

ÉTUDES ÉCONOMIQUES

PROSPECTIVE

Futur de la fabrication additive

Synthèse

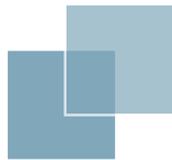
Alliance des Minerais, Minéraux et Métaux (A3M)
Aluminium France
Fédération forge fonderie (FFF)
Observatoire de la plasturgie
Syndicat français de l'industrie cimentière (SFIC)



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



Synthèse

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 :

Benoît RIVOLLET, dirigeant
Avec les contributions de Blaise CAVALLI, Nicolas LOUÉE 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, Benoît 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.

RETOUR SUR LE CONTEXTE

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.

La mission a été réalisée en huit phases distinctes (ou volets), portant sur une période de dix 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 les 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 termes** 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 françaises 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 (volet 7 dédié), 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.

Les propositions de recommandations et les fiches actions qui en découlent sont issues de l'ensemble des analyses développées dans le rapport final de l'étude. **Les recommandations proposées sont segmentées en fonction de leur gamme et de leur portée** (technologique, accompagnement, visibilité, formation). Ces dernières 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 exhaustives pour le développement de la filière. Le détail des différentes recommandations est disponible dans le rapport final de l'étude.

INTRODUCTION

La fabrication additive séduit les industriels dans de nombreux secteurs d'applications à des fins de prototypages ou pour réaliser des tâches définies au sein de la chaîne de production. Cependant, face aux 82 milliards de dollars du marché mondial de la machine-outil¹, la fabrication additive reste aujourd'hui un phénomène d'ampleur limitée malgré une croissance soutenue depuis quelques années. Le niveau d'adoption et la maturité² 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.

Si la fabrication additive remet en cause la manière dont les industriels imaginent et fabriquent les pièces, elle est connue des acteurs de la filière depuis plusieurs décennies. 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. 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. Afin de réduire les coûts et les délais de livraison des pièces d'outillages tout en augmentant leurs performances, la fabrication additive est rapidement adoptée : le concept d'outillage rapide apparaît. Enfin, une autre approche se dessine depuis une petite quinzaine d'années : la fabrication rapide. Elle offre la possibilité de réaliser une pièce en petite série directement, c'est-à-dire sans aucun moule ou modèle intermédiaire. Plus récemment, les industriels réfléchissent à développer des processus industriels alternatifs autour de la fabrication additive, pour fabriquer des pièces de grandes tailles, des assemblages complexes ou des séries plus importantes.

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 2012-2014³ et démontre l'engouement des industriels et des organisations pour ce marché porteur rendu plus accessible du fait de l'expiration 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 Kearney⁴, 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. Une étude récente du cabinet Roland Berger⁵ 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.

¹ World Machine-Tool Output & Consumption Survey, Gardner Research 2015.

² La maturité est l'étape dans laquelle se trouve un organisme qui a atteint son plein développement.

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

⁴ 3D Printing: A Manufacturing Revolution, AT Kearney 2015.

⁵ Additive Manufacturing (AM) – Opportunities in a digitalized production, Additive Manufacturing European Conference Roland Berger 2015.

ANALYSE DE LA DEMANDE

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 cumulées actuellement, mais près de 30 % de potentiel de croissance sur les années à venir. Les conclusions et enseignements issus de notre analyse de la demande dans les différents marchés d'applications sont les suivants :

Applications et maturité de la fabrication additive dans l'industrie

Aéronautique et spatial
<ul style="list-style-type: none">• Le segment de l'aérospatial représente 14,8 % du marché de la fabrication additive en 2014. Il est précurseur de l'expérimentation des technologies avec le médical.• La croissance de marché est évaluée à 15-20 % sur les cinq prochaines années, ce qui permettrait ainsi d'atteindre un volume de 2,6 Md\$ en 2020.• Pour les équipementiers/motoristes, la fabrication additive possède un TRL de l'ordre de 7 à 9. Les technologies les plus utilisées 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 usitée pour des raisons dimensionnelles, économiques et de qualification.• Le secteur représente un potentiel de marché considérable. Il faudra néanmoins attendre encore quelques années avant de voir voler des pièces reconçues par optimisation topologique en raison des phases longues et coûteuses de certifications. La plupart des acteurs du secteur se sont déjà positionnés sur ces sujets.
Automobile
<ul style="list-style-type: none">• 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. Elle reste donc concentrée sur le sport automobile et le haut de gamme.• La pénétration de ces technologies sur ce marché concerne essentiellement le prototypage de présérie, les outillages ou les dispositifs d'aide à la production (petit outillage interne) :<ul style="list-style-type: none">○ 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 se développer dans ces domaines qui demandent des hauts taux de productivité.
Médical
<ul style="list-style-type: none">• 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...• Les intérêts exprimés pour la fabrication additive dans le médical (hors <i>bio-printing</i>) concernent principalement : la personnalisation de masse, l'intégration de porosité ou de structures complexes, la fabrication sur demande et la 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
<ul style="list-style-type: none">• Le segment du bâtiment et de l'architecture se positionne de façon secondaire avec 3,2 % du marché mondial de la fabrication additive. Il représente pourtant un fort potentiel• La pénétration sur ce secteur à moyen terme peut être évaluée de la façon suivante :<ul style="list-style-type: none">○ court terme (2-5ans) : moules et peaux de coffrages en fabrication additive<ul style="list-style-type: none">▪ fabrication des moules en résine par fabrication additive pour couler des pièces

<p>complexes, réalisation de peaux de coffrages qui font ensuite office d'isolants et qui peuvent être enduites ;</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ possibilité de conserver une armature métallique pour renforcer la structure ; <ul style="list-style-type: none"> ○ moyen terme (5-8 ans) : fabrication d'éléments préfabriqués en usine <ul style="list-style-type: none"> ▪ 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 <ul style="list-style-type: none"> ▪ développement de plusieurs formulations pour s'adapter aux conditions climatiques ; ▪ méthodologie pour affiner la paramétrie de production et livraison du béton ; ▪ problématique de certification et atténuation des effets « escaliers » ;
<p>Énergie</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pour le secteur de l'énergie au sens large, les principaux facteurs d'acceptation de la fabrication additive sont les suivants ⁶ : <ul style="list-style-type: none"> ○ 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 au coût 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 : <ul style="list-style-type: none"> ○ 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. Il sera nécessaire de résoudre auparavant les problèmes posés par l'augmentation de la vitesse du laser sans générer de défauts et le recyclage de la poudre.
<p>Emballage</p> <ul style="list-style-type: none"> • Le segment du <i>packaging</i> 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 <i>Pack&Strat</i>® permet de réaliser un emballage de façon directe et très rapide en mousse polymère ou en carton. • La fabrication directe ne semble pas adaptée. En revanche, il est envisageable d'utiliser l'impression 3D pour produire des moules en cire perdue ou polymères, pour résister aux cadences de production de bouteilles plastiques, par exemple.
<p>Fonderie – Moules – Outillage</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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. Le segment de l'outillage rapide semble donc un segment porteur à court terme. • Les principaux intérêts sont multiples : 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.

Tableau 1: Synthèse des applications de la fabrication additive dans l'industrie

⁶ Additive manufacturing : The future of oil and gas services ? Onlinetes.com, 10 août 2015.

Analyse de la demande dans les technologies professionnelles

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 ces technologies associées doivent aujourd'hui être validées pour une exploitation commerciale. Comme le rappelle un rapport du parlement britannique en 2012, les technologies entre 4 et 7 en termes de TRL se trouvent dans une zone critique appelée « vallée de la mort » et sont représentatives de la difficulté à transformer un prototype en une technologie utilisable en production.

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. 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 encore été atteinte pour développer des modèles commerciaux rentables. De ce fait, la plupart des feuilles de route en faveur de la fabrication additive démontrent que de nombreuses avancées sont nécessaires, tant techniques qu'au niveau des écosystèmes, afin que la fabrication additive intéresse également la production de séries et assure 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.

Les principaux besoins recensés sont synthétisés ci-dessous et détaillés dans le rapport final de l'étude.

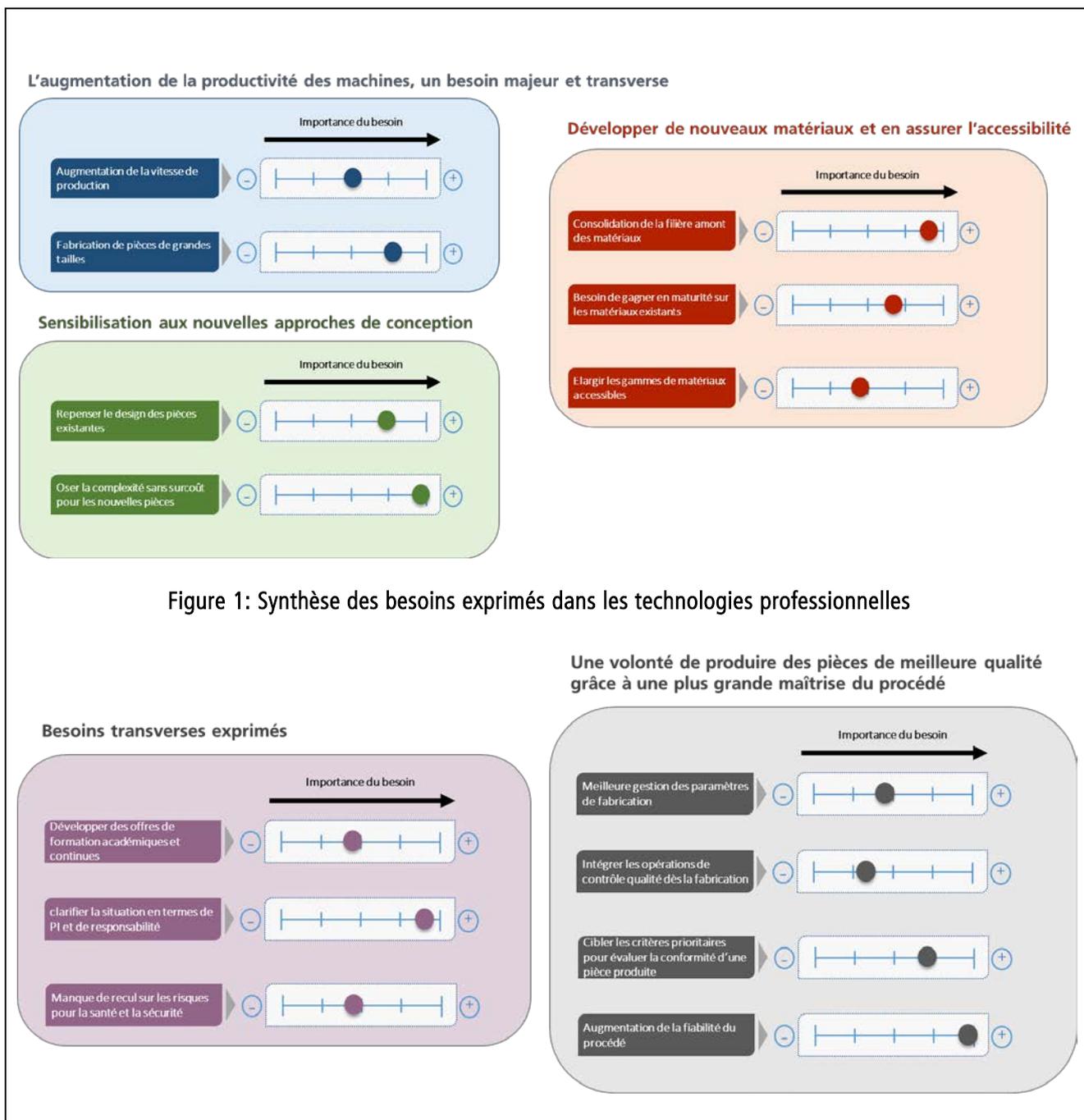


Figure 1: Synthèse des besoins exprimés dans les technologies professionnelles

Analyse de la demande dans les technologies grand public

L'introduction de la fabrication additive dans le monde du commerce de détail et le grand public 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 ces deux axes qu'a été menée l'analyse d'un segment où toute la chaîne de valeur devra être évaluée et repensée pour intégrer l'impression 3D.

« Les particuliers utiliseront la fabrication additive à domicile pour imprimer des objets du quotidien, mais seulement à partir de 2030 » affirme la chercheuse de *l'University College* de Londres, Ludmila Striukova 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 2015, le producteur américain d'imprimantes 3D grand public 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.

De nombreux acteurs ne croient plus aujourd'hui à l'impression 3D grand public en raison d'une certaine stagnation du marché et du désintérêt progressif des consommateurs. Paradoxalement, l'adoption des technologies a été considérablement freinée par le *buzz* médiatique. En effet, le consommateur, initialement séduit par des annonces alléchantes lui laissant croire qu'il suffit d'appuyer sur un bouton pour fabriquer son objet s'aperçoit finalement que la technologie offre des 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 important), le manque de formation et de sensibilisation sur les applications potentielles. La généralisation de scans 3D sur smartphones ou sur les ordinateurs, avec par exemple le HP Sprout, constitue des innovations sur des briques technologiques complémentaires susceptibles d'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. Elle devrait néanmoins profiter à la fois de machines de plus en plus accessibles et de meilleure qualité et des plateformes d'impression en ligne.

Considérée par beaucoup comme un épiphénomène, l'impression 3D grand public doit encore lever de nombreuses barrières pour se démocratiser. Les principales demandes vis-à-vis de ces technologies peuvent être résumées en plusieurs axes de réflexion :

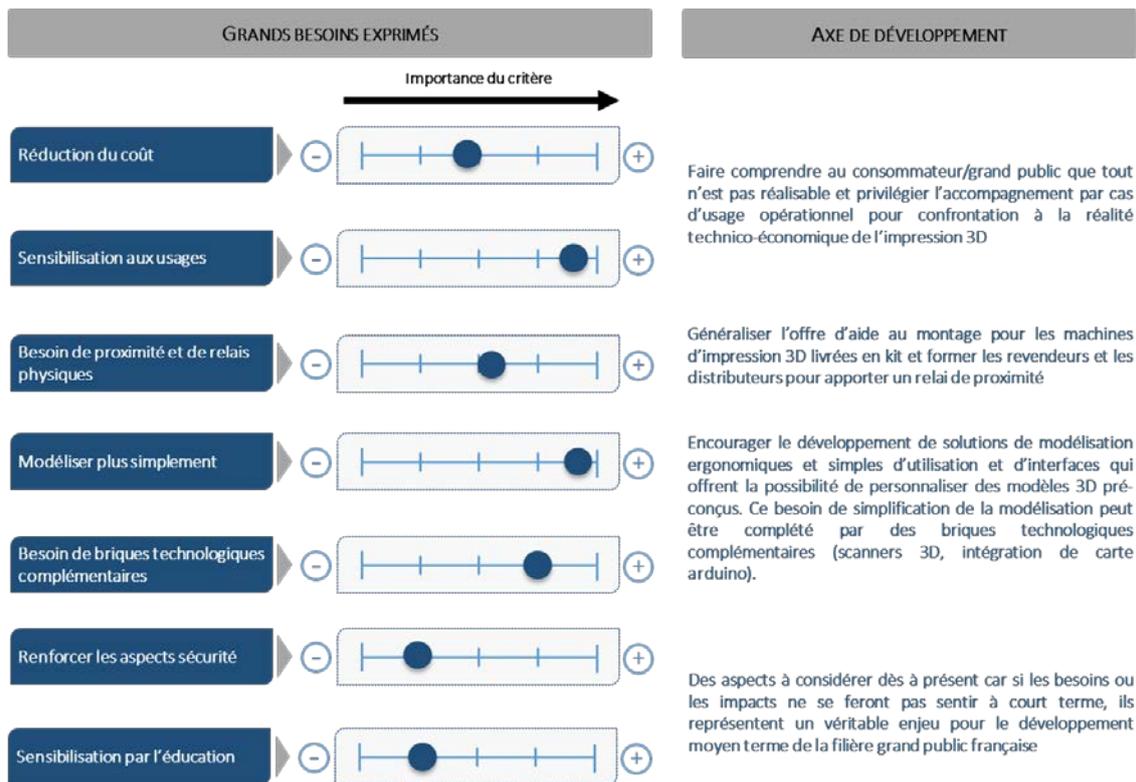


Figure 2: Synthèse des principales attentes vis-à-vis des technologies grand public

ANALYSE DE L'OFFRE

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 et 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 : réticulation⁷ de résine liquide par passages successifs de rayons ultraviolets, dépôts successifs de matière thermoplastique fondue, projection de liant sur poudres céramiques ou encore frittage⁸ 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.

L'ensemble des différents procédés existants est résumé dans le tableau suivant. Le détail des différentes technologies est disponible en annexe du rapport final de l'étude.

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 élevé des machines
Projection de liant/binder jetting (BJ)	Thermoplastiques (ABS, PC, PA...) Métaux Minéraux (sable, pierre...)	Nombreux matériaux disponibles Supports non nécessaires Vitesse de fabrication	Prix élevé des machines 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 élevé des machines (le plus élevé)

⁷ En chimie des polymères, la réticulation correspond à la formation d'un ou de plusieurs réseaux tridimensionnels, par voie chimique ou physique.

⁸ Le frittage est un procédé de fabrication de pièces consistant à chauffer une poudre sans la mener jusqu'à la fusion.

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 élevé des machines 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 2 : 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 du rapport de l'étude, 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. L'écosystème national comporte des acteurs à tous les niveaux de la chaîne de valeur mais il doit encore 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.

Animé par une volonté de structurer la filière française de fabrication additive dès 2014, le pôle de compétitivité ECM2 estime que la chaîne de valeur nationale se présente sous la forme de « sablier ». Le territoire comporte en effet des acteurs importants aux deux extrémités de la chaîne de valeur avec de grands donneurs d'ordres et des 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'équipement). Renforcer, structurer et équilibrer la filière à des niveaux de la chaîne de valeur porteurs de valeur ajoutée et créateurs d'emplois est un enjeu majeur.

- **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 ;

- en parallèle de cette multitude de fournisseurs de machines, le réseau de distribution et le service après-vente se structurent, tirés par une demande du consommateur qui souhaite davantage de proximité.
- **Les machines industrielles : une nouvelle dynamique lancée par Fives-Michelin :**
 - certains experts considèrent « la bataille des machines » comme perdue en France dans la mesure où les constructeurs français les plus prometteurs ont été acquis par des acteurs concurrents. L'offre française en termes de machines de fabrication additive industrielle semble complète avec des positionnements multitechnologies, multimarchés et des acteurs *leaders* ;
 - comme le démontrent la prise de participation majoritaire de Michelin chez 3A en 2015 et 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 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.
- **Fournisseurs de matériaux :**
 - 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.
- **Solutions logicielles : Une expertise française et un *leader* mondial sur le sujet**
 - deux *leaders* du domaine se démarquent sur le segment de l'impression 3D : 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...);
 - parmi d'autres initiatives d'intérêt, la PME Sokaris Ingénierie ou encore le centre DINCCS de MICADO développe de nouvelles méthodologies d'optimisation à travers des modules logiciels innovants.
- **Une recherche française de haut niveau mais qui reste éclatée :**
 - située au sixième rang mondial en 2012, la recherche scientifique française est reconnue internationalement et dispose de sérieux atouts à tous les niveaux de la chaîne de valeur. Elle reste éclatée et peu visible à l'international ;
 - 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. 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.
- **Une structuration déséquilibrée entre donneurs d'ordres et sous-traitants :**
 - la France possède de grands donneurs d'ordre 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 ;
 - une consolidation de la sous-traitance apparaît nécessaire pour accompagner la croissance des donneurs d'ordres. Si le tissu industriel s'étoffe en consolidant son offre *via* des partenariats ou des investissements pour couvrir l'ensemble des compétences (design, matériaux, *post-process*), l'absence 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.

Tableau 3 : Synthèse de l'offre française et les compétences associées au niveau de la chaîne de valeur

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. Pourtant le nouveau Plan pour l'industrie du futur place la fabrication additive comme un axe de modernisation technologique stratégique pour les PME et ETI industrielles. Il

ouvre ainsi la voie à d'importants projets collaboratifs, ainsi qu'à une diffusion plus active auprès des entreprises.

La France a d'ailleurs engagé des montants financiers non négligeables dans le développement de la fabrication additive au travers de subventions et d'aides à la R & D et à l'innovation⁹. De nombreux laboratoires et entreprises ont ainsi été accompagnés par des projets du Fonds unique interministériel (FUI) et de l'Agence nationale de la recherche (ANR), et ont bénéficié par ailleurs du soutien des collectivités et des territoires. **Le manque d'information consolidée à ce sujet ne doit donc pas masquer 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 restent diffus à travers les territoires, ce qui explique ce sentiment de désorganisation.

En effet, de manière assez contradictoire, **la force de notre territoire est aujourd'hui la conséquence de ce manque de structuration initiale.** Les régions, les territoires, au même titre que les entreprises et les laboratoires n'ont ainsi pas attendu la publication d'une stratégie nationale pour investiguer le domaine. **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'intérêt¹⁰. Néanmoins, la mise à l'échelle de ces centres ne pourra pas se faire sans l'appui et le soutien d'une stratégie nationale affirmée. **Toutes les bases pour construire une stratégie forte ne demandent donc plus qu'à être consolidées.**

Une stratégie nationale est donc devenue aujourd'hui indispensable. En effet, le foisonnement non coordonné des initiatives induit de nombreux effets négatifs : absence d'identification des compétences stratégiques dans les territoires, nombreux doublons de projets de recherche au niveau national, manque de visibilité et de reconnaissance à l'international des compétences développées... La feuille de route de l'Alliance pour l'industrie du futur pour la fabrication additive est une première initiative forte en ce sens.

Les régions se concurrencent et cherchent le plus souvent à prendre l'ascendant sur leurs voisines, plutôt que d'essayer de faire émerger des *leaderships* nationaux et internationaux. De nombreuses initiatives se développent donc sans qu'il y ait forcément coordination ou synergies entre elles. Les pouvoirs publics devront veiller à y remédier. Le manque de communication et de partage d'informations entre les différents organismes moteurs du développement de la filière amène une démultiplication des études réalisées sur le sujet et donc une mauvaise allocation des ressources. La régionalisation des subventions et des aides permet une meilleure proximité et réactivité au niveau des projets accompagnés, mais **elle doit impérativement se doubler d'une vision stratégique française avec des informations centralisées au niveau national.**

Les principales conclusions et enseignements du diagnostic précédemment décrit peuvent ainsi être résumés par les éléments suivants :

- 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 doivent se consolider pour répondre à la croissance de la fabrication additive ;
- des compétences indéniables présentes dans le tissu de la sous-traitance industrielle mais une atomisation de l'offre qui freine les collaborations avec les donneurs d'ordres et ouvre des opportunités aux concurrents étrangers qui prennent ainsi des parts de marché sur le territoire national. Certains sous-traitants affichent cependant une volonté de se développer en intégrant l'ensemble de la chaîne de valeur, en investissant ou en s'associant avec des compétences complémentaires ;

⁹ Aucune donnée financière consolidée n'existe cependant sur le sujet.

¹⁰ Se référer notamment à l'analyse des impacts territoriaux, et à la cartographie de l'écosystème.

- une absence de stratégie nationale affirmée et un besoin de structuration de la filière. La situation est cependant en train de s'éclaircir grâce à la feuille de route de l'Alliance pour l'industrie du futur, une initiative forte en ce sens.

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 de 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. • Positionnement de la France pour défendre les différentes avancées technologiques grâce son rôle majeur dans la normalisation internationale. • Une identification nécessaire des bons pôles de compétences par rapport à un besoin précis. • Faciliter les mises en relation et le partage de connaissances. 	<ul style="list-style-type: none"> • Une part importante de la demande des donneurs d'ordres en fabrication additive va 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 4: Analyse SWOT de l'offre française dans un contexte international

FACTEURS DE DÉVELOPPEMENT DE LA FABRICATION ADDITIVE

Une utilisation pertinente et optimisée 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).

La fabrication additive n'est qu'une évolution, et ne constitue donc 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 encore s'améliorer et d'importants verrous **restent à lever afin de généraliser l'adoption** de cette technologie.

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. Cependant, les innovations du secteur devraient permettre d'augmenter le seuil du nombre de pièces à partir duquel la fabrication additive peut concurrencer les autres procédés.

Afin d'identifier les opportunités et les 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.

Principaux enjeux d'adoption de la fabrication additive

Les motivations qui poussent les acteurs à s'approprier la fabrication additive semblent sensiblement identiques dans les différents secteurs industriels :

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

La possibilité de « concevoir par rapport à une performance attendue et non plus par rapport aux contraintes de fabrication et/ou d'assemblage » fait également partie des facteurs d'attractivité, au même titre que le développement des matériaux innovants impossibles à fabriquer auparavant.

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 :

- 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).

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.

Freins et leviers de développement de la fabrication additive

L'adoption massive de ces procédés de fabrication additive au sein des industries et des territoires reste freinée par des verrous technologiques, économiques ou réglementaires. Les différents critères à prendre en compte n'ont par ailleurs pas le même impact sur le développement de la filière ni la même temporalité. 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. Ces dernières combinent déjà différentes étapes d'apport et de soustraction de matière, avec une réelle combinaison des matériaux. Les pièces ainsi fabriquées comportent un nombre plus important de fonctionnalités. Personne n'est capable de prédire aujourd'hui quelles seront les typologies de machines de fabrication additive qui se démocratiseront à l'avenir, au vu des enjeux et environnements pluriels 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 :
 - au niveau des procédés, un important verrou repose ainsi sur le manque de fiabilité et de répétabilité de la fabrication de la pièce,
 - 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,
 - 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** ;
- amélioration du couple (vitesse de fabrication – coût de production) :
 - actuellement, le coût de fabrication par pièce est encore trop élevé pour devenir compétitif sur de la production série. Il représente donc un levier de développement majeur partagé par l'ensemble de la filière,
 - 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 ;
- états de surface et post-traitement :
 - 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 encore essentielles à l'obtention d'une pièce conforme au cahier des charges défini. La réduction des coûts de post-traitement ou d'intégration au sein de la chaîne de la fabrication constitue donc des leviers de développement importants,
 - 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.

- Le coût des matériaux, ou l'illusion d'un frein majeur :
 - si la part du coût matière reste relativement importante dans le coût de fabrication, elle devient cependant secondaire lorsqu'elle est considérée de manière globale (de la conception aux finitions). Le coût élevé des matières existantes peut donc être considéré comme un frein modéré,
 - 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.

L'intégration industrielle de ces nouvelles technologies de production

L'analyse développée ici concerne l'organisation productive et les facteurs d'optimisation des capacités de production des entreprises. Ils concernent la productivité, la rentabilité, la gestion des approvisionnements, la 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 explicités par ordre d'importance décroissant.

- De nouveaux outils logiciels pour une nouvelle méthodologie de conception. Il existe deux typologies d'acteurs avec des besoins et des freins associés différents :
 - les 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) ;
 - les acteurs déjà très actifs sur l'utilisation d'outils d'optimisation tels que les entreprises du spatial, de l'aéronautique et du 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 trop complexes qui imposeraient un effort de reconstruction manuel ou un post-traitement.
- L'hybridation des machines ou la modularisation de la chaîne de production : une confrontation entre la vision d'une production délocalisée ou centralisée.

Pour conclure, les différents leviers de développement des technologies de la fabrication additive peuvent être regroupés 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 ils ne devraient avoir qu'un impact modéré sur le développement de la filière ;
- 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 diffusion de ces nouvelles approches n'interviendra que dans un second temps, à moyen terme. La recherche française est relativement bien positionnée sur ces leviers à forts impacts. Il est donc important que la France maintienne sa forte présence au sein des organismes de normalisation. Elle doit également se concentrer sur les leviers de plus long terme qui transformeront durablement la fabrication additive.

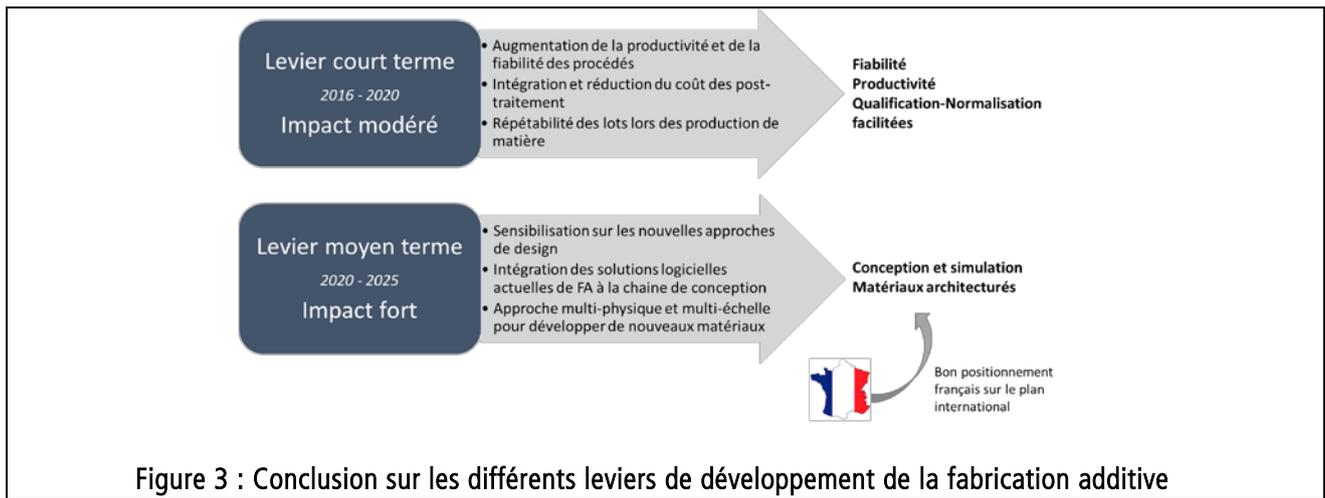


Figure 3 : Conclusion sur les différents leviers de développement de la fabrication additive

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

Le développement de l'impression 3D s'inscrit dans l'évolution plus générale 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 des machines orientées vers le grand public. 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.**

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.

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, puis de l'ensemble du processus de production industriel à moyen et long termes. 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, pour 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 elle 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 pièces... Ces différents scénarios de capture de valeur sont détaillés dans l'analyse prospective du rapport de cette étude.

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 pourra être amorti par la marge associée au cycle de production du produit. Il pourrait également être facilité par des investissements mutualisés. Par ailleurs, **une bonne**

identification des compétences et des moyens disponibles dans les différents territoires seront également essentiels 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. Ces dernières concernent le monde de l'entreprise et les territoires, notamment au travers du concept de « l'économie de quartier » qui privilégie les circuits courts. Les tiers-lieux, espaces de rencontre et de partage comme les fabLabs, représentent une force structurelle d'importance, au plus proche des nouveaux usages et des besoins locaux. Ces lieux doivent permettre d'accompagner l'évolution des méthodologies de conception et des compétences, et en assurer la diffusion au sein de l'écosystème industriel. La force de ces nouveaux écosystèmes provient 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 destinées. Dans un premier temps, il faudrait donc mieux caractériser ces lieux d'innovation, afin d'adapter et de faire évoluer au mieux les différents dispositifs qui s'adressent à eux.

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.

SCÉNARIOS PROSPECTIFS DE LA FABRICATION ADDITIVE

La fabrication additive est un phénomène mondial. Les évolutions envisagées ne se limitent pas donc au marché français. Elles permettent d'anticiper certaines mutations économiques ainsi que d'éventuelles inégalités territoriales qui pourraient découler de l'appropriation ou l'accès à ces technologies.

L'identification et la classification des facteurs de développement de la fabrication additive menées précédemment ont permis de constituer une base de réflexion pour la définition de différents cas d'usages, dont l'évolution reste conditionnée par plusieurs leviers prioritaires. 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.

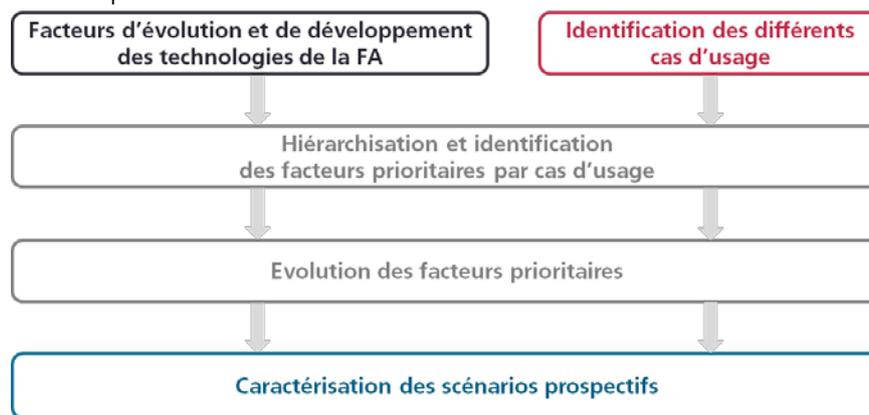


Figure 4: Rappel de la méthodologie globale de constitution des scénarios prospectifs

Caractérisation de scénarios prospectifs

En offrant une alternative aux préséries et aux 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 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. Plusieurs axes de déploiement de la fabrication additive, dépendant de l'impact de cette technologie sur le produit ou sur la chaîne logistique, ont pu alors être dégagés. Pour chaque scénario, les leviers prioritaires ont été soumis au regard critique des participants des différents ateliers de travail afin de mieux percevoir les évolutions attendues par scénario et marché d'application, et ainsi valider un consensus collectif avec l'ensemble des acteurs-clés de la filière.

1. Prototypage et expérimentation : La technologie s'est principalement développée 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 sans modifications de la chaîne logistique.

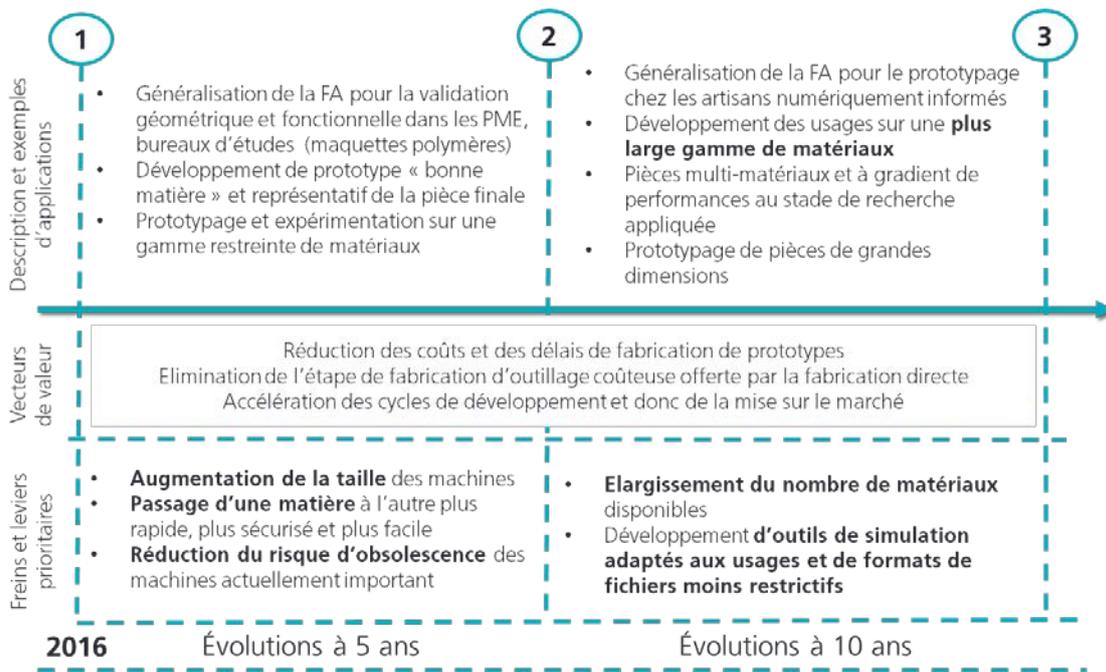


Figure 5: Synthèse - Prototypage et expérimentation

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.

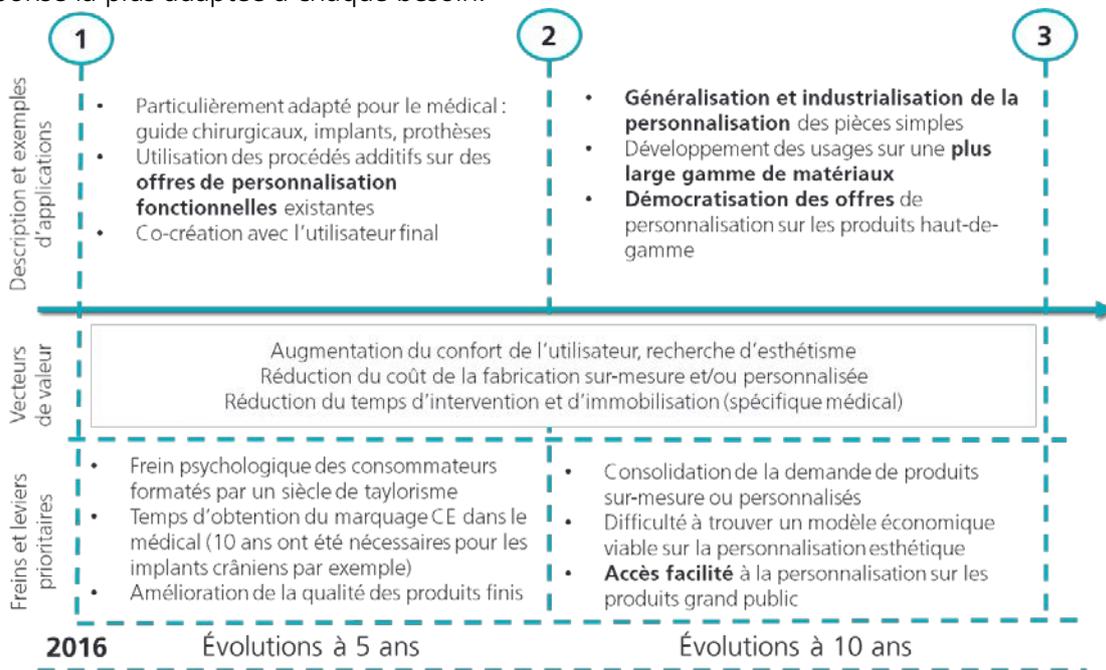


Figure 6: Synthèse - Industrialisation de la personnalisation : de l'esthétique au fonctionnel

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 important aujourd'hui pour de

nombreux acteurs, qui veulent augmenter leur capacité d'innovation produit. La technologie permet, par exemple, de réaliser des outillages complexes afin d'augmenter les cadences de production ou d'intégrer, dès la fabrication, de l'électronique sans pour autant transformer la chaîne logistique.



Figure 7: Production série et gain de performances

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. L'intérêt de la fabrication additive n'est pas lié 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.

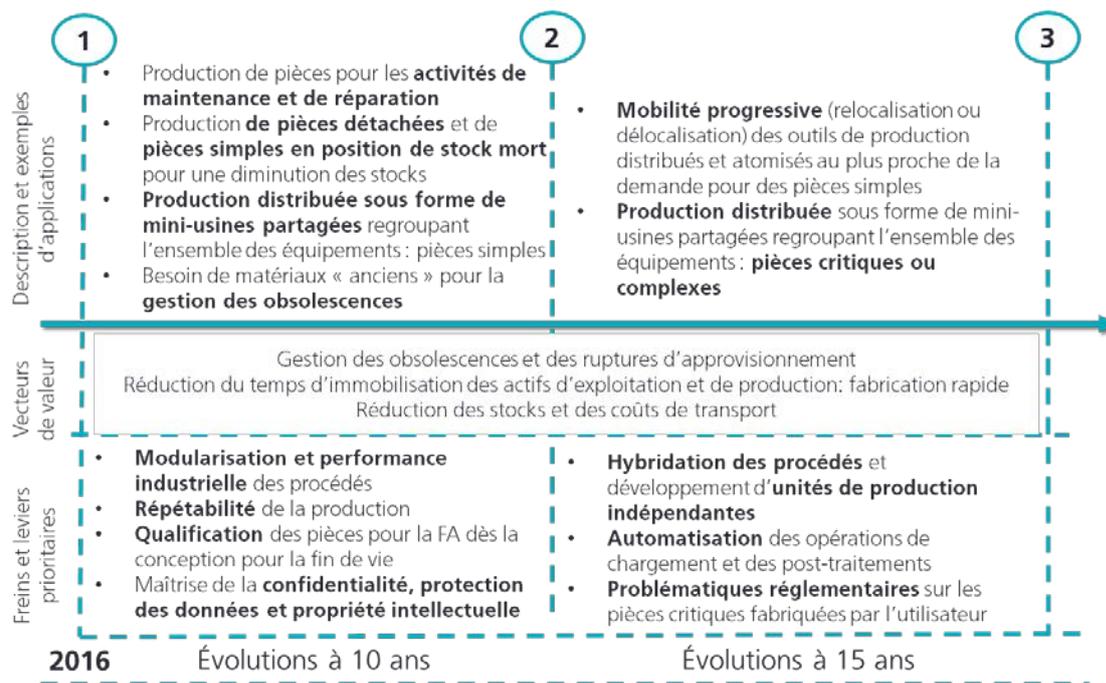


Figure 8: Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande

Impact des scénarios prospectifs sur les différents marchés et ouverture à des scénarios mixtes

Ce travail de synthèse ne prétend pas à l'exhaustivité des scénarios envisageables 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. Le premier semble orienter ses réflexions sur les pièces de grandes tailles tandis que le second sur des pièces complexes à haute valeur ajoutée.

Les facteurs transverses, qui n'ont pas tendance à favoriser l'évolution d'un scénario plus qu'un autre, ne doivent pas être considérés comme leviers de développement prioritaire dans l'analyse prospective. 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, ces problématiques transverses peuvent potentiellement freiner, voire stopper le processus d'adoption de la fabrication additive.

Les scénarios tels qu'ils ont été définis, cherchent à expliciter des usages indépendants, mais ils restent complémentaires. Ainsi, au sein de l'ensemble des secteurs industriels concernés, il sera possible d'observer de nombreuses combinaisons différentes avec des temporalités d'avènement variables, suivant les contraintes industrielles propres à chacun. Ainsi, la fabrication additive évoluera inévitablement selon des scénarios mixtes, impliquant par exemple la production de pièces complexes et personnalisées au plus proche de la demande à l'horizon 2030.

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 5: Évaluation de l'impact des scénarios prospectifs sur les différents marchés cibles de l'étude

Une autre réalité industrielle semble toutefois se dégager à plus court terme selon ce modèle de scénario mixte : celui des gabarits, fixations et autres outillages d'assistances opérationnelles utilisés tout au long des processus de fabrication. En effet, dans un objectif de réduction des 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).

Conclusions générales :

- **La fabrication de maquettes 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 5-8 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

Les propositions de recommandations et les fiches actions découlent 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 adopter 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'actions 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 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 exhaustives pour le développement de la filière.

-  1. Soutenir la démarche de l'Alliance pour l'industrie du futur pour favoriser l'industrialisation des technologies en construisant une *roadmap* technologique.
-  2. Réaliser un bilan actualisé des sept familles de procédés et un guide d'aide à la décision à destination des entreprises.
-  3. Renforcer les actions de sensibilisation à tous les niveaux :
 - sensibilisation du grand public,
 - sensibilisation des PMI,
 - sensibilisation des pouvoirs publics et des financeurs.
-  4. Faciliter le développement et l'accès à de nouvelles compétences en s'appuyant sur les plateformes, pilotes et FabLabs existants :
 - renforcer la collaboration entre les FabLabs et les établissements d'enseignement primaires et secondaires,
 - définir un référentiel national de formation pour les formations continues et initiales,
 - établir une cartographie des potentiels de formation initiale sur le territoire.
-  5. Lancer un programme national d'accompagnement des entreprises.
-  6. Renforcer la présence française sur la scène internationale :
 - encourager et faciliter l'accès aux financements européens et aux collaborations internationales,
 - mener des actions d'intelligence économique et de veille internationale.
-  7. Favoriser les collaborations multifilières.
-  8. Un essor qui doit aller de pair avec la prise en compte des risques et leur réduction au niveau le plus bas possible.

Tableau 6: Compilation des recommandations formulées dans cette étude

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 qui nécessite certaines compétences et une certaine expérience. Il est nécessaire de sensibiliser les entreprises à ce sujet préalablement à la mise en place d'actions de formation à grande échelle, car le besoin de main-d'œuvre reste à créer.

L'État devrait ainsi **permettre de favoriser les expérimentations avec l'enseignement public**. Les acteurs doivent être incités à travailler ensemble, avec des technologies qui peuvent fonctionner entre elles, et à différents niveaux. De telles expérimentations possèdent le potentiel d'entreprendre un déploiement à grande échelle. Ce déploiement semble nécessaire afin d'améliorer significativement la sensibilisation du grand public à ces nouvelles technologies. **Il est donc 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'Institut national de la propriété industrielle (INPI) actualisé chaque année.

Pour diffuser les technologies de fabrication additive, un plan national clairement identifié à l'image de l'initiative de l'Alliance pour l'industrie du futur, serait sans aucun doute un signal fort vers les industriels, PME et ETI en particulier, et les laboratoires académiques.

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.