disponible sur les machines de fusion laser n'est pas un acier usuel dans le milieu de l'outillage (H11 ou H13 par exemple) ce qui provoque quelques craintes quant à la tenue en service des pièces ;
- La méconnaissance des possibilités de la fabrication additive dans le domaine de l'outillage ralentit sa démocratisation.

Les verrous exprimés précédemment devraient être levés peu à peu dans les prochaines années du fait de :

- La diminution du prix des machines et de la matière première (poudres métalliques) ;
- L'augmentation des volumes de fabrication ;
- Le fait de placer des inserts avec canaux complexes dans un moule de grande dimension va représenter un surcoût qui pourra être amorti dès la mise au point de l'outillage avec une gestion thermique de l'outillage optimisée ;
- L'amélioration des technologies afin de pouvoir utiliser une plus grande variété de matières premières (notamment des matières usuelles) ;
- La démocratisation et les preuves de concept liées à l'emploi de la fabrication additive dans le domaine de l'outillage.

Impacts sur la chaîne de valeur

Pour l'outillage, la fabrication additive n'a que peu d'impacts sur la chaîne de valeur car cela représente simplement une nouvelle façon de réaliser la régulation thermique des inserts situés au niveau des points chauds du moule. L'ensemble des acteurs (moulistes, usineurs, transformateurs, plasturgistes...) n'est pas impacté de façon majeure par l'utilisation de la fabrication additive. La fabrication additive apporte une diminution des temps de mise au point et de production ainsi qu'un gain en termes de qualité de pièce.

Analyse de la fabrication d'implant crânien

Introduction

L'analyse est ici menée sur le cas des implants chirurgicaux en céramique pour la reconstruction osseuse faciale/crânienne. Il s'agit de produits qui présentent des dimensions allant jusqu'à 150 x 150 x 5 mm et un poids pouvant atteindre 300 g. La fabrication additive d'implants crâniens ou maxillo-faciaux en céramique permet d'obtenir rapidement un implant sur-mesure, durable, facilitant l'ostéo-intégration, à partir de l'image du scanner du patient. Contrairement au segment du dentaire, les exigences réglementaires sont plus poussées ici. Si les solutions techniques existent depuis des années, les études cliniques et l'autorisation de mise sur le marché de ces dispositifs médicaux sur-mesure restent longues et coûteuses pour démontrer que le ratio bénéfice/risque est meilleur que celui des solutions standards (premiers essais en 2005 sur des patients volontaires en CHU, début du marquage CE en 2016).

La commercialisation de ces implants n'en est donc qu'à ses débuts et va être amenée à concurrencer le PEEK²²⁷ sur ces applications. Dans ce domaine, l'avantage procuré par la FA vient principalement des nouvelles fonctions qui peuvent être conférées à l'implant, ainsi que de la possibilité de réaliser des pièces de surface supérieure à 25 cm² (en cas d'impossibilité de prélever un greffon sur le patient). Le rôle du chirurgien devient également prépondérant et conduit à un rapprochement fort entre professionnels de santé et fabricants de dispositifs médicaux.

En France, les implants céramiques réalisés par FA pourraient être utilisés dans plusieurs centaines d'opérations dans les prochaines années. À l'heure actuelle, en France et aux USA, les fabricants de ce type de pièce par fabrication additive sont des nouveaux entrants qui sont propriétaires de leur solution technologique, et non pas les producteurs d'implants habituels.



Comparaison avec les procédés conventionnels

Les implants chirurgicaux pour la reconstruction osseuse faciale/crânienne sont traditionnellement fabriqués par moulage ou usinage en plusieurs semaines et quasi systématiquement en production unitaire (l'implant crânien est par définition une pièce unique). Les matériaux le plus souvent utilisés sont le HDPE, PMMA, PEEK, le titane ou la céramique et les opérations de mise en forme sont actuellement menées au sein des entreprises spécialisées dans la fabrication de dispositifs médicaux. Enfin, le coût de production unitaire selon ces procédés conventionnels se situe entre 5 000 et 15 000 selon le matériau et la taille de l'implant.

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

La chirurgie réparatrice crânienne ou maxillo-faciale requiert des implants sur-mesure pour s'adapter à l'anatomie de la perte osseuse, ils doivent également apporter certaines fonctions et avoir des procédures de fabrication pouvant s'intégrer aux protocoles médicaux actuels. Pour ces différentes raisons, la réalisation des implants par fabrication additive apporte de réelles améliorations par rapport aux procédures conventionnelles : sur-mesure et rapidité d'exécution par rapport aux méthodes de moulage et d'usinage ; implants de grande taille (en cas d'impossibilité de prélever un greffon sur le patient), diminution des temps d'hospitalisation (5 à 10k€ par heure en salle d'opération) et des risques infectieux par rapport aux autres méthodes de greffe osseuse.

Cela permet également un traitement de la chaîne numérique depuis le fichier d'imagerie médical jusqu'à la pièce finale qui permet au chirurgien plasticien d'adapter l'implant à la pathologie du patient grâce à ses connaissances en cranioplastie et en collaboration avec l'équipe CFAO du fabricant d'implant. Dans cette configuration, il s'agit véritablement d'une pièce unique, sur-mesure, et la notion de stock n'existe pas (à la différence des prothèses de hanches qui sont stockées en plusieurs tailles et références). Il s'agit donc d'un modèle de production à la demande avec un haut niveau de technicité et dont la diminution des coûts pourra être amorcée lorsque le marché progressera.

L'utilisation de technologies de fabrication additive des céramiques permet notamment de réaliser des pièces légères, biocompatibles et favorisant la repousse osseuse. Dans ce cas, la porosité de l'implant est structurée de façon particulière pour une meilleure ostéo-intégration.

²²⁷ Polyéthéréthercétone

Les procédés de fabrication utilisables pour ces implants en céramique sont le SLA, SLS et *Binder Jetting*. Le SLA conduira à des résolutions supérieures, tandis que le SLS qui permet un frittage direct de la pièce sur la machine permettra d'obtenir plus rapidement des pièces aux bonnes dimensions. Les délais de fabrication peuvent être réduits à quelques jours seulement, contre plusieurs semaines pour les méthodes conventionnelles. Les matériaux utilisés sont des phosphates de calcium en particulier l'hydroxyapatite (HA) bien connu pour sa biocompatibilité. L'utilisation des technologies de fabrication additive permet dans un premier temps d'obtenir un implant de synthèse parfaitement adapté à la morphologie de la perte osseuse, ce qui peut d'ailleurs être vérifié dès la création du modèle numérique lorsqu'il est assemblé virtuellement à l'image scanner 3D du squelette du patient. De plus, les technologies FA permettent d'augmenter la complexité des implants en comparaison aux méthodes de fabrication par moulage ou usinage, ce qui conduit à des améliorations sensibles, par exemple en allégeant le poids de la pièce par des évidements, tout en garantissant la résistance mécanique des zones de plus faibles épaisseurs.

Enfin, la mise en œuvre d'une céramique partiellement poreuse est particulièrement intéressante pour faciliter la repousse osseuse (ostéo-intégration) sur les régions périphériques de l'implant. La fabrication additive qui permet de calibrer localement les porosités, est alors un véritable outil de bio-ingénierie tissulaire pour comprendre puis améliorer l'architecture des implants à reconstruction osseuse. Il n'existe pas de réglementation spécifique à la fabrication additive à ce jour et les directives européennes et normes harmonisées (ISO13485...) applicables sont toujours jugées pertinentes. Sans évolution de ces contraintes réglementaires, la fabrication des implants demeurera probablement au sein des entreprises du secteur de la santé, plutôt que transférée dans les hôpitaux. On observe cependant quelques centres hospitaliers et jeunes médecins qui s'approprient la technologie pour étudier les différentes applications en interne.

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

- **Un gain de prix qui n'est pas immédiat** : Les coûts des implants issus de la FA sont similaires voire légèrement supérieurs aux coûts de ceux réalisés par des méthodes conventionnelles (8 000 à 18 000 euros). On peut alors s'interroger sur l'intérêt économique de la fabrication additive, d'autant plus que la mise sur le marché de nouveaux dispositifs médicaux (DM) implantables est coûteuse et ne survient qu'après plusieurs années d'essais cliniques. Toutefois, les avantages intrinsèques des implants céramiques réalisés par fabrication additive (ostéo-intégration, faible risque de rejets, aucun prélèvement de greffon) permettent d'envisager des diminutions importantes des temps d'hospitalisation et des coûts sociétaux sur le long terme.
- **Implication du praticien dans la fabrication selon un mode opératoire nouveau** : en effet, l'implant doit apporter une fonction améliorée par rapport aux dispositifs conventionnels. Pour garantir ce bénéfice, la phase de conception devient prépondérante, ainsi que le rôle du chirurgien plasticien qui devient coconcepteur de son dispositif médical. Il est bien sûr nécessaire que les professionnels de santé adhèrent à cette solution technologique pour que celle-ci soit plus largement déployée.
- **Une nouvelle solution qui a nécessité plus de 10 ans d'études cliniques** : L'adoption de cette technologie sera ainsi probablement progressive, dépendra de l'évolution des réglementations et nécessitera des retours d'expérience nombreux avant d'être généralisée. Aux USA, 70 dispositifs médicaux réalisés en FA ont déjà été autorisés.

Il n'existe pas de frein spécifique à l'emploi des technologies FA comparativement aux procédés conventionnels. Par contre, la diminution du temps de fabrication n'est pas un critère suffisant pour que ces technologies soient généralisées. À coût équivalent, il faut que les implants présentent des qualités intrinsèques permises par leur design qui apportent des avantages significatifs. La recherche menée en collaboration entre entreprises et hôpitaux avance dans ce domaine.

Impacts sur la chaîne de valeur

On voit ici que la valeur ajoutée de l'implant réalisé par FA découle d'une innovation technologique, qui se traduit par exemple par une longévité accrue par rapport aux implants conventionnels grâce à un design spécifique et individualisé pour chaque implant. Cette approche n'est possible que si le chirurgien, qui a l'expertise nécessaire, devient coconcepteur de l'implant. En effet, l'ingénieur CFAO n'est pas capable de dessiner seul une pièce sur-mesure à partir de l'image du crâne accidenté et a besoin des connaissances médicales d'un plasticien (pour placer les porosités par exemple). Deux scénarios sont alors possibles : soit l'implant est conçu et réalisé en milieu hospitalier et ceci demandera des évolutions des réglementations pour les DM, soit la conception devient collaborative entre professionnels de santé et entreprises, ce qui nécessitera probablement une évolution organisationnelle des uns et des autres. En effet, il y a un véritable intérêt que le chirurgien soit plus actif dans la

conception de la prothèse : une démarche de cocréation qui devrait impliquer davantage une relation de proximité avec le fabricant de dispositifs médicaux sans toutefois aller jusqu'à fabriquer à l'hôpital à court terme. En France, les implants céramiques réalisés par FA pourraient être utilisés dans plusieurs centaines d'opérations dans les prochaines années. À l'heure actuelle, en France et aux USA, les fabricants de ce type de pièce par fabrication additive sont des nouveaux entrants qui sont propriétaires de leur solution technologique, et non pas les producteurs d'implants habituels. Cela démontre que la baisse des barrières à l'entrée apportée par la fabrication additive permet de modifier les pratiques de production et les organisations actuelles.

Analyse de la fabrication de pièces en céramiques (art de la table ou sanitaire)

Introduction

L'analyse est ici menée sur le cas des pièces de céramique traditionnelle destinées aux sanitaires ou aux arts de la table. Il s'agit de produits qui présentent des dimensions allant jusqu'à 1 800 x 800 x 500 mm et un poids pouvant atteindre 30 kg. Dans un contexte international fortement concurrentiel, la fabrication française d'articles en céramiques à usage domestique recentre ces productions sur des produits haut de gamme « Made in France », impliquant des pièces de plus en plus complexes et une diminution des séries. De ce fait, les méthodes de fabrication conventionnelles ne sont pas adaptées à cette évolution, notamment parce qu'elles imposent la fabrication de modèles puis d'outillages au sein d'un processus long et coûteux. Le manque d'innovations en termes de procédés initiés au cours des dix dernières années rend les solutions de production de céramiques incapables de produire des séries inférieures à plusieurs dizaines de milliers de pièces. À l'image des métiers de porcelainiers traditionnels où une grande série représente un millier de pièces, c'est toute une demande d'industrialisation de la production de petits volumes qui ne trouve pas de solution technologique.

Dans une dynamique de mutation vers un outil de production agile, le déploiement des technologies de FA dans les domaines des arts de la table et du sanitaire qui permettraient de rationaliser les coûts, les délais et le temps du cycle de conception de nouveaux produits permettrait d'améliorer la compétitivité du secteur. Cependant les technologies FA ne sont actuellement pas utilisables pour la réalisation de pièces en céramique traditionnelle, soit parce que les technologies restent trop coûteuses et non adaptées au volume, soit parce que la qualité des matériaux est insuffisante. La mise en œuvre des technologies FA dans ce domaine nécessite donc des développements spécifiques visant : l'emploi de matières naturelles à coût faible, la possibilité de fabriquer des pièces de grande taille, des équipements dédiés et surtout une mutation de l'ensemble de la filière. Un tel scénario pourrait survenir sous 5-10 ans.



Comparaison avec les procédés conventionnels

Les pièces de céramique traditionnelle pour les applications sanitaires ou arts de la table sont traditionnellement fabriquées par le procédé de moulage en plâtre ou coulage sous pression avec une cadence allant d'une à 300 unités par jour. Les volumes de série sont d'environ 1 000 à 10 000 pièces. Les matériaux le plus souvent utilisés sont la porcelaine et le grès et les opérations de mise en forme sont régulièrement organisées au sein d'un mode de production centralisé chez le fabricant. Enfin, le coût de production unitaire selon ce procédé traditionnel se situe dans la fourchette 1 à 50€ dans laquelle est impacté le coût non récurrent de la conception et de l'outillage (estimé entre 5 000 et 30 000€ selon les cas).

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

L'intérêt de la fabrication additive est ici de substituer certaines étapes des procédés conventionnels de conception et de fabrication de pièces céramiques par des étapes de conception et fabrication numérique, sans recourir à la fabrication de modèles ou d'outillages (moules). Ce scénario mènerait à des gains significatifs pour la durée de la phase de conception (- 50 % environ), ainsi que pour les coûts de production pour les petites séries (de - 20 à - 50 %). De plus, la qualité et la diversité des pièces produites progresseraient fortement (nouvelles formes, hausse de la fréquence de renouvellement des produits...).

Pour garantir un retour sur investissement, l'évolution des technologies de fabrication doit cependant être accomplie sans hausse significative de coût des matières premières même si celles-ci doivent être adaptées, ce qui est aujourd'hui rarement observé dans le domaine de la FA. Il impose en outre une évolution des métiers dans lesquels la conception par l'outil numérique n'est pas encore généralisée. Enfin, il nécessitera des équipements spécifiques aux céramiques, introduits dans une chaîne de fabrication qui ne se réduit pas aux seules machines de FA (préparation des matières, finition et cuisson). Pour parvenir à l'adoption des technologies de la fabrication additive et obtenir les gains de productivité attendus, c'est donc toute la chaîne de valeur qui doit évoluer : fournisseur de matière première, bureaux d'études, équipementiers, manufacturiers.

La fabrication additive est ici adoptée comme une brique technologique particulière dans une chaîne numérique allant de la conception de la pièce au produit final. L'important reste cependant de rationaliser les coûts, les délais et le temps de cycle de conception des nouveaux produits et d'accroître la diversité et la qualité des produits concevables. Une organisation de type « Usine du futur » est mise en place pour faciliter la coconception des produits (fabricant, designer, donneur d'ordre) et accélérer leur mise sur le marché. Les technologies employées sont basées sur les concepts du SLS, *Binder Jetting* ou FDM selon que l'on souhaite fabriquer une pièce complète, un moule ou personnaliser un objet réalisé par un procédé conventionnel. Les technologies additives ne supplantent pas les technologies conventionnelles mais viennent en appui pour apporter de la valeur au produit et de l'agilité à l'outil industriel.

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

Les technologies additives ne sont pas adaptées en l'état au secteur des céramiques traditionnelles. Ces technologies doivent être développées spécifiquement pour la céramique et intégrées à un procédé de fabrication plus large que la seule étape de mise en forme. Les verrous techniques sont notamment :

- **L'inexistence de matières premières** à la fois adaptées aux technologies additives et aux prérequis pour des applications céramiques (couleur, procédé de cuisson, résistance mécanique, coût faible, recyclabilité...). En effet, les acteurs sont aujourd'hui obligés de retraiter la matière et de préparer leur pâte céramique ;
- **Des imprimantes commercialisées qui n'intègrent pas forcément les spécificités des céramiques** (poudres ultrafines, frittage haute température, sensibilité aux chocs thermiques...);
- Un traitement de la chaîne numérique qui doit **tenir compte des forts retraits observés lors du frittage et d'éventuelles déformations.**

Le *business model* de la plupart des équipementiers de la FA qui recherchent une valorisation forte des matières n'est pas en phase avec la chaîne de valeur des céramiques traditionnelles, les usines manufacturières achetant des matières disponibles en fort tonnage et à des coûts faibles. La diffusion pérenne de ces technologies nécessite la formation des personnels et un usage généralisé du numérique dans la conception des produits. Tous ces freins technologiques doivent être levés en parallèle afin de bénéficier du procédé dans son ensemble : une évolution qui semble envisageable à l'horizon 5 à 10 ans. L'adoption des technologies de la fabrication additive nécessite ainsi une offre complète sur toute la chaîne de valeur : matière, équipement, produit, service, formation. Cela implique donc une transformation profonde de la filière.

Impacts sur la chaîne de valeur

La chaîne de valeur est potentiellement impactée à tous les niveaux par l'arrivée de ces technologies. Les équilibres sont toutefois conservés et l'effet direct pour tous les acteurs est une augmentation de la compétitivité des entreprises, un positionnement renforcé sur le haut de gamme et l'innovation, ainsi que des possibilités de croissance importante.

Cette montée en gamme industrielle sera forcément accompagnée d'un besoin accru en compétences, nécessitant la formation des personnels et davantage d'emplois qualifiés. La chaîne de valeur et les modèles économiques devraient rester les mêmes. Cependant, l'ensemble des acteurs devrait voir son chiffre d'affaires et ses marges progresser, notamment grâce à une mobilité du lieu de production : opportunités de réindustrialisation en France et réimplantation locale de productions précédemment fabriquées en Asie.

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Index des tableaux

Tableau 1 : Analyse des différentes prévisions concernant le marché mondial de la fabrication additive en 2020 (CAGR : taux de croissance annuel cumulé)	22
Tableau 2 : Quelques chiffres clés sur les marchés à l'échelle mondiale	27
Tableau 3 : Exemple de matériaux polymères disposant d'un agrément pour applications médicales. <i>Source : Patient Specific Instruments : Past, Present and Future, Mahmoud A Hafez-2013</i>	37
Tableau 4 : Réduire le coût d'amortissement et réaliser des économies d'échelles par une meilleure productivité.....	47
Tableau 5 : Synthèse des procédés de fabrication.....	74
Tableau 6 : Normes nationales publiées par l'UNM 920.....	88
Tableau 7 : Projets de normes de la commission internationale ISO/TC 261 « Fabrication additive »	89
Tableau 8 : Projets et normes publiées dans le cadre de la collaboration ASTM/ISO.....	91
Tableau 9 : Principaux déposants industriels et universitaires de brevets sur la fabrication additive depuis 1995 .	94
Tableau 10 : Titres des classes de brevets et codes couleur des figures	99
Tableau 11 : Principaux centres étrangers de R & D impliqués en fabrication additive et premiers niveaux d'expertises.....	103
Tableau 12 : Analyse SWOT de l'offre française dans un contexte international	106
Tableau 13 : Synthèse des principales initiatives territoriales autour de la fabrication additive.....	141
Tableau 14 : Évaluation de l'impact des scénarios prospectifs sur les différents marchés cibles de l'étude	181

Index des figures

Figure 1: Activités et secteurs impactés par la fabrication additive	16
Figure 2 : Répartition en volume des applications de la fabrication additive (gauche) et évolution de la part en valeur de la production directe de pièce (droite).....	21
Figure 3 : Répartition en volume et en valeur des ventes de machines en 2014	24
Figure 4 : Estimation des parts de marché en % des principaux matériaux en 2015 et en 2025	25
Figure 5 : Premier niveau d'analyse de la capacité d'adoption des technologies de la fabrication additive par secteur	29
Figure 6 : Visualisation des applications actuelles et futures et la FA dans la filière automobile	35
Figure 7 : Incidence de l'impression 3D sur les fabricants de matériaux de construction. Sources : « Tendances en design architectural et en technologie »	39
Figure 8 : À gauche : Empreinte OSOTO PEP, à droite Empreinte chaud et froid NEWPIN PEP.....	42
Figure 9 : Degré d'exploitation des opportunités pour les cas d'usages : fabrication directe, outillage rapide, prototypage rapide	45
Figure 10 : Principaux critères d'évaluation de la conformité d'une pièce produite en FA	49
Figure 11 : Estimation de l'évolution du coût de production en fabrication additive métallique	51
Figure 12 : Comparaison des niveaux d'utilisations des différents matériaux en fabrication additive	52
Figure 13: Aperçu du niveau de maturité actuel des différents matériaux.....	53
Figure 14: Optimisation topologique d'une pièce existante	54
Figure 15 : Exemple représentatif des différents niveaux d'adoption de la fabrication additive	55
Figure 16 : Principaux modèles économiques de la fabrication additive	59
Figure 17 : Exemples de personnalisation de biens de consommation grâce à la fabrication additive	61
Figure 18 : Les initiatives fleurissent dans les enseignes de retail pour diffuser la technologie (Top Office et Leroy Merlin)	63
Figure 19 : Caractéristiques représentatives d'un lieu d'innovation en fabrication additive	66
Figure 20 : Synthèse des principales attentes vis-à-vis des technologies grand public.....	71
Figure 21: Représentation comparative de la chaîne de valeur de la fabrication additive entre les applications industrielles ou grand public	75
Figure 22 : Constat : une chaîne de valeur française en sablier	76
Figure 23 : Principaux acteurs de la filière française de l'impression 3D grand public	77
Figure 24 : Évolution de l'offre Five Michelin Additive Solutions - 3A (Présentation Rafam 2016).....	78
Figure 25: Fabricants de machines, fournisseurs de matériaux et éditeurs de logiciels à vocation industrielle	81

Figure 26: Répartition géographique des principaux centres de recherche actifs sur le sujet de la fabrication additive en France	82
Figure 27: Cartographie des Instituts Carnot impliqués dans la filière Manufacturing	83
Figure 28 : Paysage français de la sous-traitance en fabrication additive	85
Figure 29 : Analyse du système normatif français dans l'écosystème européen et international	87
Figure 30 : Plan d'actions pour une normalisation européenne de la fabrication additive (Sasam Standardisation Roadmap - Frits Feenstra TNO)	89
Figure 31 : Organisation de la normalisation définie par l'accord ASTM ISO	90
Figure 32 : Évolution par année du nombre de brevets déposés en fabrication additive (cumul de tous les pays) ...	92
Figure 33 : Évolution par année du nombre de brevets déposés en fabrication additive dans les principaux pays ...	92
Figure 34 : Évolution temporelle des brevets selon le pays d'origine	93
Figure 35 : La France en 8 ^e position en termes de nombre de dépôts de brevets	93
Figure 36 : Âge moyen des portefeuilles de familles de brevets d'origine française ou étendues en France des principaux déposants	95
Figure 37 : Codes CIB en France (pays d'origine ou d'extension) de 1993 à 2014 - Les technologies principales. 98	98
Figure 38 : Codes CIB en France de 2010 à 2015 - les technologies très émergentes	98
Figure 39 : Analyse SWOT sur le plan des brevets.....	100
Figure 40 : Panorama des centres internationaux actifs sur la fabrication additive – Des investissements souvent concentrés sur une ou deux grosses structures nationales	102
Figure 41 : Carte des principaux centres de compétences en Europe	104
Figure 42 : Principaux enjeux d'adoption de la fabrication additive – Nombre de personnes consultées jugeant le critère comme une opportunité forte	109
Figure 43 : Principe technologique du projet Multi Jet Fusion porté par HP	113
Figure 44 : Des leviers aujourd'hui antagonistes qui imposent de faire des compromis	114
Figure 45 : Évolution du taux de reconception des pièces dans l'aéronautique	118
Figure 46 : Exemple de structure lattice.....	119
Figure 47 : Un besoin de repenser l'ensemble de la chaîne de conception.....	119
Figure 48 : Exemple de chaîne de production intégrée avec des îlots de fabrication additive	121
Figure 49 : Conclusion sur les différents leviers de développement de la FA	122
Figure 50 : Répartition des domaines de spécialisation intelligente des SRI-SI des régions françaises par marchés ciblés	124
Figure 51 : Potentiel d'adoption des technologies de fabrication additive au sein de différents secteurs.....	126
Figure 52 : Avantages associés aux systèmes de production centralisés et distribués.....	127
Figure 53 : Représentation schématique des évolutions de la répartition de la valeur ajoutée associée au processus de production	128
Figure 54 : Cas d'application et bénéfices de l'intégration de la FA pour le stockage des pièces de réparation .	130
Figure 55 : Cartographie des pôles de compétitivité, clusters et plateformes technologiques.....	133
Figure 56 : Les FabLabs grand public (hors Île-de-France).....	143
Figure 57 : Les FabLabs grand public (en Île-de-France)	144
Figure 58 : Les FabLabs professionnels	144
Figure 59 : Les FabLabs d'entreprise	144
Figure 60 : Principales étapes de la chaîne de production	151
Figure 61 : Un réel besoin de faire évoluer la formation autour de la fabrication additive	155
Figure 62 : Évolution du nombre d'offres d'emploi liées à l'impression 3D aux États-Unis en quatre ans.....	156
Figure 63 : Les secteurs qui recrutent et les fonctions recherchées en France (3D Natives, août 2014).....	157
Figure 64 : Représentation schématique des principaux facteurs d'évolution	161
Figure 65 : Rappel de la méthodologie globale de constitution des scénarios prospectifs	162
Figure 66 : Les principes clés associés aux différents scénarios.....	163
Figure 67 : Synthèse : Prototypage et expérimentation.....	164
Figure 68 : Industrialisation de la personnalisation : de l'esthétique au fonctionnel.....	167
Figure 69 : Production série et gain de performances	171
Figure 70 : Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande	176
Figure 71 : Exemple d'outillage (fixation, préhenseur) réalisés par impression 3D (Source Strasys)	183
Figure 72 : Évolution possible de la chaîne logistique pour l'industrie des pièces détachées	184
Figure 73 : Plusieurs scénarios de capture de la valeur ajoutée associés à la production décentralisée de pièces... 185	185
Figure 74 : Polymérisation d'une résine sous l'action d'un laser - Stéréolithographie - SLA	206
Figure 75 : Projection de gouttes de matériau - DOD	207
Figure 76 : Projection d'un liant sur un substrat de type poudre - 3D Printing	208
Figure 77 : Solidification de poudre sous l'action d'une source d'énergie de moyenne à forte puissance	210
Figure 78 : Projection de poudre (ou fusion de fil) dans un flux d'énergie (laser ou plasma).....	213

Figure 79 : Fusion de fil au travers d'une buse chauffante - FDM.....	214
Figure 80 : Assemblage de couches à partir de plaques découpées - Stratoconception.....	215
Figure 81: Exemples de matériaux utilisés pour le procédé CLAD® (Source : IREPA Laser)	217
Figure 82 : Matériaux polymères utilisés en fabrication additive.....	219
Figure 83 : Matériaux céramiques utilisés en fabrication additive.....	220
Figure 84 : Part des principaux pays pour chacune des six technologies de rupture dont la fabrication additive.....	221
Figure 85 : Pays moteurs du dépôt de brevets en fabrication additive, nanotechnologies et robotique.	222
Figure 86 : Une sélection de brevets sur la fabrication additive.	222
Figure 87 : Cartographie des liens entre les déposants et les rubriques de la Classification Internationale des Brevets ..	223
Figure 88 : Cartographie des liens entre Safran et les rubriques de la Classification Internationale des Brevets .	224
Figure 89 : Cartographie des liens entre Michelin et les rubriques de la Classification Internationale des Brevets	225
Figure 90 : Cartographie des liens entre Rhodia, Arkema, Sanofi et les rubriques de la Classification Internationale des Brevets.....	226
Figure 91 : Les acteurs qui déposent ou étendent leurs brevets en France	227
Figure 92 : Principaux freins et menaces à l'adoption de la fabrication additive – Nombre de personnes consultées jugeant le critère comme un frein ayant un impact fort.....	229
Figure 93 : Analyse statistique des principaux freins par marchés d'applications	232

Les rapports Pipame déjà parus

- Diffusion des nouvelles technologies de l'énergie (NTE) dans le bâtiment, juin 2009
- Étude de la chaîne de valeur dans l'industrie aéronautique, septembre 2009
- La logistique en France : indicateurs territoriaux, septembre 2009
- Logistique mutualisée : la filière « fruits et légumes » du marché d'intérêt national de Rungis, octobre 2009
- Logistique et distribution urbaine, novembre 2009
- Logistique : compétences à développer dans les relations « donneur d'ordre – prestataire », novembre 2009
- L'impact des technologies de l'information sur la logistique, novembre 2009
- Dimension économique et industrielle des cartes à puces, novembre 2009
- Le commerce du futur, novembre 2009
- Mutations économiques pour les industries de la santé, novembre 2009
- Réflexions prospectives autour des biomarqueurs, décembre 2009
- Mutations économiques dans le domaine de la chimie, février 2010
- Mutations économiques dans le domaine de la chimie -- volet compétences, février 2010
- Mutations économiques dans le domaine automobile, avril 2010
- Maintenance et réparation aéronautiques : base de connaissances et évolution, juin 2010
- Pratiques de logistique collaborative : quelles opportunités pour les PME/ETI ?, février 2011
- Dispositifs médicaux : diagnostic et potentialités de développement de la filière française dans la concurrence internationale, juin 2011
- Étude prospective des bassins automobiles : Haute-Normandie, Lorraine et Franche-Comté, novembre 2011
- M-tourisme, décembre 2011
- Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020, février 2012
- La gestion des actifs immatériels dans les industries culturelles et créatives, mars 2012
- Le développement industriel futur de la robotique personnelle et de service en France, avril 2012
- Enjeux et perspectives des industries agroalimentaires face à la volatilité du prix des matières premières, octobre 2012
- Potentiel et perspectives de développement des plates-formes d'échanges interentreprises, janvier 2013
- Étude sur la location de biens et services innovants : nouvelles offres, nouveaux opérateurs, nouveaux modèles économiques ?, janvier 2013
- Enjeux économiques des métaux stratégiques pour les filières automobiles et aéronautiques, mars 2013
- Chaînes logistiques multimodales dans l'économie verte, mars 2013
- Évolutions technologiques, mutations des services postaux et développement de services du futur, juillet 2013
- Imagerie médicale du futur, octobre 2013
- Relocalisations d'activités industrielles en France, décembre 2013
- Benchmark européen sur les plateformes chimiques, quels sont les leviers pour améliorer la compétitivité des plateformes françaises ?, septembre 2014
- Les innovations technologiques, leviers de réduction du gaspillage dans le secteur agroalimentaire : enjeux pour les consommateurs et pour les entreprises, novembre 2014
- Mutations économiques du secteur de l'industrie des métaux non ferreux, mars 2015
- Enjeux et perspectives de la consommation collaborative, juillet 2015
- Usages novateurs de la voiture et nouvelles mobilités, janvier 2016

- E-santé : faire émerger l'offre française en répondant aux besoins présents et futurs des acteurs de santé, février 2016
- Filières industrielles de la valorisation énergétique du sous-sol profond, mars 2016
- Enjeux et perspectives des industries du sport en France et à l'international, juin 2016
- Marché actuel et offre de la filière minérale de construction et évaluation à échéance de 2030, novembre 2016

Crédits photographiques

Couverture (horizontalement de gauche à droite) : ©demaerre – iStock ; CC0 Public Domain/Pixabay ; ©ERASTEEL ; CC0 Public Domain/Pixabay.

La fabrication additive est source d'innovation à la fois dans la façon de concevoir les objets et de les produire. La diversité des procédés mis en œuvre permet le développement d'applications aussi bien industrielles, avec la fabrication d'équipements ou de produits intermédiaires, que « grand public ». Cette technologie, apparue déjà depuis plusieurs décennies, enregistre actuellement des taux de croissance significatifs que de nombreux observateurs interprètent comme le potentiel d'un développement futur à plus grande échelle. L'étude examine les conditions d'une telle évolution.

Un état des lieux détaillé couvre l'ensemble des composantes du marché : les diverses catégories d'acteurs concourant à l'offre, les utilisateurs (secteurs industriels et grand public) et les écosystèmes, sources de synergies entre les différentes initiatives.

Le diagnostic met en lumière les opportunités offertes par la fabrication additive, tant en matière de compétitivité pour les entreprises que d'initiatives à impulser dans les territoires. Quatre scénarios prospectifs illustrent les axes de développement potentiels du marché, en identifiant les freins et les leviers susceptibles de les conditionner : un scénario « prototypage et expérimentation », un scénario « industrialisation de la personnalisation », un scénario « production série et gains de performance » et un scénario « évolution de la chaîne de valeur ». Les recommandations qui en découlent visent à renforcer les conditions d'accompagnement des acteurs pour que la fabrication additive confirme son potentiel de développement.