

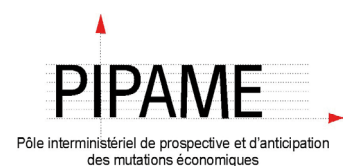
ÉTUDES ÉCONOMIQUES

# PROSPECTIVE

Futur de la fabrication additive

## Focus sur les matériaux métalliques hors aluminium

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



Focus sur les matériaux métalliques  
hors aluminium

**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)
Aurélié 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](http://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](http://www.cetim.fr)

### **REPRESENTE 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](http://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](http://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](http://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](http://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

<b>Table des matières</b> .....	<b>7</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>9</b>
<b>Description de la situation actuelle</b> .....	<b>9</b>
Familles d’alliages métalliques principales et applications.....	9
Familles d’alliages .....	9
Alliages et applications concernées par la fabrication additive.....	10
Focus sur les marchés consommateurs de fabrication additive métallique.....	14
Marché du médical .....	14
Marchés aéronautique et spatial .....	16
Marché des outillages industriels .....	19
Les principaux procédés de fabrication additive métal et leurs caractéristiques clés.....	21
Aspects économiques de la fabrication additive métal .....	23
Comparaison avec les autres procédés.....	25
Évolutions envisagées des principaux facteurs de la fabrication additive métal.....	28
<b>Description de l’évolution de la <i>supply chain</i></b> .....	<b>28</b>
Place du métal par rapport aux autres catégories de matériaux.....	28
Développements en cours .....	31
Évaluation du niveau de maturité l’utilisation des métaux en fabrication additive .....	35
Freins à lever pour le développement de la fabrication additive métallique .....	39
Caractérisation des poudres et qualité des poudres produites .....	39
Parachèvement et post-traitements des pièces métal.....	39
Recyclage de la poudre pour les procédés sur lit de poudre .....	40
Bilan énergétique.....	41
Maîtrise des matériaux et des procédés.....	41
Applications aux hautes températures .....	41
Exemples de motivation à l’adoption de la fabrication additive .....	42
Reconception avec allègement de produit.....	42
Ajout de fonctions et combinaison de matériaux.....	45
Procédés hybrides associant fabrication conventionnelle et fabrication additive .....	46
Aptitude à l’intégration de fonctions .....	47
La fabrication additive métallique multimatériau .....	48
Évolution de la fabrication additive vers la mise en œuvre de composites à matrice métallique .....	49
Synthèse Forces-Faiblesses-Opportunités-Menaces de la fabrication additive métallique .....	50

<b>Description des scénarios prospectifs de développement de la fabrication additive : Autres métaux.....</b>	<b>51</b>
Scénario 1 – Prototypage et expérimentation.....	51
Scénario 2 – Industrialisation de la personnalisation.....	53
Scénario 3 – Production série et gain de performance.....	55
Scénario 4 – Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande.....	58
Conclusion générale aux scénarios « Autres métaux ».....	59
<b>Propositions de recommandations.....</b>	<b>60</b>
<b>Analyse de pièces.....</b>	<b>63</b>
Un exemple de combinaison matériaux/procédés/marché :cas des alliages métalliques utilisés pour le médical.....	67



## Introduction

Nous avons pu voir précédemment que, si la fabrication additive métal est beaucoup moins importante en volume que la fabrication additive des polymères, elle représente l'avenir pour un grand nombre d'industriels. Ceux-ci sont ainsi pour la plupart persuadés que la fabrication additive métallique a le potentiel pour justement dépasser l'activité polymère en volume et en valeur au cours des prochaines années. Contrairement aux alliages d'aluminium dont les caractéristiques technologiques et économiques font que leur développement est en retard en fabrication additive (cf. volet 7), la plupart des autres alliages métalliques ont déjà fait l'objet d'applications en fabrication additive. La diversité des alliages métalliques et la diversité de leurs marchés posent le problème suivant : cette double diversité est-elle un facteur discriminant pour l'évolution future de la fabrication additive ? L'objet de ce volet est donc, en partant de l'inventaire des alliages dont la mise en œuvre a été effectuée par fabrication additive ou pourrait l'être, et de l'origine de la chaîne de valeur, la fabrication de la matière première (essentiellement sous forme de poudres), d'analyser par famille d'alliages quels sont les freins et leviers de leur développement futur en fabrication additive sur les différents marchés. Dans un premier temps, nous avons privilégié une approche par les propriétés d'emplois et les marchés de ces alliages, puis nous avons listé certains acteurs de la chaîne de valeur, et complété par des données économiques sur le marché et sur les coûts des diverses technologies utilisables qui constituent des facteurs clés pour l'évolution de la technologie. La partie suivante concerne les taux de maturité des différents alliages sur les différents marchés. Pour donner un cadre prospectif à l'évolution de la *supply chain*, nous évoquons ensuite les principaux freins à lever et les pistes à suivre pouvant motiver l'adoption de la fabrication additive. La partie finale propose un nombre limité de scénarios prospectifs intégrant dans la mesure du possible des variantes en fonction des différents matériaux métalliques. L'analyse de ces scénarios prospectifs, basés notamment sur des interviews et sur les conclusions du groupe de travail constitué d'un panel représentatif d'acteurs de la chaîne de valeur, a permis de lister les recommandations proposées en conclusion du rapport.

## Description de la situation actuelle

### Principales familles d'alliages métalliques et applications

#### Familles d'alliages

Les métaux utilisables en fabrication additive sont de plus en plus nombreux, l'énumération suivante sera complétée par une analyse plus détaillée dans la suite du document :

- aciers à outils et aciers inoxydables,
- titane commercial pur et alliages de titane,
- alliages d'aluminium (traités dans le volet 7 de l'étude Pipame),
- alliages base nickel,
- alliages chrome-cobalt,
- alliages base cuivre,
- métaux précieux : or, argent, platine, palladium,
- tantale,
- tungstène.

Nous pouvons citer enfin pour mémoire la famille des intermétalliques (dont les aluminures de titane) qui reste marginale en fabrication additive, bien que faisant l'objet de recherches.

En volume et à l'heure actuelle, les principaux métaux mis en œuvre par fabrication additive sont, dans l'ordre décroissant :

- les superalliages (base Nickel, Co-Cr, etc.),
- les aciers et autres bases Fer,
- les alliages de titane,
- les alliages d'aluminium.

Les aciers et les superalliages base Nickel sont les catégories les plus avancées en termes de fabrication additive, notamment par un effet de masse et de fréquence d'utilisation importante en ce qui concerne les aciers et par une mise en œuvre relativement plus difficile par les procédés conventionnels, en particulier par usinage, pour ce qui est des superalliages base nickel. Les alliages d'aluminium, non traités dans cette partie<sup>1</sup>, auraient, malgré leur moindre coût et leur moindre soudabilité, un potentiel important, notamment pour la fabrication de pièces aéronautiques et spatiales de petites dimensions mais complexes et donc non réalisables par les procédés conventionnels. Pour ce matériau, même si les volumes actuels sont faibles, la croissance pourrait être forte dans les années à venir et, à terme, modifier cette hiérarchie des matériaux, notamment du fait que l'aéronautique reste un secteur gros consommateur d'aluminium.

## Alliages et applications concernées par la fabrication additive

Chaque famille d'alliages semble avoir un ou plusieurs marchés d'application privilégiés. On note ainsi une forte corrélation des matériaux avec les marchés en raison des propriétés intrinsèques de chaque matériau. En ce qui concerne les aciers, les nuances maîtrisées sont des nuances à haute valeur ajoutée destinées aux marchés porteurs pour la fabrication additive, à savoir principalement le médical, l'aéronautique et les moules métalliques pour la plasturgie. Nous verrons plus loin qu'il existe également un besoin fort en termes d'alliages « bas de gamme » pour les outillages de fonderie ou la gestion des obsolescences. Cependant le faible coût des nuances existantes et les faibles volumes que représentent ces besoins en fabrication additive peuvent représenter un certain paradoxe. Il existe par ailleurs de nombreuses autres nuances d'acier potentiellement aptes à la fabrication additive car ces nuances répondent aux critères de faible teneur en carbone et en éléments d'alliages pour limiter la fissuration à froid, en impuretés pour limiter la fissuration à chaud, et en oxygène et azote pour assurer la ténacité au droit des zones fondues. En revanche, le coût de réalisation en fabrication additive fait que ces aciers ne sont pas bien placés pour des pièces à valeur ajoutée faible ou moyenne. La productivité très faible et les coûts élevés ne permettent pas d'envisager une série de pièces sans que cela ne s'accompagne d'un gain très fort sur la valeur ajoutée. Cette situation pourrait évoluer à l'avenir si la productivité de la fabrication additive augmentait, si le prix des machines baissait et si le prix des poudres correspondant à ces aciers classiques baissait également.

Les réussites économiques concernent des pièces complexes que l'on ne peut pas ou très difficilement produire autrement, ce qui demande un travail conséquent de reconception.

- La normalisation est à ce stade très incomplète. Il n'existe des normes matériaux que pour le nickel, le titane et l'aluminium.
- Enfin, les procédés ne sont qu'imparfaitement maîtrisés à ce stade (différence de qualité entre deux fournisseurs, entre deux machines...) et garantir l'absence de défauts est particulièrement complexe. De nombreux travaux sont en cours pour mettre sous contrôle le procédé.

Pour chaque grande catégorie d'alliages sont résumées ci-après les principales propriétés d'emploi et les applications correspondantes dans les principaux marchés utilisateurs des principales nuances<sup>2</sup>.

- **Aciers à outils** : il s'agit d'aciers durs, résistants à l'abrasion, capable de conserver une arête coupante à haute température.
  - **H13** : acier pour travail à chaud pour **matrice de forge** à longue durée de vie.

<sup>1</sup> L'emploi des alliages d'aluminium en fabrication additive est traité de manière spécifique dans le volet 7 de cette étude.

<sup>2</sup> Available Materials for Metal Additive Manufacturing: Characteristics & Applications, Farinia Group

<http://www.farinia.com/additive-manufacturing/3d-materials/characteristics-and-applications-of-available-metals-for-additive-manufacturing>

- **Maraging 300** : les aciers *maraging* (à durcissement par précipitation de composés intermétalliques de nickel, chrome et cobalt et sans précipitation de carbone) présentent une résistance mécanique élevée, une forte ténacité et une stabilité dimensionnelle lors du vieillissement. Leur résistance à l'usure leur ouvre des applications pour de **nombreux outillages, moules d'injection, moules de fonderie, poinçons, filières d'extrusion** ; pour des pièces aéronautiques comme des pièces structurales à haute résistance ; pour des pièces pour la compétition automobile.
- **Aciers inox :**
  - **316L** : l'acier inoxydable 316L<sup>3</sup> est utilisé dans une large gamme de températures. Il résiste à la corrosion. Ses domaines d'applications sont variés : aéronautique, pétrole et gaz, médical, industrie agroalimentaire.
  - **17-4PH** : acier inoxydable à durcissement par précipitation à bonne résistance à la corrosion, résistance mécanique élevée et bonne ténacité jusqu'à 315°C. Il garde une bonne ductilité après traitement par laser.
- **Titane et alliages de titane**
  - **Titane commercial pur (Grade 1 et 2)** : le grade 2 est plus résistant que le grade 1 et de résistance à la corrosion équivalente. Le Cp Ti Grade 2 a une **excellente biocompatibilité**. Nombreuses **applications dans le médical** lorsqu'il y a contact avec les os ou les tissus.
  - **Alliage de titane TA6V (Grade 5)** : nuance de titane la plus produite au monde. Son emploi est massif dans l'aéronautique en général. Il est très commun en fabrication additive pour l'aéronautique, et notamment mis en œuvre par les procédés EBM avec faisceau d'électrons.
  - **Alliage de titane TA6V ELI (Grade 23)** : la nuance ELI (*extra-low interstitial*) est la nuance la plus pure. Applications pour le **dentaire** et le **médical**.
- **Alliages d'aluminium** : les alliages de fonderie ont des températures de fusion et de solidification proches qui les rendent mieux adaptés à la fusion laser que les alliages corroyés<sup>4</sup>. Applications : échangeurs de chaleur, pièces automobiles, pièces aéronautiques, pièces pour le spatial, en général pièces légères et de bonne conductivité thermique. Ils sont détaillés en volet 7 de cette étude.
- **Alliages base Nickel** : ce sont des superalliages à haute résistance, résistance au fluage, à la fatigue corrosion, à la fatigue thermique, parmi lesquels :
  - **Inconel 625** : résistance sous contraintes à court terme jusqu'à 815°C, à long terme jusqu'à 595°C. Bonne résistance à la corrosion jusqu'à 980°C. Applications basse température pour l'industrie chimique, dans l'eau de mer, épurateur de centrale énergétique, pièces à haute température pour le spatial, l'industrie chimique et l'énergie,
  - **Inconel 718** : résistance à la corrosion, à la fatigue, au fluage jusqu'à 650-700°C, bien adapté aux applications cryogéniques. Applications dans l'aéronautique et dans l'énergie pour les aubes, les disques, les anneaux, les carters, les fixations et les pièces d'instruments
  - **Hastelloy X** : résistance mécanique et à haute température jusqu'à 1 200°C. Applications dans l'aéronautique, les turbines à gaz, pour les tubulures, les chambres de combustion, la postcombustion, les tuyères et les appareils de chauffage de cabine ;

<sup>3</sup> En Europe, la désignation officielle est le X2CrNiMo17-12-2, la nuance 316L correspond au référentiel américain. Nous utiliserons dans ce rapport les désignations d'usage les plus communément utilisées en France dans l'industrie, quel que soit leur référentiel.

<sup>4</sup> Corroyage : évolution structurale d'un matériau induite par une déformation plastique importante, par laminage, filage, forgeage, etc.

applications dans les équipements industriels comme les fours, l'industrie pétrochimique et l'industrie chimique.

- **Alliages chrome cobalt (Co-Cr)** : ce sont des superalliages à haute résistance, grande résistance à la corrosion et bonne biocompatibilité, parmi lesquels :
  - **Co28Cr6Mo** : résistance à l'usure élevée, biocompatibilité et absence de nickel. Applications aux implants chirurgicaux comme les articulations de genoux et de hanches. Applications en construction mécanique aux pièces de moteur, aux éoliennes. Applications en bijouterie. Il existe un autre alliage contenant du tungstène, que l'on retrouve par exemple sous la désignation commerciale Cobalt EOS SP2<sup>5</sup> et destiné aux restaurations dentaires.
- **Alliages base cuivre : même si** les alliages de cuivre sont actuellement peu représentés car leur haute conductivité thermique dissipe rapidement l'énergie apportée et leur forte réflectivité optique disperse l'énergie du laser, leurs applications potentielles concernent les structures lattices, ou treillis tridimensionnels, réalisables par fabrication additive. Ces alliages conviennent bien à des applications où le transfert de chaleur est recherché : dans les outillages, pour des inserts dans les moules, pour la réalisation de points chauds dans les semi-conducteurs. Les alliages cuivreux pourraient également être mis en œuvre par fabrication additive pour les équipements sanitaires et l'adduction d'eau (robinetterie, compteurs à eau) qui constituent pour le cuivre un marché important. Enfin, dans le domaine de la serrurerie et de la métallerie pour le bâtiment, la fabrication additive de pièces en alliages cuivreux permettrait de les alléger et d'économiser le métal<sup>6</sup>.
- **Métaux précieux** : les principaux segments concernés par la mise en forme de métaux précieux par fabrication additive sont la bijouterie, l'horlogerie ou encore l'électronique. Si les acteurs sont attirés par les nouvelles formes et les économies de matières que peut apporter cette technologie, la fabrication additive de métaux précieux est légèrement en retard et connaît actuellement une phase d'évaluation et d'appropriation au sein de centres techniques comme le Cetehor. À ce jour, ces métaux sont exclusivement mis en œuvre par fusion laser sur lit de poudre. Les constructeurs EOS ou Sisma<sup>7</sup> proposent des machines sur ce marché spécifique.
- **Métaux réfractaires (tungstène, tantale)** : la production industrielle de poudres de qualité commence à se développer grâce au procédé de fusion en creuset froid combiné à une atomisation au gaz ou à la technologie plasma induit. La fabrication additive de composants en tungstène pur est envisageable, notamment pour réaliser des collimateurs d'appareils de radiothérapie dans le domaine du médical<sup>8</sup>.

---

<sup>5</sup> [Fiche technique matériau Chrome Cobalt EOS SP2 pour EOSINT M 270](#)

<sup>6</sup> Entretien téléphonique Poudmet du 24 juin 2016.

<sup>7</sup> <http://www.sisma.com/fra/additive-manufacturing/>

<sup>8</sup> <http://www.tekna.com/industries/medicale/fr/>

Marchés		Familles d'alliages						
	Bases Ni	Cr-Co	Titane	Bases Fer		Niveau de maturité par marché	Freins	Leviers
				Aciers à outils/ <i>maraging</i>	Aciers Inoxydables			
<b>Aéronautique</b>	Application à chaud (aubes de turboréacteur)	Application à chaud (aubes de turboréacteur)	Applications diverses (allègement de structure) Pièces de structure			Très nombreuses études. Très peu d'applications.	La certification extrêmement complexe d'un procédé dont la maîtrise et la normalisation sont en construction	« Poids lourd » du marché de la fabrication additive.
<b>Défense</b>			Applications diverses (allègement de structure)	Applications diverses	Applications diverses	Quelques cas, nombreuses études		
<b>Énergie</b>	Application à chaud (tubes de chaudière...)	Applications à chaud	Tenue à la corrosion notamment à l'eau de mer		Applications diverses (allègement de structure)	Quelques cas, nombreuses études		
<b>Médical</b>		Implants (notamment en cas de frottements)	Implants		Instruments chirurgicaux	Très courant en dentisterie, En France, début de la mise sur le marché pour l'orthopédie	La certification	Débouché important de la fabrication additive
<b>Outillages</b>				Applications diverses (plasturgie principalement avec des canaux pour refroidir les moules)		Application concrète en croissance.		Débouché peu connu mais bien réel de la fabrication additive
<b>Automobile</b>						Aucune application en dehors de quelques très rares exemples pour de la compétition ou automobile haut de gamme	Beaucoup trop lent, peu productif et cher pour intéresser ce secteur pour la grande série	Marchés : compétition, haut de gamme, luxe
<b>Autres</b>						Il manque toute la mécanique classique de composants...	Comme l'auto + pas les nuances traditionnelles comme les aciers au carbone	
<b>Niveau de maturité par matériau</b>	Bonne Normes existantes en fusion laser	Bonne	Bonne Normes existantes en fusion laser	Bonne	Bonne			

Tableau 1 : Analyse croisée Marché d'application/Matériaux métalliques/pièces

### Conclusions et enseignements :

- On notera tout d'abord dans les matériaux disponibles l'absence des aciers au carbone. En effet, on ne retrouve que très marginalement les aciers utilisés par le mécanicien traditionnel. Bien que des développements aient été entrepris, les aciers pour traitement thermique sont encore difficiles à mettre en œuvre en raison de problèmes de soudabilité qui se matérialisent par des fissurations. Seuls les aciers inoxydables, l'acier à outil H13 et l'acier *maraging* sont disponibles. C'est un des freins importants de la diffusion de la technologie à l'ensemble de l'industrie.
- La normalisation est, à ce stade, très incomplète. Il n'existe des normes matériaux que pour le nickel, le titane et l'aluminium.

## Focus sur les marchés consommateurs de fabrication additive métallique

Les métaux se distinguent des autres matériaux par leurs caractéristiques mécaniques élevées. Ces caractéristiques les rendent incontournables pour des applications où les sollicitations sont fortes. Aujourd'hui, les besoins de gain de performance par fabrication additive sur des pièces en métal à haute valeur ajoutée sont les plus forts sur les marchés d'application suivants : outillages industriels, aérospatiale et le médical.

### Marché du médical

#### Place du médical dans le secteur de la fabrication additive

Selon le rapport Wohlers Associates, la plateforme européenne AM, les cabinets Roland Berger et Lux Research, le chiffre d'affaires du médical et dentaire était en 2013 de 15-16 % du chiffre d'affaires total de la fabrication additive, tous matériaux et pièces comprises. Ce pourcentage est d'après le rapport Wohlers 2016 de 12,2 %.

Dans le marché du médical, la fabrication additive métal vise principalement les prothèses dentaires et la fabrication d'implants orthopédiques.

#### Orthopédie

La pénétration de la fabrication additive métallique dans ce secteur est actuellement très faible avec une toute première certification obtenue début 2016.

Les enjeux de la fabrication additive pour ce secteur sont :

- la personnalisation des ancillaires et implants. Ces procédés permettant d'exploiter la chaîne numérique du scanner du patient à la réalisation d'une pièce customisée,
- la fonctionnalisation de surfaces, les structures trabéculaires qui permettent de fonctionnaliser la surface des implants pour favoriser la repousse osseuse (ostéo-intégration),
- la réduction des stocks ; à terme, si ces procédés permettent de diminuer les temps de cycles de fabrication, les fabricants d'implants peuvent espérer de réduire leurs stocks qui représentent une part importante de l'immobilisation de leur trésorerie,
- les matériaux. Actuellement les technologies de fabrication additive permettent de produire des pièces dans des matériaux similaires à ceux mis en œuvre par les procédés traditionnels (Ti6Al4V ELI, Co-Cr...), 17-4.

À titre d'exemples, les applications suivantes montrent l'application de la fabrication additive comme procédé complémentaire d'un autre procédé ou comme procédé de réalisation complète. Pour le genou, la société Conformis qui commercialise des implants personnalisés en Co-Cr, utilise la fonderie perdue à partir de noyaux fusibles fabriqués par stéréolithographie. Sur le modèle iTotal®, Conformis fabrique ses implants directement à partir d'un procédé de fabrication additive (procédé non précisé). D'autres implants de genou sont fabriqués directement par LBM (*Laser Beam Melting*). Chez Stryker, un ensemble plateau tibial ainsi qu'une rotule en alliage de titane comportant une structure lattice appelée commercialement Tritanium, et chez Biomet qui incorpore des cales en titane fabriquées par EBM (*Electron Beam Melting*) composée de structure lattice « Osseo TiTM ».



Figure 1 ConforMiS - iTotal® (gauche)- Stryker -Triathlon® Tritanium® Cone Augments (milieu) - Biomet- Vanguard® 360 Osseo TiTM Tibial Sleeve Augments : manchon tibial (droite)

**Focus sur la réglementation et la normalisation en fabrication additive métallique dans le médical :**

- Normalisation : Pour la production de composants personnalisés et complexes par fabrication additive, l'alliage de titane TA6V-ELI est le plus utilisé avec des post-traitements en complément. Les spécifications interdisent la présence d' $\alpha$ -case et préconisent des procédés de relaxation de contraintes (ASTM F136-08 Standard Specification for Wrought Ti6AlV4 ELI Alloy for Surgical Implant Applications ; F3001-14 Standard specification for Additive Manufacturing TA6V ELI with Powder bed Fusion) mais il est nécessaire d'aller plus loin. Des post-traitements thermiques (recuit + trempe + vieillissement) ont des effets positifs, notamment en augmentant fortement la limite d'endurance par rapport à un traitement thermique standard.
- Réglementation (pas spécifique aux métaux)<sup>9</sup> : Les enjeux réglementaires de la fabrication additive dans le domaine médical concernent les éventuelles distinctions entre les modes de production des dispositifs médicaux (DM) : de série, de série adaptée, sur mesure à partir d'images du patient. Pour les DM mis sur le marché par un fabricant de DM les directives DM s'appliquent. Aujourd'hui selon le guide sur mesure de l'Agence nationale de sécurité du médicament (ANSM) qui fait référence, la fabrication à l'unité n'est pas un critère de qualification de dispositifs médicaux sur mesure. Un dispositif fabriqué au moyen d'un procédé standard de production, c'est-à-dire suivant des méthodes de fabrication habituellement utilisées pour la fabrication en série, mais nécessitant une adaptation pour réaliser à l'unité un DM dans l'intention de répondre à la demande spécifique du professionnel de santé ou d'un autre utilisateur professionnel, n'est donc pas un dispositif sur mesure.

<sup>9</sup> Source : FA dans le domaine médical: enjeux réglementaires (Florence Ollé, Snitem).

## Marché aéronautique et spatial

En construction aéronautique, le marché potentiel de la fabrication additive comprend deux grands domaines : des pièces de structures, les supports de cellule, et des pièces de moteurs, les aubes de turbines. Le marché total des pièces supports de cellule (matricés, forgés, fonderie, fabrication additive) passera de 1,1 Mrd€ en 2014 à 1,3 Mrd€ en 2018.

Si l'on considère globalement le marché de l'aéronautique et de la défense, celui-ci aurait approché les 35 M\$ en 2015 en incluant le prototypage, la fabrication et la production de pièces finies. Une forte croissance est prévue jusqu'en 2024, passant de plus de 5% en 2015 à près de 25 % en moyenne annuelle en 2024. Le marché de la fabrication additive pourrait donc dépasser 140 M\$ en 2025 en France.

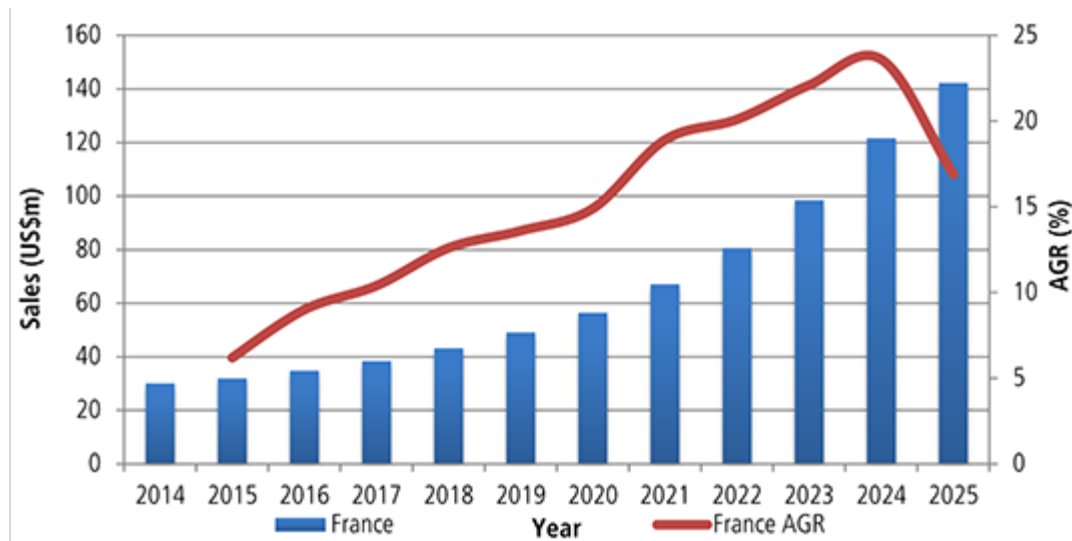


Figure 2: Évolution du marché français de la fabrication additive en aérospatiale et défense entre 2015 et 2025<sup>10</sup>

### Répartition du marché aéronautique

On peut diviser ce marché comme suit :

- Motoristes :
  - o Pièces pour zone température élevée > 600°C,
  - o Pièces pour zone de température basse à moyenne < 600°C.
- Aérostructures :
  - o Pièces structurales,
  - o Pièces non structurales (équipements embarqués).

L'aéronautique et l'espace sont des secteurs qui utilisent les matériaux métalliques et toutes les technologies de fabrication additive (FA) : les besoins sont en général pour des petites ou des moyennes séries, avec des pièces très différentes, et des matériels qui sont exploités très longtemps : la *supply-chain* de pièces détachées sur des matériels dont la fabrication a été arrêtée depuis longtemps, parfois depuis 20 ou 30 ans, est probablement un des axes de développement de la FA, tout comme la réparation de pièces, telle que la pratique par exemple la société Chromalloy pour les moteurs Pratt & Whitney. Une autre application est la réalisation de pièces multifonctionnelles à très haute

<sup>10</sup> Printing & Additive Manufacturing In the Aerospace & Defence Market 2015-2025 - Top Companies in Prototyping, Manufacturing & Processes, Finished Parts.



valeur ajoutée. L'utilisation de la fabrication additive pour la mise au point de prototypes réduit considérablement le temps nécessaire au développement de projets<sup>11</sup>.

La fabrication additive permet aussi de réduire considérablement les pertes matières qui peuvent être supérieures à 90 % sur certains composants produits par enlèvement de matière en matériau noble et parfois délicat à usiner (inconel par exemple).

### Technologies utilisées

Deux procédés sont principalement utilisés :

- fusion par laser (SLM) ou par faisceau d'électrons (EBM),
- apport de matière sous forme de poudre ou de fil.

Le SLM est le procédé le plus utilisé malgré sa faible productivité car il permet de réaliser des pièces très complexes notamment avec des structures lattices et avec un état de surface proche de celui de la fonderie.

Le procédé arc-fil WAAM (*Wire Arc additive Manufacturing*), étudié notamment à l'université de Cranfield, serait adapté pour les pièces de grandes dimensions à tolérances dimensionnelles larges<sup>12</sup>. La matière est apportée sous forme de fil déposé en plusieurs couches superposées et soudées par arc électrique. Il est caractérisé par une plus grande productivité, moins de contraintes d'hygiène-sécurité-environnement, pas de nettoyage nécessaire et pas de recyclage de la poudre. L'engagement matière est beaucoup moins important que celui nécessaire pour les procédés en lit de poudre. Il présente toutefois certains inconvénients : l'état de surface est loin d'être bon et il faut prévoir un usinage de parachèvement de toutes les surfaces à 100 % ou presque, un traitement de détensionnement pour les contraintes résiduelles et la découpe d'un plateau de fabrication sur lequel est bâtie la pièce en fabrication additive. Ce procédé est d'autre part actuellement limité aux alliages de titane et surtout d'aluminium (*cf.* volet 7). Il existe une variante de ce procédé avec soudage par torche plasma du dépôt de fil de titane, développé notamment par Norsk Titanium AS.



Figure 3 : Procédé arc-fil (source Univ. Cranfield)

### Moyens de contrôle

Les moyens de contrôle traditionnels ne sont pas aisément transposables aux pièces issues de la fabrication additive notamment en raison de la grande complexité géométrique et de l'état de surface souvent très médiocre des pièces. À ce jour, deux approches sont en développement au niveau de la mise sous contrôle de la fabrication additive : d'une part, les contrôles *in situ* et, d'autre part, les contrôles en sortie machine.

*In situ*, des suivis par caméra (suivi de la mise en couche, suivi de la réalisation après lasage) sont déjà déployés sur certains procédés. On retrouve aussi (en tout début de commercialisation) des suivis du bain de fusion en continu ou des procédés de thermographie. En sortie machine, la plupart des contrôles traditionnels CND vont se révéler complexes à mettre en œuvre. On retiendra que la tomographie X, malgré son coût très important par rapport aux autres contrôles, est une solution pour

<sup>11</sup> Source : L'impression 3D : Porte d'entrée dans l'industrie du 21ème siècle, Joël ROSENBERG, Conseil général de l'Armement, Pascal MORAND, CCI Paris Île-de-France, Dominique TURCQ, Institut Boostzone, septembre 2015.

<sup>12</sup> <http://waammat.com/about/waam>

avoir une visualisation à 100 % de pièces très complexes avec une identification et un positionnement précis des défauts internes.

### **Marché des moteurs aéronautiques**

Les principaux avantages de la fabrication additive sont :

- pour la réparation de pièces, la fabrication additive permet de faire des économies par rapport aux pièces de rechange fournies par les fabricants d'équipement d'origine (FEO),
- gain de poids : par exemple réduction de 50 % du poids d'une aube de turbine en aluminure de titane et fabrication additive,
- économie de matière coûteuse, jusqu'à 95 % par rapport à la même pièce usinée dans la masse,
- délai d'obtention de la première pièce à partir du fichier 3D beaucoup plus court en fabrication additive (une semaine) qu'en fonderie (huit semaines),
- changement rapide d'une pièce à une autre,
- caractéristiques mécaniques supérieures,
- intégration de fonctions sans assembler plusieurs pièces.

Les principaux freins sont :

- productivité des procédés plus faible : en fusion laser, la productivité n'excède pas quelques dizaines de centimètres cube à l'heure,
- le coût,
- état de surface des pièces moins bon,
- post-traitements nécessaires,
- les difficultés liées aux contraintes résiduelles sur certains procédés, d'où un recours nécessaire à la simulation de la déformation des pièces,
- les métaux doivent être soudables,
- pour la réparation de pièces, concurrence des pièces de rechange fournies par les FEO,
- La nécessité de mettre des supports.

Il faut souligner que l'état de surface traditionnellement obtenu présente une rugosité de surface de  $R_t > 100$  en fusion laser qui est le procédé avec fusion le plus propre.

### **Marché des aérostructures**

Pour la fabrication de structures aéronautiques, la fabrication additive métallique semble encore limitée à des pièces de petites dimensions, bien que des pièces structurales plus grandes aient été étudiées depuis près de vingt ans avec le procédé de fusion additive laser développé en 1997 par la société Aeromet [18] en vue de l'application à la fabrication de cadres en titane de fuselage d'avions de chasse. Les pièces actuellement réalisées sont des pièces semi-structurales de formes complexes et produites en petites séries. Ce sont des pièces non visibles de systèmes annexes (canalisations, conduits divers, prises d'air, supports, fixations, etc.). Pour ce type de pièces en fabrication additive, les métaux peuvent être en concurrence avec les polymères haute performance.

### **Exemples de pièces et tendances du secteur**

Le nouvel injecteur développé par GE Aviation équipera les nouveaux réacteurs à raison de 20 injecteurs par moteur : 100 000 pièces seront à produire de 2015 à 2020. Cette pièce a été reconçue pour la fabrication additive et son fonctionnement est amélioré par rapport à l'existant.

Aux États-Unis, l'approbation a été donnée pour le *retrofit* par fabrication additive d'une entrée de carter de capteur de température de GE Aviation pour des réacteurs d'avions commerciaux.

Le volume envisagé de production des pièces neuves chez les motoristes français est d'environ 2 000 pièces par an pour chaque modèle de pièce. Les acteurs français sont, entre autres, les suivants :

- **BeAM** : plus de 800 pièces métal aéronautiques ont été réparées en 2015 aux États-Unis par une entreprise non citée. BeAM qui est partenaire de Safran Avantis Engineering et de Fives Machining,
- **FMAS** : Fives Group et Michelin ont investi 25 M€ dans FMAS, Fives Michelin Additive Solutions, joint-venture dédié à la fabrication additive,
- **Prodways** : Prodways a établi un partenariat avec Nexteam Group, producteur de pièces aéronautiques usinées,
- **Turbomeca** : la filiale de Safran Aerospace Defence and Security Group produit des buses d'injection de carburant pour le moteur Arrano à l'usine de Bordes, par fusion laser sur lit de poudre.

## Marché du spatial

Ce secteur nécessite beaucoup d'investissement et est également l'objet de mutations rapides avec l'apparition de jeunes sociétés dans le domaine des lanceurs spatiaux, comme Space X aux États-Unis, voulant lancer des milliers de satellites pour couvrir les besoins exponentiels de couverture mondiale d'Internet et des réseaux. Les programmes de lanceurs ne sont pas figés, des évolutions modulaires peuvent avoir lieu. La fabrication additive peut être utilisée en prototypage initial et au cours de la vie du programme<sup>13</sup>.

LayerWise (Belgique) a produit pour Thales Alenia Space (France) plusieurs pièces dont un support d'antenne de satellite de 189 x 229 x 288 mm. Pour le même constructeur, Poly Shape (France) a réalisé ce même type de pièces en plus grandes dimensions.



Topologically optimized aerospace bracket, courtesy of 3D Systems

## Marché des outillages industriels

Le marché des outillages industriels est varié puisqu'il se répartit entre de nombreux métiers : usieurs, découpeurs-emboutisseurs, forgerons, moulistes, etc. Les freins techniques principaux sont les matériaux aujourd'hui proposés en fabrication additive : seules quelques nuances d'acier inoxydable sont disponibles et les volumes de fabrication accessibles sont relativement faibles par rapport aux composants produits par usinage. Le parachèvement est requis. Le coût est également un frein majeur.

En revanche, ces technologies semblent pertinentes pour des applications en outillages, classées par ordre d'intérêt décroissant, pour :

- la réparation d'outillages et le renforcement localisé de la surface. Il s'agit d'employer ces technologies lors des opérations de maintenance/réparation d'outillages de type matrice, poinçon soumis à de fortes contraintes d'usure, ou lors de la fabrication initiale des outillages en améliorant la durée de vie de l'outillage par dépôt localisé d'un matériau avec des propriétés accrues. Dans ce cas de figure, il s'agit d'une problématique de rechargement,
- la fabrication directe d'outillage. Les opérations de transformation étant effectuées généralement à froid, le besoin de régulation thermique n'est pas présent. En revanche, sur

<sup>13</sup> Source : L'impression 3D : Porte d'entrée dans l'industrie du 21<sup>e</sup> siècle, Joël ROSENBERG, Conseil général de l'armement, Pascal MORAND, CCI Paris Île-de-France, Dominique TURCQ, Institut Boostzone, septembre 2015.

certains outils de type outils de taraudage, un système de canaux internes permettant d'amener le lubrifiant au plus près de la matière pourrait revêtir un certain intérêt.

Les technologies pressenties qui permettraient de réparer ou renforcer les outillages sont les technologies par apport direct par projection de poudre. Les premières données relevées dans la littérature indiquent que des solutions de revêtement en acier à outils, en cermets sont préexistantes et présentent des propriétés intéressantes. L'état de développement des solutions matériaux semble fortement varier d'un sous-traitant à l'autre.

Le cahier des charges devra être défini afin d'identifier les cas d'étude, la cible en termes de performances à atteindre, la nature du substrat à revêtir. Sur cette base, les solutions matériaux, et notamment les couples matériaux déposés – substrat pourront être préconisées. La problématique de traitement thermique reste cependant entière. Il apparaît nécessaire qu'un traitement de revenu soit mis en œuvre pour éliminer les contraintes résiduelles générées notamment dans la ZAT<sup>14</sup>, pour réduire la teneur en austénite résiduelle. Cette problématique doit être prise en compte dans les critères de compatibilité pour le choix des couples revêtement-substrat. Des développements seront éventuellement requis selon le savoir-faire du sous-traitant.

Outre les outillages de mise en forme tels que les poinçons et matrices d'emboutissage ou de forgeage et les moules de plasturgie, d'autres catégories d'outillages industriels peuvent être réalisées par fabrication additive : pinces de forge, brides de fixation, gabarits, pinces de tours, etc. Ces outillages sont de plus en plus variés du fait du développement de la customisation de masse des produits : les séries sont plus courtes et les variantes plus nombreuses. Toutefois l'emploi de métaux pour les fabriquer ne se justifie que pour des conditions sévères d'utilisation : température élevée, chocs répétés. On constate un fort développement et donc une forte concurrence des solutions par fabrication additive de polymères, plus faciles à mettre en œuvre et dont la durée de vie plus courte n'est pas pénalisante.

Enfin, il s'agit d'un segment porteur pour les matériaux métalliques : la maturité des utilisateurs progresse sur la mise en œuvre d'outillage par fabrication additive tandis qu'on est plus dans l'expérimentation et la validation sur des fabrications directes à iso-design en parallèle.

### **Conclusions et enseignements :**

---

- **On retiendra principalement deux marchés pour la fabrication additive sur les outillages :**
  - **la possibilité de faire du refroidissement au niveau des parois (*conformal cooling*) sur les applications à chaud,**
  - **la possibilité de faire de la réparation,**
  - **à ce jour, le manque de disponibilité des matériaux couramment utilisés en outillage est un frein important.**
- **La fabrication d'outillage est un segment porteur à court terme pour les matériaux métalliques : la maturité des utilisateurs progresse sur la mise en œuvre d'outillage par fabrication additive tandis qu'on est plus dans l'expérimentation et la validation sur des fabrications directes à iso-design en parallèle, notamment en aéronautique ou pour le médical.**

---

<sup>14</sup> ZAT : zone affectée thermiquement.

## Les principaux procédés de fabrication additive métal et leurs caractéristiques clés

La figure suivante rassemble les principaux procédés de fabrication additive métal. Plusieurs procédés s'appliquent à des métaux variés, d'autres ont, à ce jour, été appliqués préférentiellement à certains métaux, titane ou acier inox. Le rapport Wohlers 2013 a listé l'ensemble des procédés de fabrication additive applicables au métal. Il indique que les divers procédés peuvent mettre en œuvre la plupart des familles de matériaux (base nickel, bases fer, Co-Cr, titane) et qu'il y a peu de corrélations entre les procédés et des métaux en particulier. Une étude récente du Cetim a montré par exemple que le procédé EBM particulièrement adapté à la fabrication de pièces en TA6V en est aujourd'hui à un stade R & D pour l'acier inox, mais nul doute qu'il sera proposé industriellement pour ce matériau dans un avenir proche.

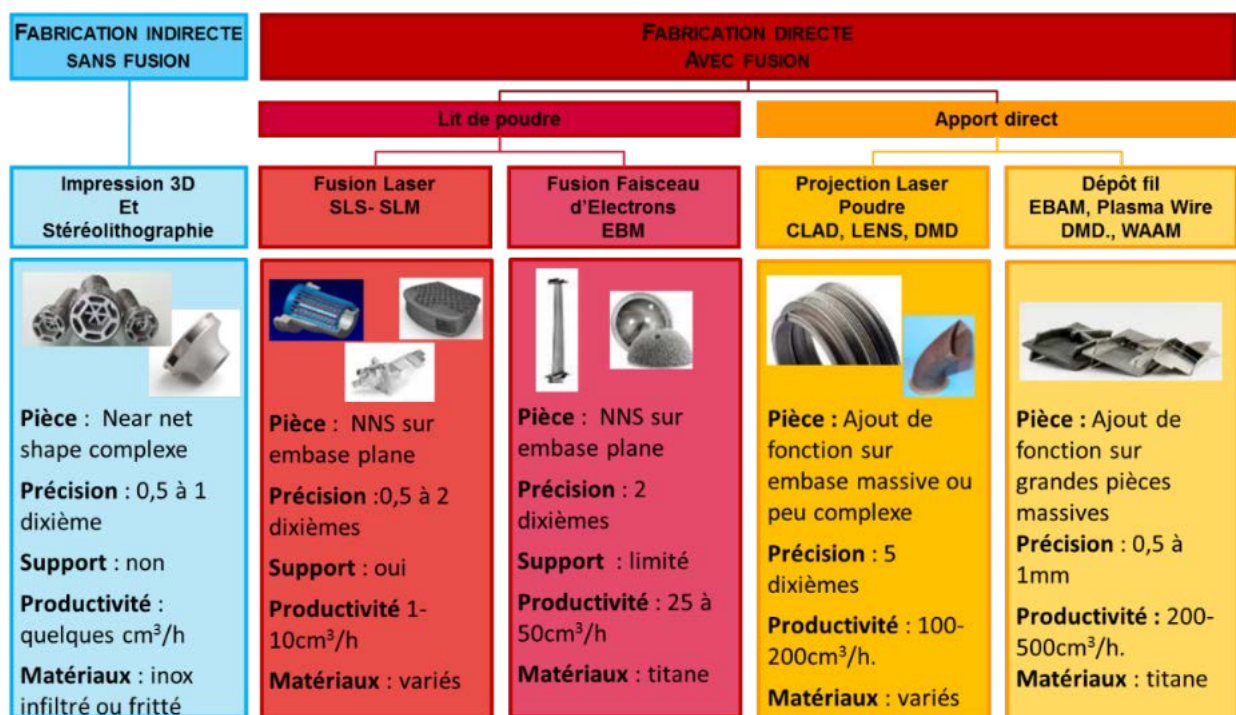


Figure 4 - Principaux procédés de fabrication additive métal<sup>15</sup>

Les différents procédés de fabrication additive se distinguent par leur plus ou moins grande aptitude à satisfaire un besoin technologique correspondant à une fonction ou une propriété attendue pour la pièce à réaliser. Le tableau suivant compare les principales caractéristiques techniques des quatre principaux types de procédés. La deuxième colonne à partir de la gauche permet de les comparer à l'impression 3D métal. Ce procédé utilise un liant pour assurer la cohésion de la pièce sans nécessiter la fusion de la poudre. Ce liant sera éliminé après frittage de la pièce. L'impression 3D métal est plus particulièrement adaptée à la fabrication de pièces de petites dimensions.

<sup>15</sup> Faisabilité technico-économique de fabrication additive de pièces de pompes. Fabrication de démonstrateurs : Inducer par DMD et Roue par EBM, Florence Doré, rapport 077365, juin 2015.

++++ : meilleur + : moins bon 0 : Impossible	Impression 3D métal sans fusion	Fusion laser lit de poudre	Fusion faisceau d'électrons lit de poudre	Projection laser	Dépôt fil
Épaisseur /largeur faisceau (plus mince)	++++	++++	+++	++	+
Épaisseur couche poudre (plus mince)	++++	++++	+++	++	+
Vitesse de construction pièce (plus élevée)	+++	+	++	+++	++++
Rugosité (plus faible)	+++++	++++	+++	++	+
Niveau de contraintes internes (plus faible)/Déformation (absence)	++++	++	++++	+	++
Complexité des formes (plus grande)	+++++	++++	+++	++	+
Capacité à réparer les pièces (plus grande)	0	0	0	+++	+++
Capacité multimatériau ou gradient de matériau (plus grande)	0	0	0	++	0
Taille des pièces (plus grande)	+	++	+	+++	++++
Pièce creuse ou structure lattice (plus adapté)	++++	++++	++	0	0

Tableau 2 - Comparaison des procédés de fabrication additive métallique (d'après Airbus Group).

Pour la rugosité, le procédé fusion laser lit de poudre est le meilleur des procédés avec fusion mais reste très médiocre :  $Ra > 20$  et  $Rt > 100$  sont classiques. En fusion laser, les contraintes sont extrêmement élevées alors qu'elles sont au contraire très faibles en faisceau d'électrons car les machines fonctionnent à haute température). Le schéma suivant situe les principaux fabricants de machines selon les technologies proposées :

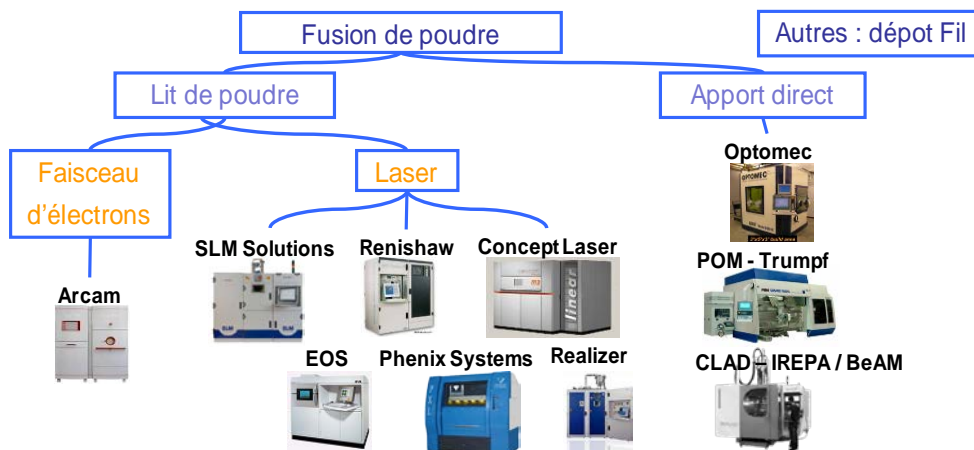


Figure 5 - Principaux procédés et principaux constructeurs de machines correspondantes

Le parachèvement et le post-traitement des pièces sont un facteur clé de succès et font partie des plus gros enjeux à court terme de la fabrication additive métallique dans la mesure où le coût relativement élevé de ces opérations représente un véritable frein à son industrialisation. Plusieurs entreprises disposent en France de ces moyens et compétences. Ces entreprises restent relativement peu armées pour répondre à des grosses commandes comme on commence à le voir de la part des grands donneurs d'ordres aéronautiques. Les gros volumes de production ne sont pas encore répandus, cela ne constitue donc pas actuellement un point bloquant.

## Aspects économiques de la fabrication additive métal

Des éléments financiers ont été évalués sur la base de **l'exemple de la fusion laser**. Le tableau suivant rassemble les principaux postes de coûts d'investissement et de fonctionnement<sup>16</sup>.

Postes	Investissement	Fonctionnement
Machines + Périphériques	500 à 1 000 k€	
Poudres : tamiseuses, chargement, aspiration & recyclage		
Post-traitement : sableuse, scie, four TTH...		
Périphériques généralement adaptés à un matériau	+ 50 k€/matériau	
CFAO dédiée	20 k€	
Optionnel, selon le besoin de conception, logiciels spécifiques: Optimisation topologique Structure lattice, etc.	20 k€	
Bâtiment Électricité puissance environ 10 kW Air comprimé, gaz neutre (selon la machine) Loyers		10 k€/an
Entretien Machine/Maintenance - Consommables (filtres, racles poudres) - Maintenance		40 k€/an
<b>Total</b>	550 à 1 100 k€	50 k€/an
Formation ou recrutement	Coût et délai importants (plusieurs personnes impliquées)	
Qualification du process	Coût et délai importants (jusqu'à 6 mois)	

Tableau 3 - Estimation des coûts de fabrication additive métallique par fusion laser de lit de poudre

### Estimation du coût de production de pièces types

Les coûts suivants sont basés sur le retour d'expérience du Cetim<sup>17</sup> en fusion laser sur lit de poudre avec une machine EOS M290. Ces coûts comparés sont ceux d'une petite pièce en titane et d'une grosse pièce en acier inoxydable. Ils comprennent trois catégories principales :

- coût machine,
- coût matière,
- coût main-d'œuvre.

<sup>16</sup> État des lieux de la Fabrication Additive, Benoit VERQUIN, Cetim, 1er Symposium Fabrication Additive, 26 novembre 2015.

<sup>17</sup> Journée technique Cetim sur la fabrication additive, Saint-Étienne, 6 novembre 2015.

Il s'agit d'une estimation en faisant l'hypothèse que le plateau de la machine est chargé au mieux pour exploiter au maximum sa capacité, c'est-à-dire en construisant simultanément le plus de pièces possibles.

Coût de production (fin 2014)		
	Petite pièce en titane	Grosse pièce en inox
Poids de la pièce	46 g	4 kg
Volume de la pièce	10 cm <sup>3</sup>	490 cm <sup>3</sup>
Nombre de pièces par plateau	18	1
Temps de fabrication	20 h	51 h
Temps de main-d'œuvre	1 h	1 h
Coût de la poudre	500 €/kg	80 €/kg
Coût du plateau	1 350 € dont 30 % pour la matière	3 230 € dont 10 % pour la matière
Coût de la pièce unitaire	75 €	3 230 €

Tableau 4 - Estimation du coût de production de deux pièces types

À ces coûts, il faut ajouter :

- En amont :
  - o conception en BE,
  - o optimisation topologique,
  - o mise en supports.
- Post-traitement :
  - o détensionnement (750 € pour six plateaux), sciage des supports (120 € par plateau),
  - o compression isostatique à chaud (optionnel) pour fermer la porosité (315 € par plateau),
  - o traitement thermique (1 200 € pour six plateaux).

On voit que, pour ce procédé, les coûts de production unitaire des pièces peuvent être très variables en fonction du matériau, de la taille et de la morphologie de la pièce. Toute comparaison de la fabrication additive avec un procédé conventionnel doit donc être effectuée au cas par cas. De même, le tableau suivant montre une forte variabilité du prix des poudres, d'une part, d'un métal à l'autre, d'autre part, entre les différentes filières d'approvisionnement pour un même métal.

	Fournisseurs de machines	Fournisseurs tiers
Acier Maraging	130 €/kg	
Inox 316L	80 €/kg	50 €/kg
AlSi10Mg	110 €/kg	35-56 €/kg
Co-Cr (Médical)	220 €/kg	
TiAl6V (Médical)	590 €/kg	303 €/kg
Inconel	135 €/kg	

Tableau 5 - Exemples de prix moyen de poudres en 2014



Ces prix datent de fin 2014 et dépendent de la granulométrie, de la présence en stock ou sur-mesure, de la variation du cours des matières premières. En particulier, plus la granulométrie sera fine, plus le prix sera élevé.

L'analyse des coûts de production montre que de nombreux facteurs sont à prendre en compte. Le coût matière n'est pas forcément discriminant et son influence dépend fortement de la valeur ajoutée de la pièce finale. Des matériaux relativement peu coûteux ne sont pas mieux placés pour être mis en œuvre par fabrication additive. Une anticipation de la baisse des coûts des poudres liées à une offre plus large ne modifiera pas, *a priori*, la hiérarchie entre les métaux.

## Comparaison avec les autres procédés

### Avantages de la fabrication additive métal par rapport aux procédés de fabrication conventionnels

Les procédés de mise en forme conventionnels des alliages métalliques sont les suivants :

- usinage par enlèvement de matière (fraisage, tournage, perçage, etc.),
- forgeage à chaud ou à mi-chaud,
- moulage,
- travail des métaux en feuilles (découpage et emboutissage sur presse, poinçonnage, découpage fin, pliage, cintrage, croquage, envirolage, etc.),
- extrusion ou filage à chaud ou à froid.

En termes de propriétés d'usage, on note que les performances en fabrication additive peuvent être supérieures aux exigences normatives des procédés conventionnels. Par exemple, sur la figure suivante, le niveau de performance de chaque procédé est indiqué par des traits noirs horizontaux qui sont confondus dans le cas de la résistance mécanique ( $R_m$ ), différents pour la limite d'élasticité  $R_{p0,2}$ , identiques seulement pour forge et corroyé pour l'allongement à la rupture  $A$ . Dans le cas présenté de pièces en superalliage Inconel 718, les caractéristiques mécaniques telles que la résistance mécanique, la limite élastique et l'allongement à la rupture obtenues en fabrication additive (barres de couleur) sont supérieures à celles obtenues en fonderie, par forgeage et par corroyage (laminage).

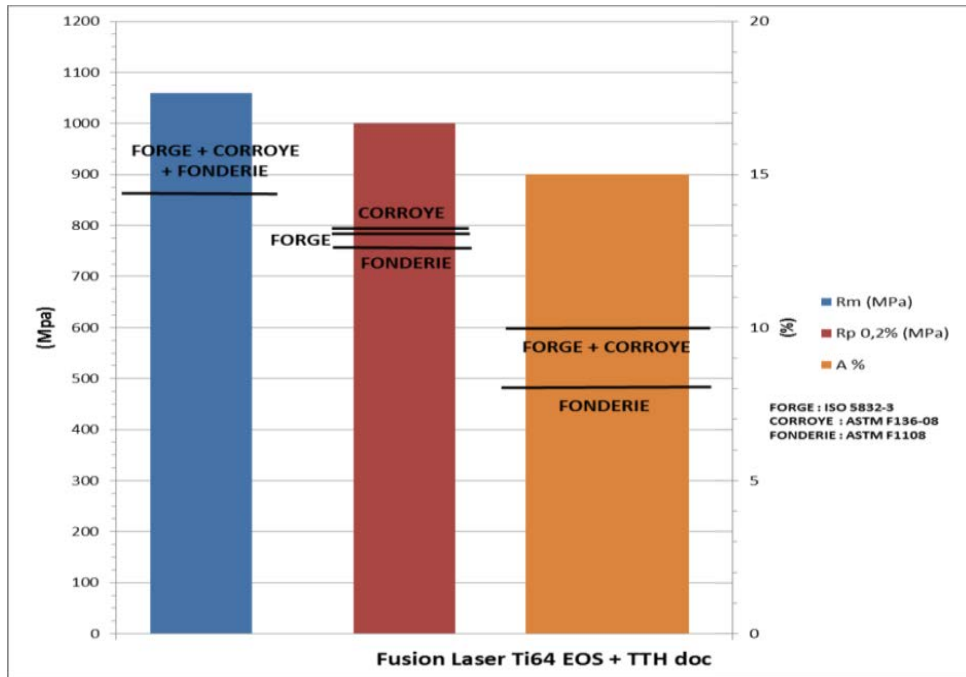


Figure 6 - Comparaison des performances obtenues en fabrication additive et par les procédés conventionnels<sup>18</sup>

Plus généralement, la fabrication additive métal directe peut donner des caractéristiques supérieures à celles de pièces moulées et approcher celles des pièces forgées.

Par ailleurs, la plupart des avantages de la fabrication additive sont génériques et s'appliquent à de nombreux couples métal/procédé :

- possibilité de produire des formes gauches sans outillage spécifique,
- réalisation d'évidements,
- allègement de pièces,
- réduction du nombre d'assemblage et par conséquent réduction du nombre de pièces nécessaires pour assurer une même fonction,
- possibilité de personnalisation,
- réalisation de texturation de surfaces,
- ajout de fonctions nouvelles,
- application à la réparation de pièces, essentiellement par dépôt sous flux dirigé et aussi sur certaines machines de fusion en lit de poudre avec plateau spécifique,
- possibilité de mieux maîtriser les paramètres de la poudre (composition chimique, granulométrie, sphéricité, etc.) que la qualité (défauts internes, inclusions) d'un brut massif à l'entrée du processus.

### Inconvénients de la fabrication additive métal par rapport aux procédés de fabrication conventionnels

Le principal inconvénient de la fabrication additive est la lenteur du procédé qui la rend inadaptée à la production grande série dans l'état actuel de la technologie. Les temps de cycle des procédés conventionnels se mesurent en minutes voire en secondes, et en heures en fabrication additive.

<sup>18</sup> Présentation « Fabrication additive : État de l'art et perspectives », 15 mai 2014, Gilles Allory, Cetim.

Un autre inconvénient majeur est que la moitié du coût de la pièce est liée à la post-fabrication et au contrôle. De ceux-ci va dépendre le développement industriel de la fabrication additive métallique [26] car plusieurs verrous doivent être levés :

- s’assurer qu’il ne reste plus de poudre dans les formes internes nécessitant un nettoyage supplémentaire, voire impossibilité de vider une cavité fermée,
- l’usinage interne et les procédés de finition sont aujourd’hui un goulot d’étranglement, car ils sont difficiles à réaliser et rallongent les processus,
- il est possible d’imprimer des tuyaux, des trous, des parois internes minces, des cavités, mais beaucoup ont besoin de supports ou d’un fini de surface très lisse,
- pour certaines fonctions (pièces hydrauliques, secteur médical), il ne faut pas que des particules puissent se détacher,
- les traitements thermiques et, quand l’option est retenue, le traitement de HIP, doivent être optimisés en relation avec les spécificités de la fabrication additive.

Par ailleurs, certains procédés conventionnels sont difficilement remplaçables par la fabrication additive. Ainsi, d’après les investigations réalisées par le Cetim pour les industriels français du découpage-emboutissage, l’emploi de ces technologies comme procédés de substitution pour la fabrication de pièces découpées ou embouties prototypes ou en petites séries n’est pas envisageable<sup>19</sup>. Si des solutions d’ajouts par fabrication additive d’éléments rapportés sur des tôles d’alliage de titane ont été étudiées dans le cadre de procédés hybrides, la forte productivité atteinte par le travail des tôles sur presse ne justifie pas une substitution complète du découpage-emboutissage par la fabrication additive<sup>20</sup>.

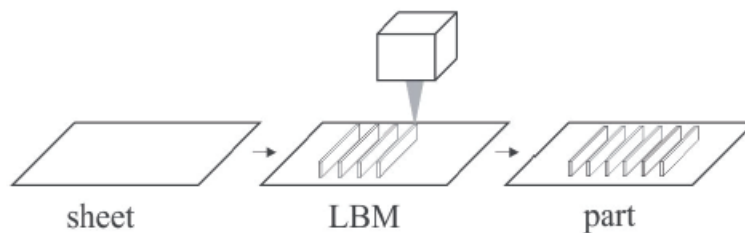


Figure 7 - Procédé hybride de fabrication additive de nervures rapportées sur une tôle métallique par fusion laser de lit de poudre

	Fabrication additive	Autres procédés
Avantages	Complexité des pièces Personnalisation Possibilité de faire des formes creuses complexes	Procédés maîtrisés Adaptés pour de la grande série Grande diversité
Inconvénients	Productivité faible Coût élevé (mais pas d’outillage) État de surface médiocre Disponibilité matériau incomplète Peu de normes Maîtrise et répétabilité imparfaite	Pour certains d’entre eux : - Coût des outillages - Géométrie « simple » - Nécessité d’assembler plusieurs composants simples
Neutre	Propriétés matériaux atteignables	

Tableau 6 - Comparaison de la fabrication additive métal aux procédés de fabrication conventionnels

<sup>19</sup> Dossier d’instruction Cetim, Fabrication additive pour commission professionnelle Découpage et Formage des Métaux en feuilles, mars 2016.

<sup>20</sup> Fabrication and Characterization of Laser Beam Melted Ti-6Al-4V Geometries on Sheet Metal, Adam Schaub, Bhrihu Ahuja1, Michael Karg, Michael Schmidt, Marion Merklein, DDMC Conference 2014, Berlin.

## Évolutions envisagées des principaux facteurs de la fabrication additive métal

L'amélioration de la productivité par l'augmentation de la vitesse de construction est le principal levier d'évolution. Il concerne l'évolution des machines et des procédés plus que l'évolution des poudres métalliques. Cette évolution des procédés devrait se concrétiser par des machines plus chères mais plus performantes. Parallèlement, le prix des poudres métal devrait baisser en raison de la forte augmentation du volume du marché. Cela s'illustrerait par une offre directe accrue des producteurs de poudres indépendants des constructeurs de machines. L'intérêt économique serait toutefois limité par les coûts de qualification de ces poudres non effectuée par les constructeurs de machines. Enfin les fabricants de machines de fusion métal en lit de poudre ont monté en cadence mais les délais sont longs pour la livraison et la mise en service en raison du manque de personnel qualifié pour le démarrage.

### **Conclusions et enseignements :**

---

- **Même si la productivité croît et que les coûts d'approvisionnement matière baissent, la fabrication additive ne trouve sa place à ce jour que sur quelques rares composants à très forte valeur ajoutée, difficilement voire impossible à réaliser autrement. La fabrication additive métallique ne semble pas devoir concurrencer frontalement la mécanique traditionnelle à court ou à moyen terme. Les difficultés rencontrées, les diverses limitations techniques et les coûts de production ne font pas croire à une révolution industrielle extrêmement rapide telle que présentée régulièrement dans les médias ou par certains acteurs.**
  - **Il faut pour l'heure savoir choisir avec discernement le type de pièces éligibles à la fabrication additive, en général les optimiser pour ces procédés et valider le modèle économique sur toute la chaîne de valeur (ce qui inclut la reprise des pièces, le traitement thermique...). Le choix de l'intégration de moyens coûteux en évolution rapide ou de la sous-traitance doit également être réfléchi.**
- 

## Description de l'évolution de la *supply chain*

### **Place du métal par rapport aux autres catégories de matériaux**

Les principaux fournisseurs de poudres métalliques pour la fabrication additive sont également producteurs de poudres destinées à d'autres applications métallurgiques.

Les producteurs de poudre métal conventionnelle destinée à la métallurgie de poudres en général notent actuellement une augmentation de la production de poudre dédiée à la fabrication additive mais celle-ci reste très marginale.

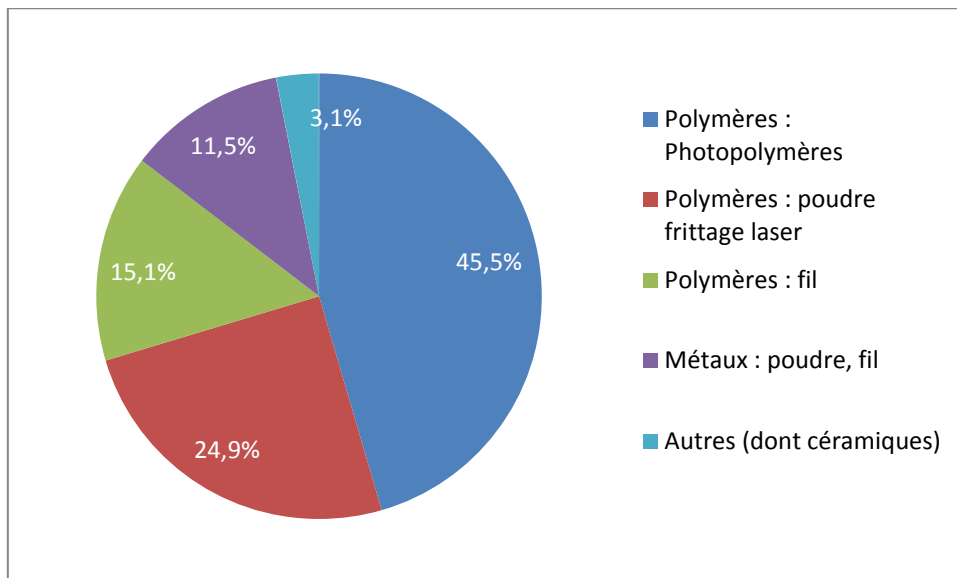


Figure 7 – Répartition en valeur des matériaux mis en œuvre par fabrication additive en 2015 (source Wohlers 2016)

Selon les chiffres moyens de quatre sources (Wohlers Associates, la plateforme européenne AM, Roland Berger et Lux Research), le métal représenterait 10 à 20 % de l'ensemble des matériaux mis en œuvre par fabrication additive, soit :

- 340 M€ de marché mondial en 2013 (environ 30 % pièces, 40 % équipement, 30 % matière), soit 102 M€ pour la matière, comprenant les poudres (toutes filières d'atomisation), et les fils,
- 1 360 M€ de marché mondial en 2023 (50 % pièces, 30 % équipement, 20 % matière), soit 272 M€ pour la matière.

Le marché français est estimé à environ un vingtième de la mécanique mondiale en général. En prenant cette hypothèse, on arrive à 17 M€ de marché français « métal » en 2013 et 65 M€ en 2023.

La filière industrielle « poudres » fournit les matières premières des différents procédés de métallurgie des poudres : outils carburent, revêtements anti-usure, projection thermique, moulage par injection de métal (*Metal Injection Moulding* ou MIM), compactage isostatique à chaud (*Hot Isostatic Pressing* ou HIP). Pour l'Europe, d'après l'*European Powder Metallurgy Association* (EPMA), la part de poudres métalliques destinées à la fabrication additive n'est pas clairement identifiée mais d'après un fournisseur majeur du marché mondial des poudres métalliques, sa part serait actuellement inférieure à 1 % du total, soit de l'ordre du millier de tonnes.

D'après la direction du groupe Höganäs<sup>21</sup>, producteur suédois de poudres métalliques destinées à la métallurgie des poudres principalement pour la fabrication de pièces de petites dimensions pour l'industrie automobile, sur une production de 500 000 tonnes/an de poudres, seuls quelques pourcents sont destinés à la fabrication additive. Les métaux produits sont des aciers fortement alliés, des aciers inox 316, 410 et 420, 17-4 PH, et des superalliages base nickel Inconel 625. En fabrication additive, Höganäs emploie 20 personnes en R & D, et 10 en production sur un total de 1 800 pour le groupe. Ce producteur est globalement optimiste sur le développement futur de la fabrication additive : « on est au début de la technologie, la division poudre pour la fabrication additive a démarré en 2010 pour la R & D puis en production de poudres en 2015, il y aura sans doute des hauts et des bas. En tant que producteur de poudres, le principal frein évoqué est la maîtrise de la granulométrie lors de l'atomisation qui en limite le rendement<sup>22</sup> ».

<sup>21</sup> Entretien.

<sup>22</sup> [https://www.hoganas.com/globalassets/media/sharepoint-documents/BrochuresanddatasheetsAllDocuments/PowdersforAdditiveManufacturing\\_Sept\\_2015\\_1111HOG.pdf](https://www.hoganas.com/globalassets/media/sharepoint-documents/BrochuresanddatasheetsAllDocuments/PowdersforAdditiveManufacturing_Sept_2015_1111HOG.pdf)

## Marché des poudres métalliques

Quelques données concernant le marché mondial des applications industrielles des poudres pour fabrication additive (métal, plastique, céramique) pour les principaux secteurs : l'aéronautique, la défense, le médical et dentaire, l'automobile et autres ont pu être collectées.

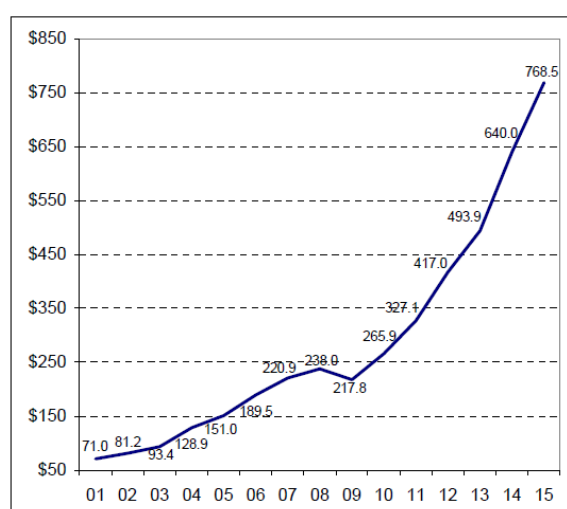
En 2014, le marché mondial a atteint 640 M\$ pour l'ensemble des matériaux comprenant polymères, métaux et céramiques, sous forme de poudres, fils et additifs, destinés à l'industrie et aux applications grand public.

En 2015, le marché mondial des matériaux utilisés en fabrication additive a atteint 768,5 M\$. Pour l'industrie seulement il est estimé à 512 M\$, dont 45 % de métal, 30 % de polymères et 25 % de céramiques, soit 230 M\$ pour la partie métal.

Prévision pour 2020 : 637 M\$ (+ 24,4 %) sont estimés pour les poudres destinées à l'industrie. Parmi elles, les poudres métalliques pour la fabrication additive, sans que l'on puisse préciser leur pourcentage, auraient la plus forte croissance, donc celles-ci seraient supérieures à la moyenne de 24,4 % tous matériaux confondus.

Source	Wohlers				Marketsandmarkets		BCC Research			IndustryArc
Année	Métaux (M\$)	Croissance	Total tous matériaux (M\$)	Croissance	Total (M\$)	Polymères	Total tous matériaux (M\$)	Métal+céramique	Photo-polymères	Total (M\$)
2012	24,9		417			183				
2013	32,6	+ 30,9 %	493,9	+ 18,4 %			245			
2014	48,7	+ 46,6 %	640	+ 29,5 %			285	18,4	189,2	873,7
2015	88,1	+ 80,9 %	768,5	+ 20 %						
2016					530,1					
2018					868	589,2				
2019							650	76,9	380,5	
2020										1 052
2021					1 409,5					

Tableau 7- Estimation et prévision du volume du marché mondial du matériau « poudres métalliques » en M\$



Source: Wohlers Associates, Inc.

Figure 8 - Évolution de la demande en matériaux pour fabrication additive (source Wohlers 2016)

D'après l'étude Smartech 2016<sup>23</sup>, cette demande a été estimée à environ 600 tonnes tous métaux confondus en 2015 et devrait atteindre 900 tonnes en 2016. L'aéronautique serait le principal secteur utilisateur en volume avec environ 200 tonnes en 2015 et continuerait à l'être jusqu'en 2023. Le deuxième secteur utilisateur serait celui du médical/dentaire, mais celui-ci serait à terme progressivement rattrapé par d'autres secteurs.

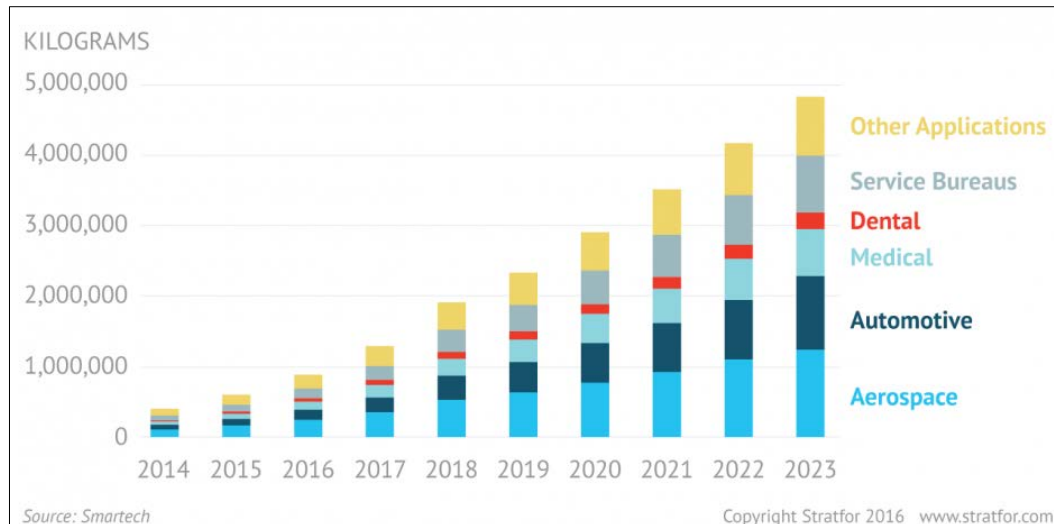


Figure 9 – Demande de poudre métal pour fabrication additive et prévisions 2016-2023

### Production de poudres métal

Le procédé dominant de fabrication des poudres pour la métallurgie et des poudres en général est l'atomisation à l'eau. Les poudres pour fabrication additive sont produites par atomisation au gaz en même temps que des poudres de granulométrie différentes destinées à d'autres applications de métallurgie des poudres. Le recueil de données chiffrées rencontre deux niveaux de difficultés :

- dans le *process* d'atomisation, la part utilisable en fabrication additive est difficile à mesurer car la répartition de la granulométrie suit une loi statistique ;
- avec la montée en puissance de la fabrication additive, la production de poudres est l'objet d'une forte concurrence entre les producteurs qui anticipent une croissance des volumes mais ne veulent pas dévoiler leurs projets.

Les procédés de mise en œuvre de la poudre présentent des niveaux d'exigence différents. Ainsi, les procédés en lit de poudre demandent une qualité de poudre supérieure aux procédés avec apport direct. Les facteurs qualitatifs pris en compte sont les suivants :

- granulométrie,
- sphéricité,
- fluidité de la poudre (coulabilité),
- composition chimique,
- Autres paramètres secondaires : critère morphologique, présence de satellite, de particules creuses...

### Développements en cours

<sup>23</sup> <https://www.stratfor.com/analysis/adding-new-layers-3-d-printing>

Les fabricants de machines ont fait récemment des développements pour compenser les défauts de la poudre. Du côté des utilisateurs finaux comme le motoriste aéronautique Safran, Safran Additive Manufacturing a établi une *roadmap* pour le développement des poudres métalliques<sup>24</sup>.

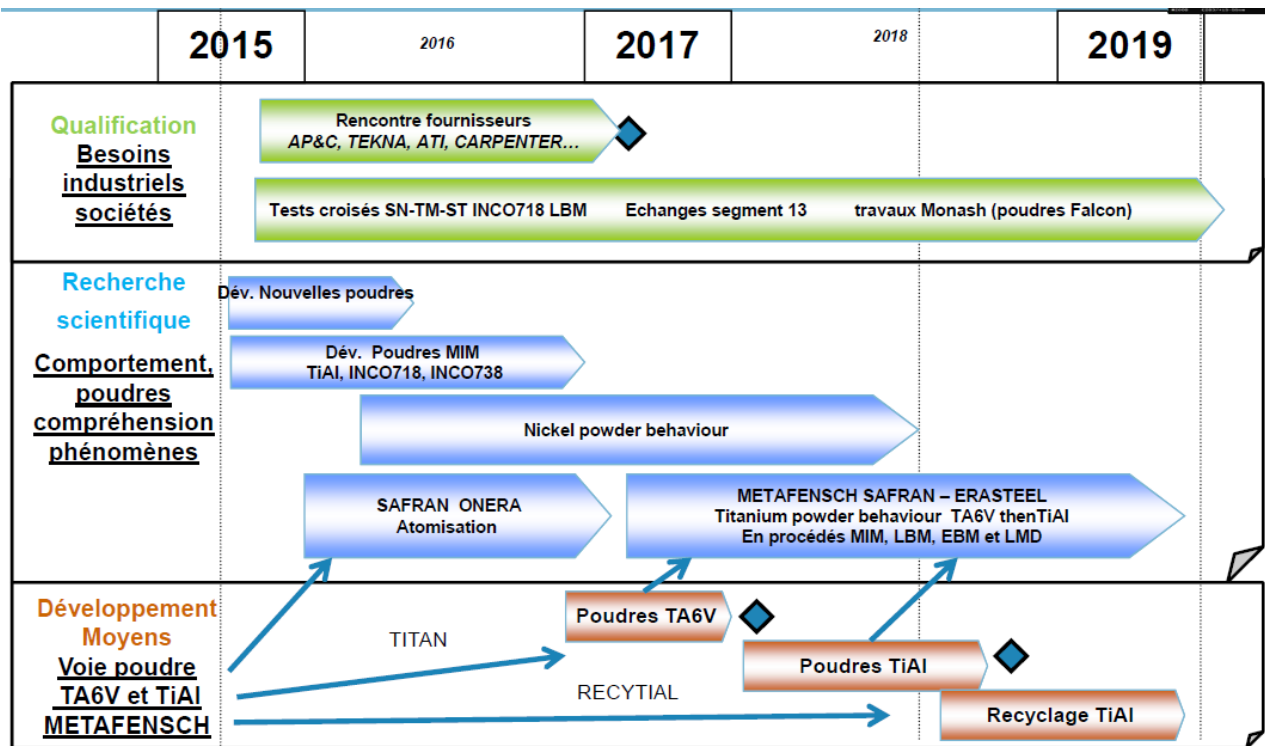


Figure 10 – Roadmap « Poudres » de Safran Additive Manufacturing

Les facteurs clés de ce développement sont :

- la robustesse de l’approvisionnement pour chacun des métaux (titane, bases nickel, bases fer, alliages chrome-cobalt et aluminium),
- la définition de cahier des charges sur les poudres permettant d’assurer une répétabilité et une maîtrise des propriétés des pièces produites,
- L’élaboration de nouveaux matériaux, notamment de matériaux à gradient de composition,
- Dans une moindre mesure, la mise au point de marqueurs pour éviter les copies pirates.

Cette *roadmap* prend en compte des développements scientifiques concernant les principales familles de poudres métalliques qui sont abordées successivement, d’abord les alliages base nickel Inconel, puis l’élaboration de poudre de titane et d’aluminure de titane (TiAl) en s’appuyant sur les moyens d’atomisation de poudres de l’Agence nationale d’études et de recherches aérospaciales (Onera) et ensuite avec le développement du GIP Metafensch, disposant de moyens d’atomisation de poudre et de recyclage.

Le tableau suivant rassemble une liste non exhaustive de producteurs de poudres métalliques utilisables en fabrication additive. La plupart d’entre eux proposent des poudres dans les différentes familles d’alliages métalliques, y compris d’aluminium. **D’après les consultations réalisées, la plupart des producteurs ont privilégié initialement un marché final particulier et ont ensuite enrichi leur catalogue.** Les augmentations de capacités envisagées sont mentionnées.

<sup>24</sup> 3D manufacturing in Safran: managing a disruptive technology, Thierry Thomas, Vice president Safran Additive Manufacturing, 2015.



Société	Pays	Augmentation de capacité	Base Fer	Alliages Ni	Alliages Cr-Co	Alliages Ti	Offre FA	Poudre sphérique fine (pour SLM, etc.)	+grosses (pour DMD)	Site Internet	Remarques
Allegheny Technologies Inc. (ATI)	États-Unis	x	X	x	X	x	x				Augmentation capacités +70 M\$ 2015-2017
AMA *	États-Unis		X	x		x	x	x	x	<a href="http://additivemetalloy.com">http://additivemetalloy.com</a>	
AP&C Revêtements et Poudres Avancées Inc	Canada			x	X	x	x			<a href="http://advancedpowders.com/fr/">http://advancedpowders.com/fr/</a>	Filiale d'Arcam (SE) 500 t/an
Carpenter Powder Products	USA		X	x		x	x			<a href="http://www.carttech.com">www.carttech.com</a>	
HC Starck	Allemagne		X	x		x	x		x	<a href="http://www.hcstarck.com">www.hcstarck.com</a>	AMPERSINT
Hoeganaes	États-Unis		X			x	x	x		<a href="http://www.hoeganaes.com">www.hoeganaes.com</a>	en démarrage
LPW *	Royaume-Uni		X	x		x	x	x		<a href="http://www.lpwtechnology.com">www.lpwtechnology.com</a>	développement de sa propre production en cours
Metafensch (GIP)	France					x				-	Inauguration en novembre 2014 Projet Titan : atomisation poudre titane
Aubert & Duval – ERASTEEL (groupe ERAMET)	Espagne		X	x	X	x	x			<a href="http://www.aubertduval.com">www.aubertduval.com</a> <a href="http://www.ERASTEEL.com">www.ERASTEEL.com</a>	Offre standard Pearl® Micro for Additive Manufacturing  Nouveaux développements:  Titane : Projet Titan avec Metafensch Augmentation de la capacité de production. Nouvel investissement en cours en Auvergne.
NMD *	Allemagne		X	x			x			<a href="http://www.nmd-gmbh.de/en">www.nmd-gmbh.de/en</a>	
Oerlikon Metco	Suisse	x		x			x			<a href="http://www.oerlikon.com/metco">www.oerlikon.com/metco</a>	<a href="http://www.oerlikon.com/metco/en/media/press-releases-detail/13853/">http://www.oerlikon.com/metco/en/media/press-releases-detail/13853/</a>
Powder Alloy Corporation (PAC) *	États-Unis		X	x	X		x		x	<a href="http://www.powderalloy.com">www.powderalloy.com</a>	<a href="http://powderalloy.com/products/additive-manufacturing3d-powders/">http://powderalloy.com/products/additive-manufacturing3d-powders/</a>
Praxair Surface Technologies	États-Unis	x (2015)			x	x					
Sandvik Osprey	Royaume-Uni		X	x	X		x	x		<a href="http://www.smt.sandvik.com/osprey">www.smt.sandvik.com/osprey</a>	
Tekna	France					x (Ti64)					

(\*)Distributeurs

**Tableau 8 – Principaux fournisseurs de poudres métalliques (source Cetim)**

La capacité de production de poudres est présente mais n'est pas encore adaptée à la fabrication additive. La faible capacité des rares acteurs à tous les niveaux de la *supply chain* pourrait freiner le développement de la filière mais cela devrait s'estomper avec les économies d'échelles apportées par l'augmentation des volumes et du nombre d'acteurs.

Les perspectives d'offres évoluent rapidement car plusieurs producteurs ont annoncé des investissements : ainsi en septembre 2015, Alcoa a investi 60 M\$ à Pittsburgh (États-Unis), dans un nouveau centre de recherche technologique sur l'impression 3D métal des alliages d'aluminium mais aussi de titane et de nickel, destinés à la construction aéronautique. Arcam a annoncé que sa filiale AP&C construira trois nouvelles tours d'atomisation de poudre métal portant la production totale à 500 t/an, essentiellement des poudres de titane. En France, les lancements de Metafensch (Institut de Métallurgie du Val de Fensch, ou Groupement d'Intérêt Public de revitalisation de la vallée de la Fensch) vont augmenter l'offre, notamment en titane de qualité aéronautique. Par ailleurs Aubert & Duval ERASTEEL investira 15 M€ dans une tour d'atomisation à l'usine des Ancizes-Comps

dans le Puy-de-Dôme, pour la production de poudre d'alliages base nickel N18, opérationnelle en 2017, ce qui triplera la capacité de production<sup>25</sup>. Par ailleurs la société Metalvalue, encore au stade de projet, a pour objectif de produire de la poudre d'aciers dont une partie serait destinée à la fabrication additive. Le projet Metalvalue a été monté initialement en partenariat avec MetaFensch et le groupe sidérurgique Ascometal. Metalvalue a pour objectif de produire des poudres pour les procédés MMS Scanpack®, HIP, MIM dont une partie pour la fabrication additive ou l'impression 3D. La montée en puissance serait progressive à partir de 2018 sur plusieurs années avec pleine production en 2023<sup>26</sup>.

Étant donné que la fabrication additive permet de déposer de la matière uniquement où on en a besoin, la réduction des pertes matières et donc des coûts est plus facile à démontrer sur des matériaux chers. Par ailleurs, les alliages de cuivre, d'aluminium et les matériaux précieux sont intéressants et vont être amenés à se développer, pour des enjeux en termes de marché vraisemblablement moindre.

## Recherche en Europe sur les poudres métalliques

Le développement de poudres métalliques adaptées à la fabrication additive est un axe fort pour les acteurs de la métallurgie des poudres. Au niveau européen, l'EPMA a établi l'inventaire de **53 centres de R & D en Europe en fabrication additive métal**.

- **Position de la France**

En France, d'après une récente étude sur la fabrication additive en France pour l'Alliance Industrie du Futur<sup>27</sup>, la quasi-totalité des 25 laboratoires de recherche interrogés, universitaires ou centres techniques, travaillent sur les métaux, soit plus que sur les polymères et les céramiques. Les acteurs français de la recherche en fabrication additive seraient ainsi plus nombreux que ceux identifiés par l'EPMA car certains traitent aussi les autres modes d'apport de matière que sous forme de poudres.

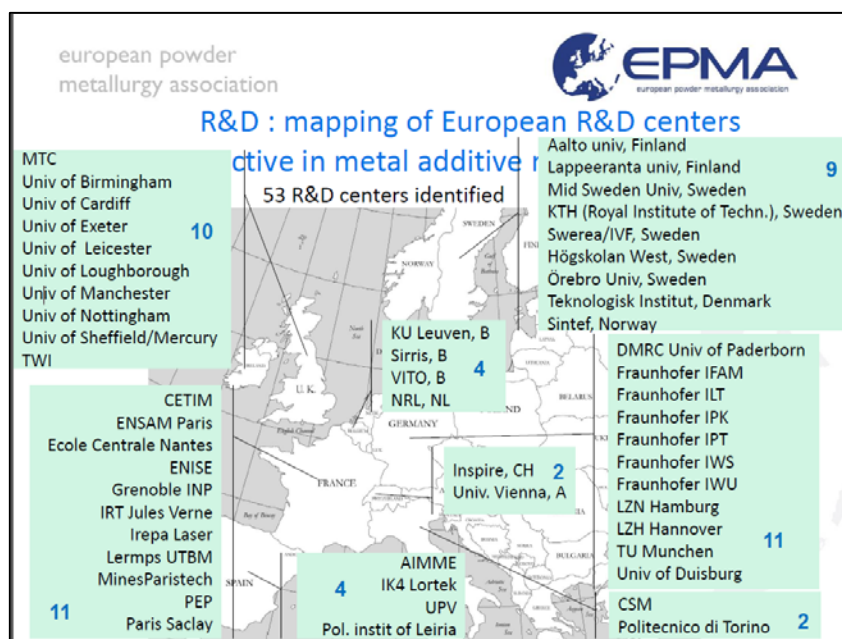


Figure 11 - Centres de R & D en Europe en fabrication additive métal (2015)<sup>28</sup>

<sup>25</sup> Aubert et Duval dans le sillage du Rafale, Usine Nouvelle, février 2016.

<sup>26</sup> Entretien téléphonique du 6 juillet 2016.

<sup>27</sup> La Fabrication Additive en France: cartographie des acteurs, Philippe Lubineau, Institut Carnot Cetim, Journée AIF du 24/06/2016.

<sup>28</sup> Adeline Riou, ERASTEEL, « EAMG current and future activities: Education, Promotion & Networking », Reims, octobre 2015.

## Conclusions et enseignements :

- Les poudres métalliques destinées à la fabrication additive constituent actuellement un très faible pourcentage du tonnage total des poudres métalliques industrielles. À l'horizon 2020, ces poudres connaîtraient la plus forte croissance.
- En France, la filière poudre devrait connaître des développements notables, concrétisés par la mise en service de nouvelles unités de production. Les producteurs de poudres commercialisées en France sont essentiellement étrangers pour la plupart mais il existe deux acteurs français reconnus Aubert & Duval et ERASTEEL et d'autres acteurs français, qui vont développer leur activité comme Metafensch et Metalvalue.

## Évaluation du niveau de maturité de l'utilisation des métaux en fabrication additive

Une enquête a été conduite par le Cetim en 2014 sur le niveau de maturité technologique (TRL, *Technology Readiness Level*) des procédés de fabrication additive en fonction des marchés finaux et par conséquent sur le niveau de maturité des métaux mis en œuvre au regard des marchés visés.

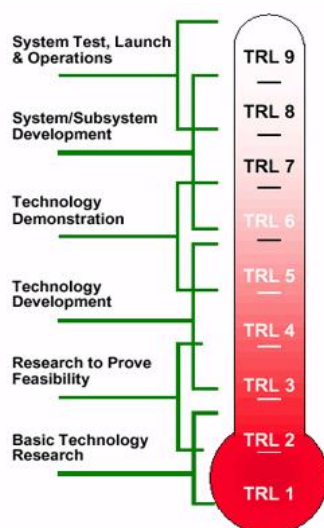


Figure 12 – Échelle des TRL.

Pour rappel, quelques jalons :

- Le niveau 1 correspond au plus bas niveau de maturité technologique. La recherche scientifique commence à se traduire en recherche appliquée et développement.
- Le niveau 6 : Le modèle ou le système prototype représentatif est testé dans un environnement significatif.
- Le niveau 9 correspond au niveau de maturité le plus élevé : Application réelle de la technologie sous sa forme finale et en conditions de mission, semblables à celles rencontrées lors de tests opérationnels et d'évaluation

Les niveaux de maturité technologique ont été estimés comme suit :

### Matériaux

- Superalliages, titane, aciers bases chrome-cobalt et nickel : bien maîtrisé, TRL 7-9, des pièces ont été produites
- Aciers inoxydables : TRL 7-8
- Acier *maraging* : TRL 9
- Acier au carbone (type 42CrMo4) : TRL 4-5
- Aluminium : TRL 7-8 (même si certaines nuances sont impossibles, des pièces ont été produites)

### Procédés les plus utilisés

- SLM (fusion de poudre par laser) : TRL 7
- EBM (fusion de poudre par faisceau d'électrons) : TRL 7
- FDM (dépôt de fils fondus) : TRL 6
- DED-CLAD (projection de poudre) : TRL 6

### Quelques remarques générales :

- SLM, SLS, EBM : ces procédés rencontrent des limites dimensionnelles et de productivité ;
- DMD, FDM : ces procédés rencontrent des limites de granulométrie et d'état de surface ;
- Dans tous les cas, il y a une forte incidence des technologies sur l'intégrité mécanique des pièces.

**Niveau de maturité par marché :** ce point est important car une technologie peut être relativement mature sur le plan technique mais présenter un degré de pénétration faible selon les marchés d'application.

	Marché	TRL
Filière aéronautique	Aérostructures	3-5
	Motoristes	7-9
	Équipementiers	4-9
Filière automobile		4
Filière énergie	Turbines	6
Filière médicale	Dentaire	10
	Orthopédie et implants	9
	Ancillaires	9

Tableau 9 – Niveau de maturité de la fabrication additive par marché (estimations 2014 réactualisées en 2016)

Une étude en 2015 de l'EPMA et du cabinet Roland Berger corrobore ces évaluations avec toutefois une progression du niveau de maturité de l'automobile, sans doute perçue comme moins dépendante de la production en grande série, à la faveur de la tendance à la personnalisation des produits.

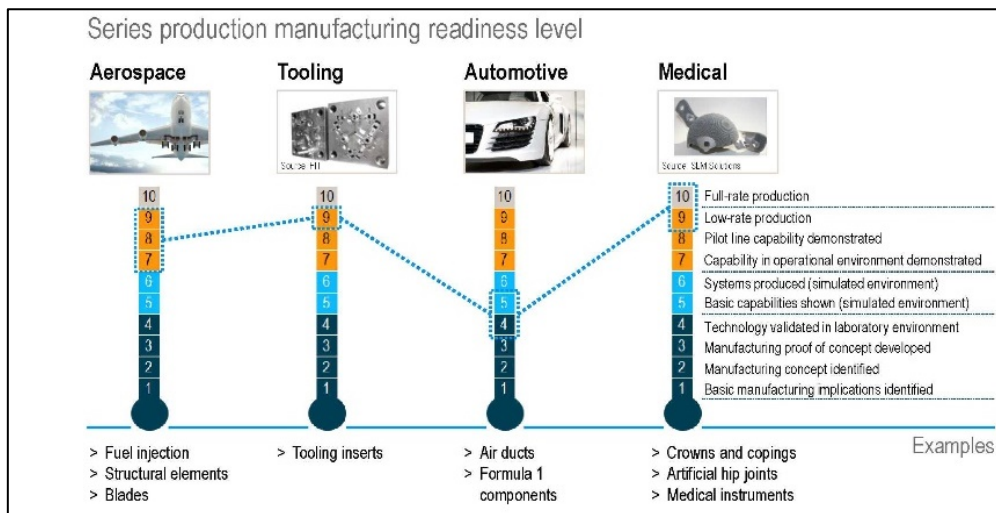


Figure 13 - Niveau de maturité de la technologie (TRL) par marchés pour la production en série (source EPMA-Roland Berger, 2015) [7].

### Alliages métalliques existants et à venir

Le tableau suivant résume l’inventaire réalisé par le Cetim concernant l’offre en poudre métal destinée à la fabrication additive<sup>29</sup>. Les alliages base fer et les alliages base nickel seraient les plus matures, suivis par les alliages de titane et les alliages base cobalt. Les bases fer sont particulièrement présentes en raison de leur poids dans les applications industrielles. *A contrario*, la faible offre en alliages d’aluminium confirme le positionnement de l’aluminium sur cette technologie, limité aux alliages de fonderie (cf. volet 7). Certains alliages ou certaines familles d’alliages, au niveau des nuances identifiées, ne sont produits que par un nombre limité de fournisseurs. Leur niveau de maturité est sans doute plus élevé que leur diffusion car ils visent un secteur de niche où le volume de la demande à terme ne sera sans doute pas très important, même en cas de plein succès de la fabrication additive. Il est en particulier difficile de comparer le titane, dont la production de poudres nécessite des équipements coûteux, aux autres métaux.

<sup>29</sup> Matériaux disponibles en fabrication additive, version 2, Paul Calves, Cetim, avril 2016.

Catégories d'alliages	Nbre producteurs poudre	Sous-catégories	Nbre producteurs poudre	Nuances	Nbre producteurs poudre	Niveau de maturité
<b>Bases Fer</b>	11					Moyen
		Aciers	5			
				42CrMo4	5	
				20NiCrMo2	2	
				41NiCrMo7-3-2 (4340)	2	
		Aciers à outils	7			Rares applications
				<i>Maraging</i> 300	6	Fort
				X40CrMoV5 (H13)	5	
				X153CrMoV12 (D2)	3	Faible
		Aciers inox	11			Fort
				304L	8	Fort
				316L	11	Fort
				17-4PH	9	Fort
				15-5PH	4	
				430L	4	
				440	4	
				420	3	Faible
<b>Base Nickel</b>	11					Fort
				Inconel 718, 625	11	Fort
				Hastelloy X, C272	5	Moyen
				Autres	4	
<b>Titane</b>	8					Fort
				TiAl6V4 et TiAl6V4 ELI	5	
				Titane commercial pur	4	
<b>Base Cobalt</b>	6					Fort
<b>Cuivreux</b>	5					Inexistant
<b>Aluminium</b>	4					
				AlSi12, AlSi10Mg	4	Moyen
				7050, 7075, 6061	2	Inexistant

Tableau 10 - Offre en poudre métal destinée à la fabrication additive

#### Conclusions et enseignements :

- Les niveaux de maturité de la fabrication additive sont variables que ce soit du point de vue des procédés, des alliages sous forme de poudres métalliques poudre métallique ou des secteurs d'application finaux.
- Le titane en fusion en lit de poudre pour le médical est particulièrement mature.
- À l'opposé, le secteur automobile, en raison de ses contraintes de coûts et son mode de production, est plutôt en retard.

## Freins à lever pour le développement de la fabrication additive métallique

La fabrication additive métal rencontre plusieurs freins à son développement. Certains sont communs aux autres matériaux, comme le manque de compétences en reconception de pièces dédiées à la fabrication additive, d'autres sont plus spécifiques comme le besoin de post-traitements.

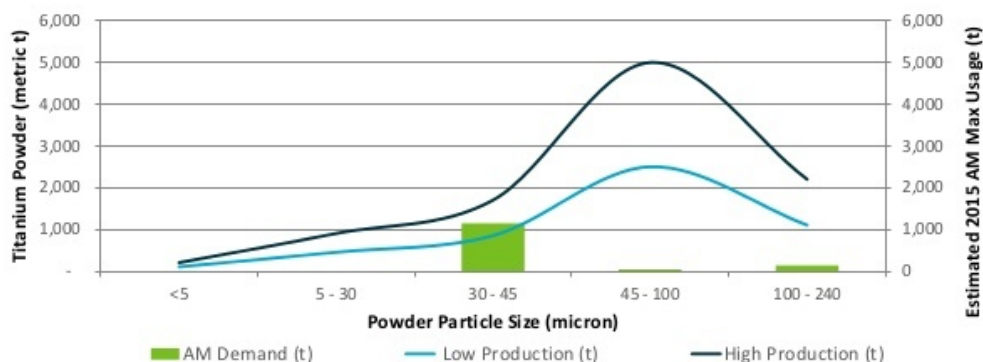
### Caractérisation des poudres et qualité des poudres produites

En amont des procédés de fabrication additive, un travail important sur la maîtrise des poudres est à réaliser afin de fiabiliser les sources d'approvisionnement de poudres « classiques » mais également de développer de nouvelles générations de poudres permettant d'envisager des composants nanostructurés, nanocomposites ou intégrant des fonctions directement apportées par la nature des poudres. En ce qui concerne les poudres dont la maîtrise constitue un aspect stratégique de ces procédés, il existe en France une certaine capacité technologique d'élaboration. L'Onera s'est doté d'une tour d'atomisation permettant de produire de l'ordre d'une vingtaine de kilogrammes. L'UTBM-LERMPS (université de technologie de Belfort-Montbéliard) possède également un moyen d'élaboration au même type d'échelle. L'École nationale d'ingénieurs de Saint-Étienne (Énise) possède un moyen de sphéroïdisation de poudre (machine Tekna). ERAMETERASTEEL pour les aciers et d'Aubert & Duval pour les superalliages possède des moyens de production industriels et se développe sur les poudres d'alliages de titane.

Du fait de la répartition statistique de la granulométrie de la poudre produite par atomisation au gaz, une discordance apparaît entre la demande en poudre pour la fabrication additive et la production de poudre réalisée. La figure suivante illustre cette différence de répartition dans le cas de l'alliage de titane TA6V.

### Ti-6Al-4V Powder Demand (AM) vs. Capacity

Gas atomisation produces a supply-demand imbalance



Source: Barnes, J.E. & Kingsbury, A.B.

Figure 14: L'atomisation au gaz de poudre de titane ne correspond pas à la demande en fabrication additive

### Parachèvement et post-traitements des pièces métal

Après la fabrication additive, le produit n'est pas terminé ni prêt à l'emploi, il reste le nettoyage, l'enlèvement des supports, le sablage, un usinage, le traitement thermique, sinon encore d'autres finitions ultérieures... la plateforme européenne AM mentionne quatre challenges à relever : post-traitement, finition, qualité de surface et finition de surface améliorée.

Les post-traitements restent un passage obligé dans la chaîne de valeur de la fabrication additive : nettoyage, enlèvement des supports, sablage, usinage, enlèvement des particules infondues, traitement thermique, et encore d'autres finitions ultérieures. L'état de surface est dégradé par rapport aux procédés conventionnels : profil aérodynamique (Ra entre 5 et 15), risque particulière (intégrité matière), etc. L'amélioration de la rugosité est nécessaire pour répondre au besoin hydraulique, aérodynamique et tribologique des pièces. Diverses voies électrochimiques et chimiques permettent

d'améliorer les états de surface. Il est de plus possible de piloter les propriétés et d'atteindre des performances en fatigue relativement élevées en adaptant le traitement thermique.

Quelques procédés sont particulièrement bien adaptés au parachèvement de pièces de fabrication additive métal.

La **smuritropie** consiste à fixer les pièces à la cuve de traitement par une armature ou des axes eux-mêmes mis en rotation ; dans ce cas, seul le mélange abrasif est en mouvement dans la cuve. Ce procédé permet d'éviter les chocs des pièces entre elles, parfois leur endommagement.

Le **procédé MMP** de la société BestinClass permet de filtrer de manière sélective la rugosité de surface. La finition recherchée est obtenue seulement sur les parties de la pièce nécessitant l'état de surface recherché. Le procédé permet d'atteindre une rugosité de Ra inférieur à 0,05 micron.



Figure 15- Après fabrication additive, une pièce nécessite des étapes de finition (Source : SNECMA)

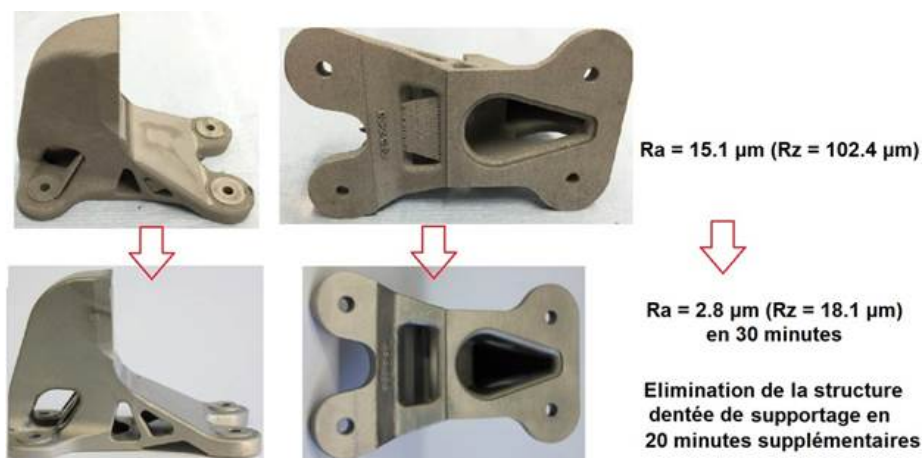


Figure 16- Polissage électrochimique d'une pièce en TA6V permettant l'élimination simultanée de la rugosité et de la structure d'appui (pièce dentelée dans l'orifice du milieu, photo en haut à droite) (Source: Airbus Munich)

## Recyclage de la poudre pour les procédés sur lit de poudre

Dans les procédés lit de poudre, la majeure partie de la charge de poudre introduite dans la machine n'est pas utilisée pour les pièces produites mais doit être enlevée par nettoyage, souvent par aspiration. Il est possible de réutiliser la poudre non transformée mais celle-ci ne peut être considérée comme neuve. Pour certains procédés, la poudre déposée avant transformation peut être un mélange présentant un certain pourcentage de poudre neuve combiné avec un certain pourcentage de poudre « recyclée ».



## Bilan énergétique

La fabrication additive serait, dans certains cas très favorables, un procédé plus rapide que l'usinage classique. Une étude comparative de l'Irepa-Laser a montré que pour la réalisation d'une hélice à trois pales, le temps total de travail sur la pièce (rechargement + usinage) est de 45 minutes avec un procédé type DED<sup>30</sup> alors qu'elle est de 3,5 heures en utilisant seulement l'usinage classique. Le fait d'avoir un temps d'utilisation des machines quasi 5 fois inférieur avec la fabrication additive permet donc un gain énergétique<sup>31</sup>. Ce bon positionnement de la fabrication additive au sens strict ne doit pas faire oublier de considérer le bilan énergétique global, de la matière première à la pièce finale. En amont, l'élaboration de la poudre nécessite une consommation d'énergie sur laquelle on dispose de peu de données. Des études précises seraient nécessaires pour quantifier ce poste : outre l'énergie d'atomisation, le coût énergétique de production du gaz d'atomisation serait à prendre en compte, etc. Néanmoins le bilan énergétique de la fabrication additive métallique est sans doute favorable si on le compare à ceux des procédés à hautes températures que sont la fonderie et la forge. Dans ces deux procédés, il faut chauffer considérablement la charge jusqu'à sa fusion dans un cas et pour obtenir une déformation plastique suffisante dans l'autre. De même pour l'usinage : dans ce cas, l'énergie utilisée pour élaborer le brut d'usinage est perdue à proportion de la quantité de copeaux produits, jusqu'à 95 % de la masse du brut dans les cas extrêmes d'usinages complexes. Le tableau donne quelques cas de consommation énergétique spécifiques en fabrication additive métallique.

Procédés	Machines	Métaux	CES (kWh/kg)	Nbre de pièces*	Références
<i>Selective laser melting</i>	MTT SLM 250	Poudre métallique acier inox 316L	31	6	[29]
<i>Electron beam melting</i>	Arcam A1	Poudre métallique Ti-Al-4V	17	5	[29]

Tableau 11 : Exemples de consommation d'énergie spécifique en fabrication additive métallique [28]

## Maîtrise des matériaux et des procédés

Comme il s'agit d'une technologie assez récente, il existe en fabrication additive un réel besoin de recherche amont, en particulier pour comprendre et caractériser la métallurgie issue de ces procédés, comprendre l'influence des défauts sur les propriétés, et développer les outils appropriés de contrôle non destructif et d'assurance-qualité. La maîtrise de l'ALM nécessite également de développer les moyens de pilotage des différentes étapes clés avec la mise en place de systèmes de diagnostic et de boucles de rétroaction sur les paramètres des procédés. La maîtrise de la thermique du procédé doit faire l'objet d'une attention particulière tant au niveau du *monitoring* qu'au niveau de la modélisation. Des verrous technologiques restent encore à lever, en particulier ceux qui ont trait à la maîtrise des lois d'échelle. Enfin, la possibilité d'intégrer des capteurs dans les pièces en cours de fabrication est une voie particulièrement intéressante à explorer dans cette approche globale de fabrication de pièces innovantes afin de pouvoir proposer des produits à très forte valeur ajoutée.

## Applications aux hautes températures

Aux hautes températures, les matériaux métalliques en fabrication additive trouvent leur application majeure dans le refroidissement par canaux conformes (*conformal cooling*). Aux très hautes températures, l'emploi de matériaux métalliques n'autorise plus que des alliages à base de métaux réfractaires dont la haute densité sera rédhibitoire en comparaison de céramiques massives ou composites. Il demeure néanmoins une large plage de températures, située entre 200 et 1 200°C,

<sup>30</sup> Procédé DED : *Directed Energy Deposition*.

<sup>31</sup> Fabrication Additive Métallique, Technologies et Opportunités, étude financée par Normandie AeroEspace, INSA Rouen, Département Mécanique et Centre Commun d'Usinage, avril 2015.

couvrant une grande partie du domaine de fonctionnement des moteurs et dans laquelle les alliages métalliques de hautes performances auront toute leur place, par exemple les inconels, résistants à haute température, et les alliages de titane qui associent densité limitée et haute résistance, et pour lesquels des progrès peuvent encore être accomplis si on envisage des élaborations par voie poudres qui devraient permettre des compositions impossibles à réaliser par la voie conventionnelle du métal liquide. Dans le domaine des plus hautes températures, les composés intermétalliques de par leurs liaisons atomiques spécifiques offrent des propriétés particulièrement attractives de bonne résistance associées à des densités limitées : les aluminures de titane type TiAl peuvent remplacer des superalliages de nickel avec une densité deux fois plus faible<sup>32</sup>. Toutefois ces derniers développements sont encore du domaine de la recherche.

## Exemples de motivation à l'adoption de la fabrication additive

Le développement futur de la fabrication additive métallique peut exploiter plusieurs axes :

- reconception avec allègement de produit,
- refroidissement *via* des canaux internes,
- complexité géométrique,
- procédés hybrides associant fabrication conventionnelle et fabrication additive,
- ajout de fonctions et combinaison de matériaux, notamment avec les procédés de dépôt sous flux d'énergie dirigée,
- aptitude à l'intégration de fonctions,
- fabrication additive métallique multimatériau,
- fabrication additive de composites à matrice métallique.

## Reconception avec allègement de produit

Le Cetim a étudié la reconception d'un pivot de machine d'enroulement de câbles sur lequel s'exercent des efforts inertiels importants. La conception initiale était mécano-soudée. Cette pièce a été reconçue pour la fabrication additive en appliquant l'optimisation topologique. Cela a abouti à une version tubulaire obtenue par fusion laser sur lit de poudre, allégée de 65 %.

---

<sup>32</sup> L'avenir de la métallurgie française - Réflexions et pistes d'actions, Yves BRECHET, André PINEAU, Yves QUERE, ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, février 2014.

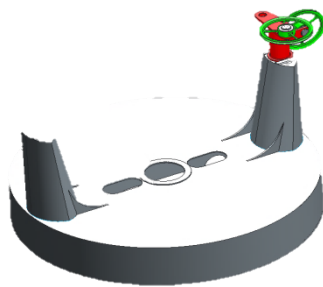


Figure 17 - Machine d'enroulement de câbles



Figure 19 - Pivot reconçu en version tubulaire.

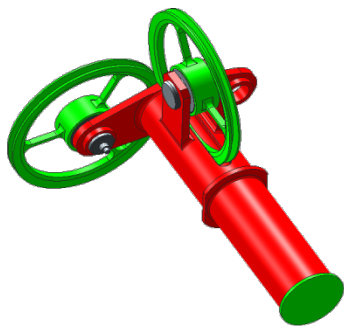


Figure 18 – Pivot mécano-soudé

Un autre exemple d'allégement et d'économie matière se trouve dans le domaine des fixations avec des vis allégées en acier inoxydable élaborées par impression 3D (Höganäs).

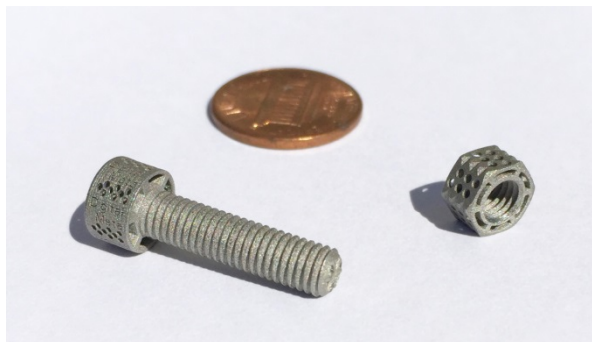


Figure 20 – Vis allégées en acier inox fabriquées par impression 3D (Höganäs AB - Digital Metal®)

**Focus : améliorer le dimensionnement des structures lattices pour mieux prédire les performances mécaniques et augmenter le niveau de confiance**

Véritable opportunité et levier de développement de la fabrication additive, la réalisation de matériaux architecturés reste peu maîtrisée tant au niveau du dimensionnement et de la simulation, que de la stabilité du procédé de fabrication. Lors des premières phases de développement, la conception et le dimensionnement d'une pièce en fabrication additive se font souvent sur la base d'une structure « idéale », ce qui entraîne **un besoin de correction et d'ajustement des propriétés pour arriver à une structure réelle et affiner les prévisions de performances mécaniques des pièces**. Des travaux ont été conduits sur des structures lattices de type octet-truss fabriquées par fusion par faisceau d'électrons (EBM) à l'Institut polytechnique de Grenoble et ont fait l'objet de plusieurs hypothèses<sup>33</sup> :

- Une poutre, élément constitutif d'une structure lattice, peut-être modélisée par un **cylindre de diamètre inférieur au diamètre réel, appelé diamètre « efficace »**, ne tenant pas compte des rugosités de surface provoquées par la fabrication additive

<sup>33</sup> Caractérisation et optimisation de structures treillis fabriquées par EBM, Thèse M. Suard , 2015.

- Afin d'améliorer les prédictions des performances mécaniques des structures lattices, un coefficient de correction peut être appliqué au diamètre efficace et ainsi **obtenir un diamètre équivalent au plus proche des conditions réelles de fabrication.**

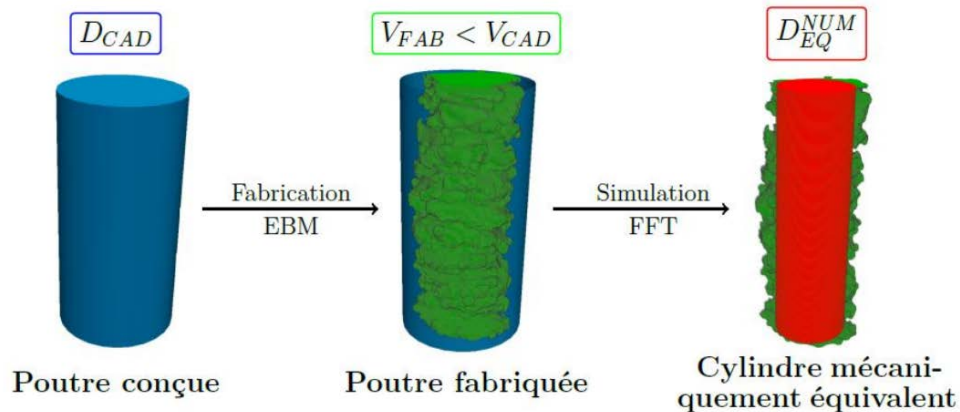
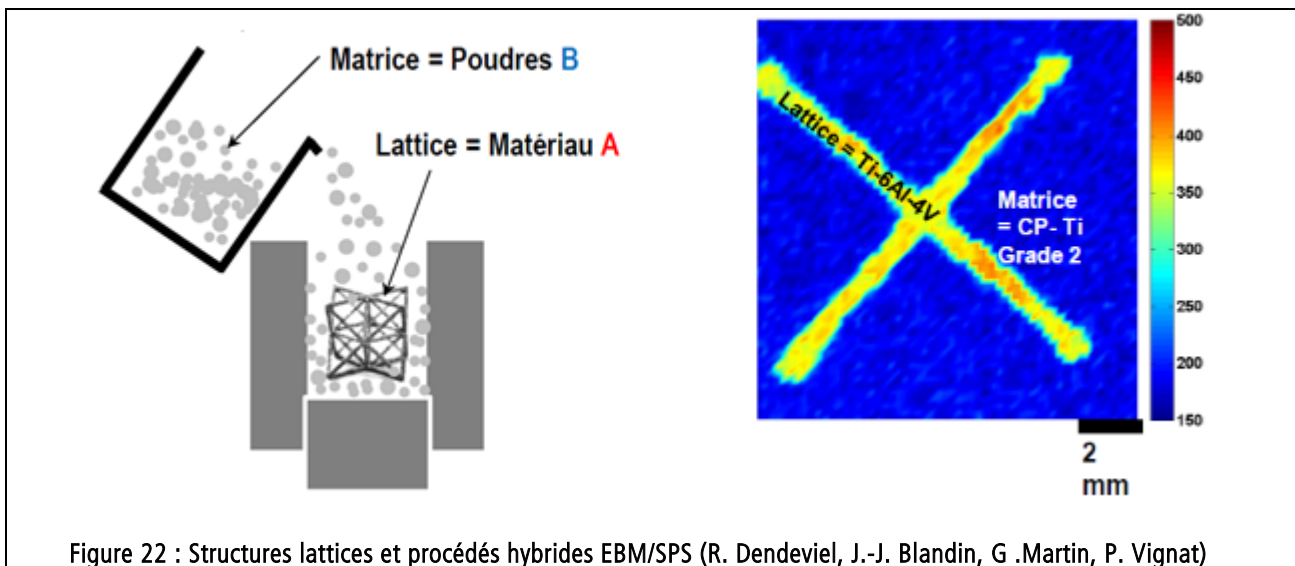


Figure 21 : Concept de matière efficace et de cylindre mécaniquement équivalent (Thèse M. Suard , 2015)

Un projet en collaboration avec l'université libre de Bruxelles a pu démontrer **qu'une attaque chimique au HNO<sub>3</sub> des structures lattices réduisait la rugosité des structures** et que cette structure attaquée présentait des performances **très similaires à celles simulées par la théorie du diamètre efficace**. Ainsi, les irrégularités provoquées par les techniques actuelles de fabrication additive rendent les performances et les prévisions moins efficaces. La poursuite de ce type de travaux dans les entreprises et les laboratoires est fondamentale **pour le développement de la fabrication additive dans les domaines tels que l'aéronautique car un bon facteur correctif permet de mieux dimensionner la pièce et maîtriser le facteur de sécurité**. En plus de prédire plus finement les propriétés mécaniques de la pièce et ainsi faciliter les relations de confiance et les démarches de certification/qualification, ces travaux devraient permettre de lever d'importants verrous et développer de nouveaux usages :

- La poursuite de l'optimisation topologique par une optimisation paramétrique mais avec **une meilleure gestion de l'interface entre les zones lattices et de matière dense**.
- L'intégration des fonctions de calculs de résistance des structures lattices dans les outils logiciels.
- Meilleure compréhension des mécanismes de fatigue des structures lattices, une prédiction plus fiable de la durée de vie en fatigue ou encore une possibilité **d'établir une échelle de nocivité des défauts**. Le projet ANR FA2SCINAE<sup>34</sup> (Fabrication Additive et Fatigue de Structure cellulaires intégrées en aéronautique) **visent à lever les verrous liés à la tenue en fatigue de pièces et générer des préconisations** en termes de conception, de type de structures cellulaires utilisables, de post-traitements, d'essais de qualifications, et ce pour la technologie EBM et l'alliage TA6V.
- Développement des pièces hybrides : en prenant l'exemple d'une pièce TA6V usinée sur laquelle on vient construire une structure cellulaire par-dessus en EBM, **le meilleur dimensionnement des structures lattices et la gestion des interfaces** ouvrent de nouvelles perspectives sur la fabrication de pièces hybrides pour **gagner en rapidité et utiliser uniquement la fabrication additive pour les zones stratégiques** ou complexes.
- Développement de procédés hybrides et de pièces multimatériaux : il peut être possible de fabriquer une structure lattice de poudre A en procédé EBM puis de remplir ces vides avec une poudre B en procédé SPS. Par exemple, une structure lattice en TA6V **complétée par du Ti pur permet de développer un composite dense >99 %** à faible porosité aux interfaces où la matrice épouse parfaitement la forme du lattice. **Un autre exemple réside dans la possibilité de réaliser des composites titane-aluminium.**

<sup>34</sup> Agence Nationale de la recherche - Matériaux et procédés (DS0303) 2015 - Projet FA2SCINAE.



## Ajout de fonctions et combinaison de matériaux

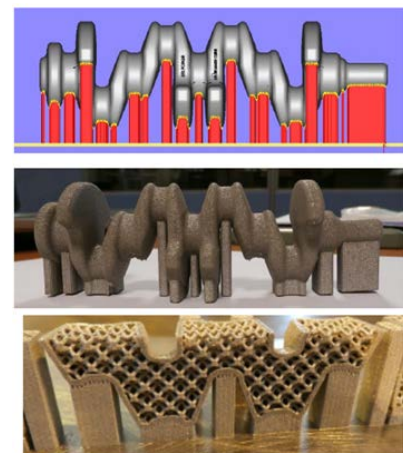
Dans le cas de la forge, l'objectif est d'ajouter par procédé additif une partie difficilement forgeable voire non forgeable, par exemple une partie allongée ou creuse sur une partie massive. Pour cela, il est nécessaire de mieux éclairer le potentiel des procédés additifs pour différents couples matériaux et process (conditions de liaisons...) :

- 42CD4 / 316L
- Aluminium/Cuivre
- Acier outil/Inconel
- Titane/Magnésium
- Titane/Titane, 316L/316L, Alu/Alu.

Les procédés additifs peuvent revêtir d'autres opportunités pour la forge, parmi lesquelles :

- l'ajout de fonctions sur des pièces forgées ou sur des outillages de forges, y compris en multi-matériaux,
- L'utilisation des possibilités du « conformal cooling » (refroidissement optimisé) sur les outillages de forge, afin d'augmenter les cadences de production,
- L'allègement de masses mobiles.

Figure 23 – Vilebrequin traditionnellement forgé, reconçu en fabrication additive avec allègement par une structure lattice (en haut : schéma de supportage de la pièce en procédé lit de poudre)



La fabrication additive permet de limiter la matière consommée par rapport à une solution conventionnelle comme le forgeage. De plus, une reconception en vue de la fabrication additive permet d'augmenter les bénéfices obtenus. Dans le cas de la pièce figure 24 la reconception permet

encore d'alléger la pièce et de réduire son temps de fabrication de plus de 50 %. Il en résulte une baisse de 27 % du coût de revient de la pièce brute avant parachèvement.

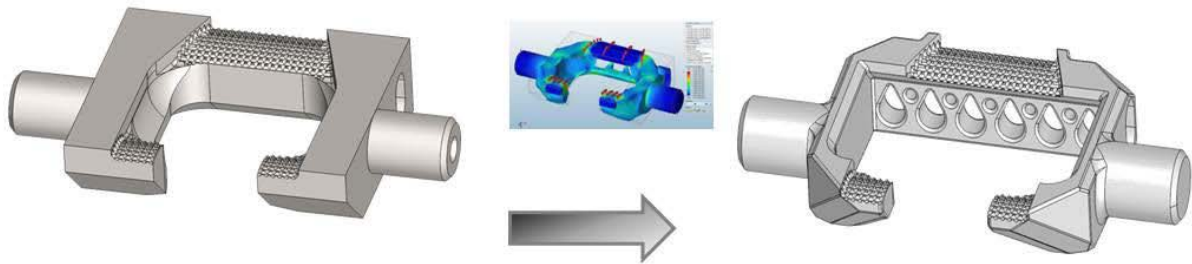


Figure 24 –Pièce de fabrication additive par procédé SLM avant et après reconception.

## Procédés hybrides associant fabrication conventionnelle et fabrication additive

Dans le domaine des prothèses où les métaux comme les titanes ou les chrome-cobalt sont largement utilisés, la fabrication additive intervient en complément sur une ébauche forgée. Pour sa part, le procédé de dépôt de métal sous laser (LMD, *Laser Metal Deposition*) a été identifié comme un procédé associable à des procédés de fonderie ou d'usinage [24]. Ce procédé permet par exemple d'ajouter des bossages ou des excroissances à une pièce préexistante [25]. Des machines hybrides combinent directement différentes technologies de fabrication additive et des technologies conventionnelles soustractives. Les constructeurs de ce type de machines-outils sont de plus en plus nombreux : DMG-Mori, Hermle, Mazak, Matsuura, Sodick, WFL, Fives, etc.



Figure 25 – Machine hybride projection de poudre et usinage conventionnel.

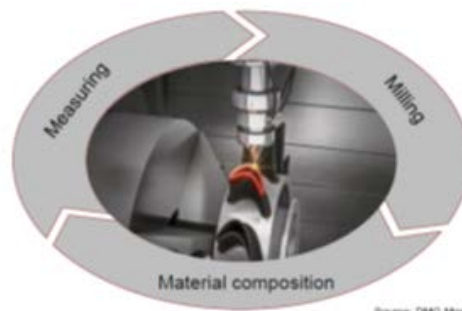


Figure 26 – Outillage : fraisage de canaux de refroidissement suivi par la fabrication additive de la couche de couverture (gauche) - Réduction des efforts lors du bridage : rechargement d'aube de turbine (droite)

En Allemagne, les industriels constructeurs de machines-outils n'envisagent pas d'évolution fondamentale de leur marché due à la fabrication additive dans les cinq à sept ans à venir. La

fabrication additive est perçue comme une technologie de production complémentaire dans la chaîne de valeur existante<sup>35</sup>.

Une autre forme d'hybridation est l'assistance de la fabrication additive par un procédé tiers pour en augmenter les capacités. Ainsi, l'association du chauffage par induction de la pièce à la fusion laser avec projection de poudre permet la fabrication ou la réparation par rechargement de pièces en matériaux résistants à l'oxydation et à la corrosion à plus de 700°C. Ces matériaux difficiles, voire impossibles, à souder par les méthodes conventionnelles tels que les superalliages de nickel, les aluminures de titane, etc., sont utilisés pour les pièces chaudes de réacteurs d'avion ou les turbines à gaz statiques. La chaleur apportée localement associée à un pilotage précis du *process* permet d'éviter la fissuration à froid ou à chaud de la pièce et un état de surface ne requérant qu'un parachèvement minimal.

### Aptitude à l'intégration de fonctions

De nouvelles fonctions peuvent être intégrées aux pièces métalliques par la mise en œuvre d'une approche de conception innovante de la fabrication additive (*Design for Additive Manufacturing, DfAM*). Ces possibilités sont étudiées de manière approfondie en vue d'application dans le secteur biomédical pour la fabrication de produits dans lesquels de nombreuses fonctions peuvent être intégrées à des pièces métalliques. Ainsi, un implant de tige de hanche (Ti, CoCr, acier inox) peut être fabriqué avec une surface poreuse et des canaux fonctionnels internes destinés à la délivrance d'un médicament intégré, à des examens par endoscopie, ou bien à l'aide à l'explantation.

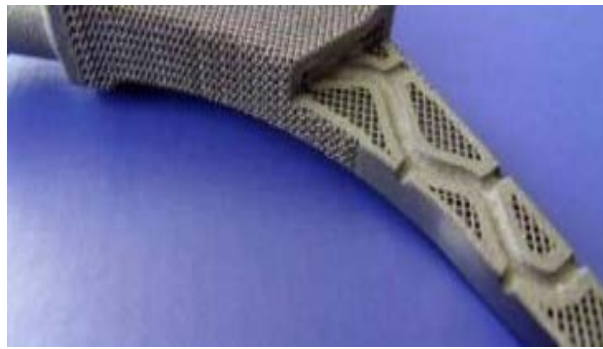


Figure 27 – Implant de tige de prothèse de hanche à surface poreuse et intégration de fonction, réalisé par fusion laser (Fraunhofer IWU)

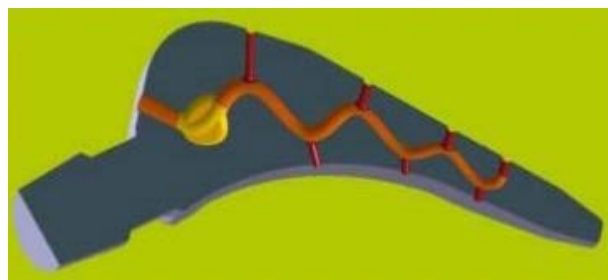


Figure 28 – Représentation CAO d'un implant de tige de prothèse de hanche à intégration de fonction : dépôt de médicament (jaune), canaux de distribution (orange, rouge) (Fraunhofer IWU).

Une autre fonction intégrable grâce à la fabrication additive est celle de l'aide à la stabilisation de la prothèse par intégration d'actionneurs en alliage à mémoire de forme répondant aux variations de température.

<sup>35</sup> VDW Study Additive manufacturing - Opportunities and risks from the perspective of the German machine tool industry, METAV 23-02-16.

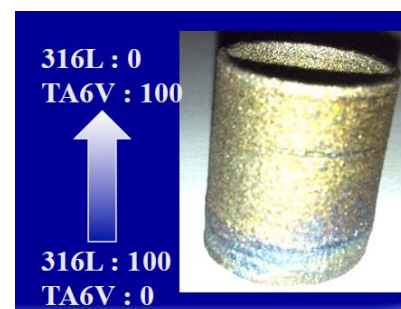


Figure 29 – Tige de prothèse de hanche fabriquée par fusion laser en lit de poudre d’alliage de titane, avec intégration d’un actionneur en tôle d’alliage à mémoire de forme (source : Fraunhofer IWU)

## La fabrication additive métallique multimatériau

Cette orientation n’est pas spécifique aux métaux mais elle est porteuse de nouvelles fonctionnalités pour les pièces réalisées.

Figure 30 - Pièce multimatériau à gradient de composition (Source « Du prototypage rapide à la fabrication directe », J.-Y. Hascoët, P. Mognol, Ircyn, Nantes)



Les procédés de fabrication multimatériaux sont émergents pour la technologie SLM (*Selective Laser Melting*) de fusion par laser sur lit de poudre. Le potentiel est important car plusieurs configurations sont possibles :

- transition discrète entre deux matériaux au niveau d’une couche donnée,
- transition continue par variation progressive de la teneur en chaque matériau.

Toutefois, on ne peut créer ainsi qu’un gradient vertical. Par ailleurs, se pose ici la question majeure du recyclage des poudres une fois mélangées.

Dans le futur, il est envisageable de réaliser des pièces réellement multimatériaux en 3D sous réserve de l’évolution des méthodes de dépôt en lit de poudre.

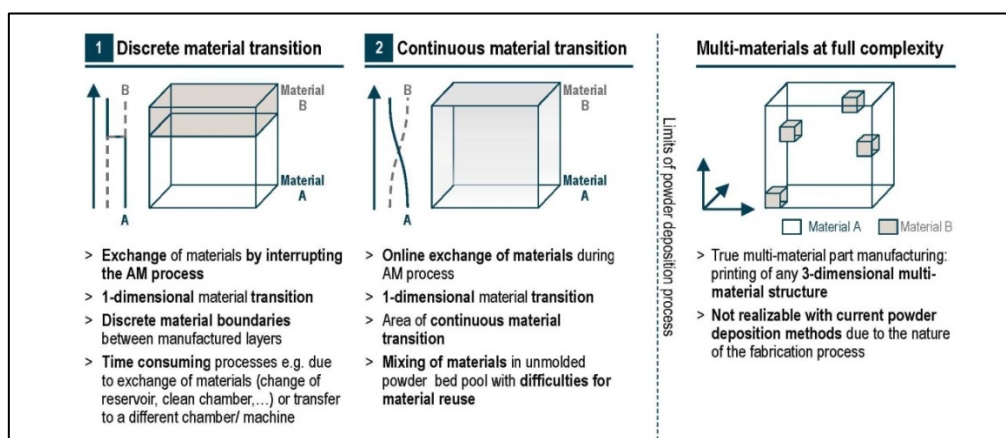


Figure 31- Différentes possibilités de conception de pièces multimatériaux (source EPMA, Roland Berger, octobre 2015)



Les pièces à transition discrète, comme l'exemple de la figure suivante d'une pièce de refroidisseur de système laser, associent deux matériaux à caractéristiques différentes (ici conductivité thermique et résistance mécanique) dans la mesure où les deux matériaux seront compatibles. La fabrication additive requiert cependant le passage de la pièce dans deux chambres différentes. Les métaux utilisables sont variés : nickel, chrome, titane, acier inoxydable, etc.

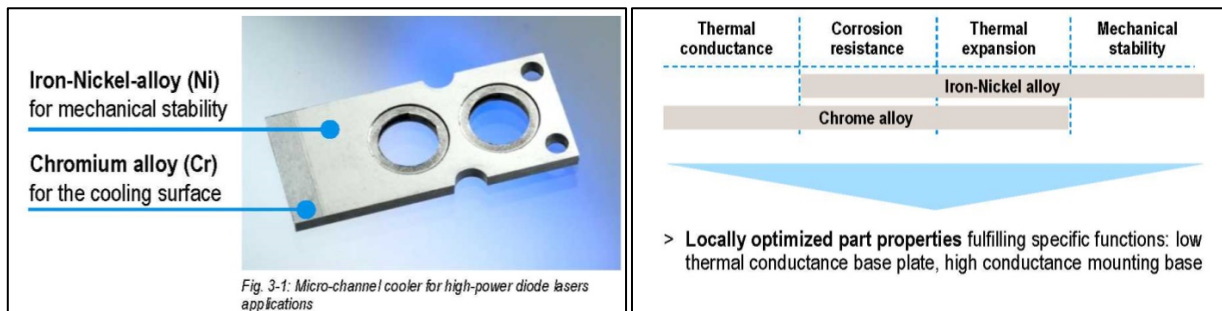
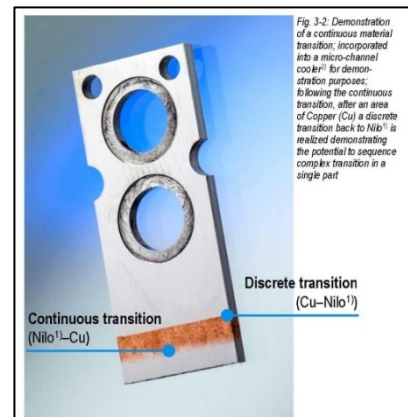


Figure 32- Pièce multimatériau à transition discrète (source EPMA, Roland Berger, octobre 2015).

Les pièces à transition continue sont réalisables sur des machines dotées d'un système de pilotage de l'alimentation en poudre. Les ratios entre composants peuvent être modifiés à tout moment pendant la fabrication. Celle-ci ne demande pas de temps supplémentaire ; en revanche les matériaux doivent être hautement compatibles entre eux.

Figure 33 – Pièce de démonstration montrant transition discrète et transition continue entre deux matériaux (source EPMA, Roland Berger, octobre 2015)



## Évolution de la fabrication additive vers la mise en œuvre de composites à matrice métallique<sup>36</sup>

Une thèse récente a été consacrée à la mise en œuvre de composites à matrice titane par le procédé de fabrication directe par fusion laser de poudre projetée (DMD). Ce procédé est déjà envisagé pour le rechargement et la réparation des aubages en titane dans le secteur aéronautique. Par ailleurs, les composites à matrice métallique et en particulier les composites à matrice titane (CMTi), présentent généralement des propriétés mécaniques attractives à haute température ou dans des régimes d'abrasion. La fabrication additive directe de CMTi est donc, *a priori*, un véritable enjeu technologique et industriel pour le secteur aéronautique. L'étude a porté sur des mélanges projetables de poudre Ti-6Al-4V avec renfort de carbure de bore B<sub>4</sub>C. Le matériau composite élaboré par FDPL répond donc aux objectifs initiaux pour ce qui concerne les propriétés mécaniques à haute température malgré un certain nombre de limitations. Pour que ces matériaux composites élaborés par FDPL soient attractifs industriellement, il a été démontré la possibilité de fabriquer des pièces présentant des géométries relativement complexes. Les différentes pièces fabriquées illustrent le degré de maturité de ce couple matériau/procédé.

<sup>36</sup> Fabrication additive de composites à matrice titane par fusion laser de poudre projetée, Sebastien Pouzet, thèse, École nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015.

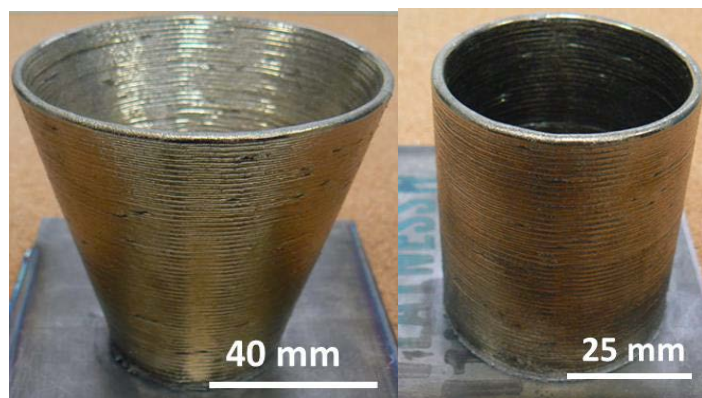


Figure 34 – Pièces en composite à matrice métallique fabriquées par fusion laser de poudre projetée (thèse Pouzet, 2015)

## Synthèse Forces-Faiblesses-Opportunités-Menaces de la fabrication additive métallique

Les deux principales technologies de fabrication additive appliquées aux matériaux métalliques, la fabrication sur lit de poudre et la projection de poudres, présentent des points communs et peuvent être distinguées en analysant leurs forces et leurs faiblesses, les opportunités qui peuvent se présenter à elles et les menaces auxquelles elles peuvent être confrontées<sup>37</sup>. Le diagramme suivant synthétise ces divers points en distinguant ceux qui sont communs à toutes les technologies et ceux qui sont spécifiques à l'une ou l'autre d'entre elles.

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Géométrie de pièces très complexes</li> <li>• Favorise l'innovation</li> <li>• Gain de temps (lead time) pour des formes complexes et en petites séries</li> <li>• Rapidité d'exécution grâce aux multi-lasers (lit de poudre)</li> <li>• Machines moins chères (lit de poudre)</li> <li>• Ajout de formes sur support complexe (projection de poudre)</li> <li>• Gain de temps pour des formes complexes (projection de poudre)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Technologies récentes non matures</li> <li>• Actuellement inadaptées à la production en grandes séries</li> <li>• Support plan nécessaire (lit de poudre)</li> <li>• Gestion de l'anisotropie et des contraintes internes par traitement thermique</li> <li>• Murs horizontaux impossibles (projection de poudre)</li> <li>• Coûts d'investissement élevés</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nouvelles possibilités de réalisations</li> <li>• Pièces non réalisables par les procédés conventionnels</li> <li>• Nouvelles possibilités de conception</li> <li>• Variations continues des propriétés fonctionnelles (au stade laboratoire pour les métaux)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obsolescence des machines due au développement de nouvelles technologies</li> <li>• Besoin de qualification des performances des pièces en fonctionnement réel</li> </ul>
Opportunités	Menaces

Figure 35- Diagramme AFOM fabrication additive métal (synthèse)

<sup>37</sup> Source : Fabrication Additive Métallique, Technologies et Opportunités, étude financée par Normandie AeroEspace, INSA Rouen, Département Mécanique et Centre Commun d'Usinage, avril 2015.

## Description des scénarios prospectifs de développement de la fabrication additive – Autres métaux

Les matériaux métalliques hors aluminium sont divers en termes de propriétés d'emploi, de coût et de domaines d'applications potentielles. Cette diversité amène à envisager à des degrés divers les quatre scénarios types élaborés dans cette étude. Les perspectives de la fabrication additive sont toutefois limitées du fait que les matériaux métalliques constituant l'essentiel de la production industrielle, à savoir les aciers au carbone, ne sont pas, du fait de leur composition chimique, propices aux procédés de fusion, or ceux-ci sont les plus matures. La mise au point de nouveaux alliages est sans doute une piste possible mais en premier lieu, la spécificité d'emploi d'alliages particuliers, titane, chrome-cobalt, aciers inox, inconels, est le moteur de leur développement en fabrication additive.

En reprenant la méthodologie de construction des scénarios prospectifs décrits dans le volet 5 de ce rapport, l'idée est ici de conduire une analyse selon les mêmes scénarios mais du point de vue des métaux hors aluminium afin d'en dégager les spécificités. Pour chaque scénario, les leviers prioritaires ont pu être soumis au regard critique de nombreux acteurs de la filière (utilisateurs finaux, transformateurs, fournisseur de matière) et validés lors d'un atelier de travail dédié aux enjeux de la fabrication additive métaux hors aluminium. Pour illustrer enfin les différents cas d'utilisation identifiés ainsi que les enjeux et verrous associés, des exemples concrets de pièces seront apportés.

### Scénario 1 – Prototypage et expérimentation

Le scénario centré sur le prototypage envisage, pour les **matériaux métalliques autres que l'aluminium**, les perspectives de développement de cette activité comme une activité industrielle en tant que telle. Il s'agirait de mettre à profit les développements historiques que les procédés de fabrication additive ont permis pour obtenir plus rapidement et à moindre coût des pièces prototypes ou expérimentales en s'affranchissant de la fabrication d'un outil intermédiaire tel qu'un moule. Cependant les contraintes inhérentes à l'emploi de métaux comme une température de fusion plus élevée, limitent l'emploi de ces derniers pour du prototypage. Pour les cas de validation de spécifications géométriques et dimensionnelles, la fabrication directe de prototypes en matériaux polymères convient et est largement utilisée dans l'industrie. C'est pour la réalisation de prototypes de préindustrialisation représentatifs de la pièce finale en termes de performances mécaniques, de matériaux et capable de fonctionner en conditions réelles d'utilisation, que l'emploi de métal se justifie. Actuellement, les états de surface obtenus sont de qualité insuffisante et impliquent des reprises par usinage conventionnel. Il manque par ailleurs des machines capables de fabriquer des pièces de grandes dimensions.

Ce scénario est peu porteur dans la mesure où la fabrication additive à des fins de prototypage est déjà déployée largement : il reflète plus une évolution déjà largement engagée qu'un axe fort de développement. Il reste un scénario de niche. Pour les métaux, en termes d'impact sur la filière, ce scénario serait potentiellement demandeur d'une grande variété de matériaux sous forme de poudre ou de fil, car de nombreux alliages connus n'ont pas été exploités parce qu'impossibles à mettre en forme par les procédés conventionnels. Cependant cette dispersion, à l'inverse, n'occasionnerait pas la consommation d'une grande quantité de chaque nuance.

Les freins suivants sont à souligner :

- faible disponibilité des divers matériaux métalliques pour répondre à un cahier des charges spécifique,
- coût de développement élevé d'une nuance particulière inaccessible à un seul utilisateur, d'où une nécessité de mutualisation des besoins,
- les formats de données numériques disponibles pour la conception ne permettent pas d'incorporer des données telles que les caractéristiques des matériaux ou les variations de composition dans le cas de pièces multimatériau,
- le cuivre pourrait être l'objet de prototypage en vue de sa plus grande utilisation en fabrication additive.



Figure 36: Synthèse : Prototypage et expérimentation

### Conclusions et enseignements :

- **Un scénario de niche qui concerne principalement les pièces unitaires mais qui se présente comme une étape nécessaire à l'industrialisation.**
- **L'intérêt majeur de la fabrication additive est ici d'éviter la fabrication d'outillages notamment pour les grandes pièces.**
- **La fabrication additive de moule en sable pour la production de pièces métalliques est très intéressante et présente un vrai intérêt industriel pour du prototype.**
- **Freins prioritaires : état de surface nécessitant un réusinage qui enlève à la fabrication additive beaucoup de son intérêt, diversité des métaux rendant difficile la production d'un tonnage suffisant de poudre, augmentation de la taille des machines, flexibilité.**

### Exemple de la fabrication de corps de pompe<sup>38</sup>

- Illustration du scénario 1 : la fabrication de noyaux en sable est réaliste pour du prototypage.
- Illustration du scénario 3 : pièces industrielles de petites séries pour les segments haut de gamme.

#### Introduction

L'analyse est ici menée sur le cas des corps de pompes, qui sont des pièces de fonderie (fonte ou acier) de moyenne dimension (environ 600 x 400 x 200 mm et jusqu'à 150 kg) réalisés en moulage sable et intégrant des noyaux pouvant être complexes. Néanmoins dans certains secteurs comme l'aéronautique, le spatial ou le nucléaire, on peut retrouver des pièces très complexes avec des circuits de refroidissements intégrés et des fonctions spécifiques.



<sup>38</sup> Synthèse de l'analyse réalisée par le CTIF, partenaire du consortium. Analyse complète disponible en annexe.

### **Comparaison avec les procédés conventionnels**

Les corps de pompes sont traditionnellement fabriqués par moulage sable par gravité. Les matériaux le plus souvent utilisés sont la fonte GS et GS dopée nickel ou encore l'acier.

### **Motivations à l'adoption de la fabrication additive**

La fabrication additive sable ou métallique permettrait l'intégration de fonctions dans le corps des pompes haut de gamme (circuits de refroidissement complexes, réduction du nombre d'assemblages, diminution de la masse).

Les coûts inhérents aux procédés de fabrication additive sable ou métallique sont élevés par rapport à la fonderie, ce qui positionne difficilement ces technologies pour une production série de pièces. Toutefois, pour de toutes petites séries, ces coûts ne sont pas disproportionnés par rapport à ceux de la création des plaques modèles. On oublie également le coût de stockage de ces plaques modèles qui s'endommagent souvent par déformation au cours du temps et qui sont stockés parfois pendant des années. Il serait également envisageable de réaliser en fabrication additive métallique des parties de pièces complexes dans un matériau plus noble que la fonte et de les insérer à la coulée.

D'un point de vue économique et des besoins techniques, la fabrication de noyaux en sable est réaliste pour du prototypage, de très petites séries (<20 pièces) et des produits haut de gamme dans des secteurs à forts enjeux (spatial, nucléaire...). Deux procédés de fabrication additive sont envisageables : la projection de poudre (CLAD) pour réaliser des corps de pompe bimatériaux, et le prototypage 3D sable pour fabriquer des noyaux ou des parties de moules non réalisables par voie traditionnelle. Les séries n'étant pas très importantes, le prototypage de noyaux en sable pour intégrer des fonctions semble à terme plus réaliste.

### **Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive**

D'un point de vue technologique, en fabrication additive métallique, la fonte (qui est un matériau utilisé par les fondeurs) n'est pas disponible et ne semble pas un bon candidat pour la fabrication additive. Cela implique un changement de matériau ou le développement d'un nouvel alliage.

Le procédé DMD n'est pas très développé pour la fabrication de pièces et les coûts associés à ce procédé sont importants. Sur du long terme, la fabrication additive directe (DMD ou SLM) sera envisageable seulement pour des applications spécifiques à forte valeur ajoutée. La fabrication bimatériau à partir du procédé DMD a un avenir mais il sera nécessaire de développer les machines et les logiciels de contrôle de trajectoires avant de pouvoir fabriquer des pièces complexes de grande dimension.

### **Impacts sur la chaîne de valeur**

L'utilisation de la fabrication additive métal aura un fort impact sur la chaîne de valeur car elle viendra prendre des parts de marché aux fondeurs. Le changement de matériau imposera de redimensionner le corps de pompe et de revoir la conception des systèmes de refroidissement interne.

Le prototypage de noyaux en sable aura, quant à lui, un impact uniquement mesurable en production car les machines d'impression de sable sont généralement intégrées dans les fonderies et viennent seulement améliorer la chaîne de production.

## **Scénario 2 – Industrialisation de la personnalisation**

Le deuxième scénario, la personnalisation des produits, peut être envisagé pour les matériaux métalliques, essentiellement pour des pièces unitaires ou en petites séries. Le secteur pour lequel ce scénario apparaît comme le plus pertinent est celui du médical où les inox, les alliages de titane ou de chrome-cobalt sont particulièrement présents du fait de leur biocompatibilité. L'aviation d'affaires et la compétition automobile sont deux autres marchés offrant des perspectives de développement pour la personnalisation des pièces par fabrication additive. Dans l'aéronautique, la fabrication additive permet de fabriquer des pièces de liaison sur mesure pour compenser les variations de formes au niveau des joints d'assemblage entre sous-ensembles, ailes, tronçons de fuselage. Il s'agit cependant d'une mesure corrective visant à raccourcir la durée d'immobilisation (time to flight). Dans le secteur des transports, la fabrication additive personnalisée peut s'insérer dans le process classique de fabrication en étant traitée sur un flux parallèle selon un cycle différent. Le secteur spatial est également un marché de personnalisation pour des pièces de satellites à propriétés mécaniques élevées et de faible densité comme les aluminures de titane. Dans le ferroviaire, la régionalisation des matériels roulants pourrait susciter la personnalisation de pièces en métal. Dans le secteur automobile

la personnalisation pourrait être développée à plus long terme sur des véhicules produits en petites séries pour des pièces esthétiques : tableau de bord, pièces d'habitacle, éléments de carrosserie.

Parmi les deux cas principaux qui regroupent les vecteurs de valeur de ce scénario, l'un est axé sur la personnalisation esthétique, le second sur la personnalisation fonctionnelle. Ce dernier semble *a priori* nettement dominant pour les matériaux métalliques hors aluminium, si l'on considère les métaux à usage industriel.

À plus long terme, si quelques marchés de masse tendant à la personnalisation comme l'automobile sont susceptibles de se développer, seul le biomédical et en particulier les prothèses absorberont *a priori* une part significative des matériaux métalliques sous forme de poudres pour fabrication additive.

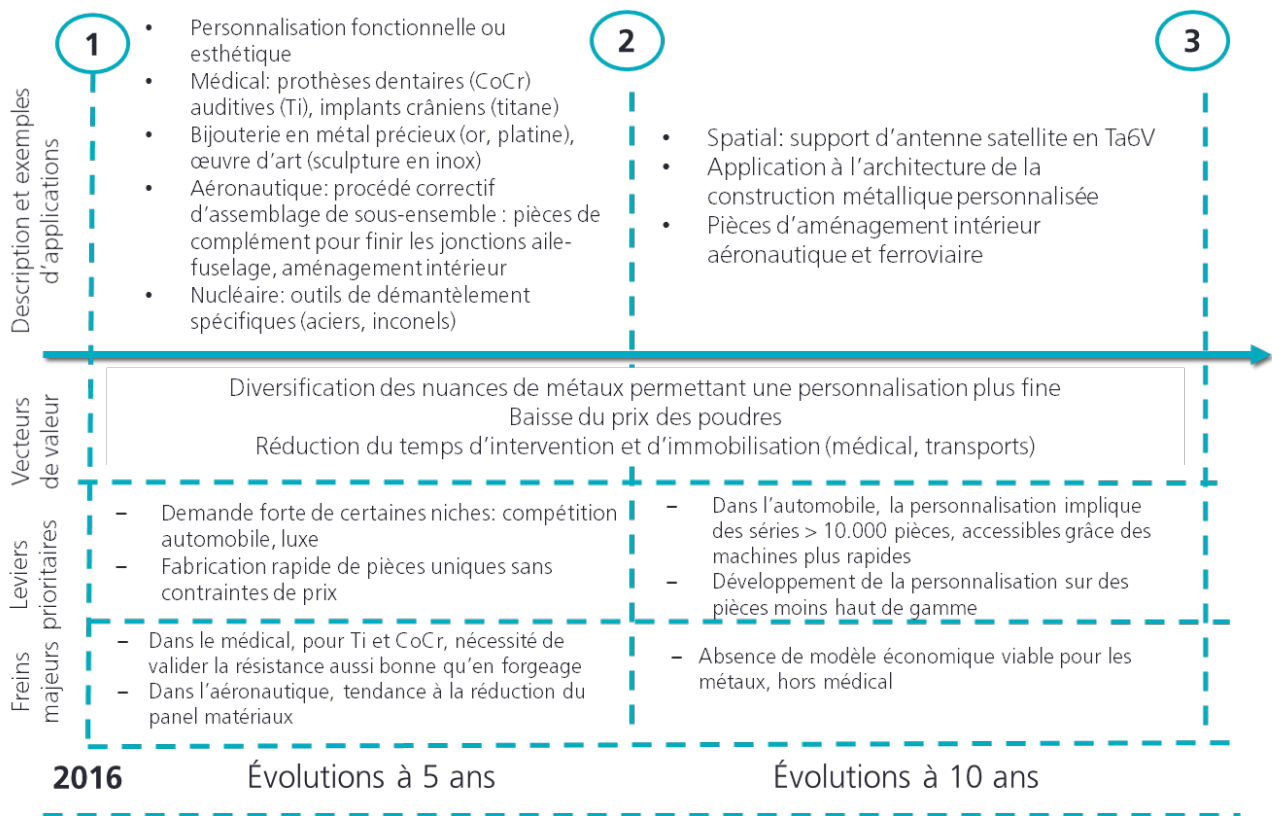


Figure 37: Industrialisation de la personnalisation : de l'esthétique au fonctionnel

### Conclusions et enseignements :

- **Un scénario industriel tiré de manière quasi-exclusive par le médical et certaines niches haut de gamme (joaillerie, aviation d'affaire, course automobile), et qui impacte de ce fait plus particulièrement certains métaux comme les Co-Cr et les alliages de titane.**
- **Freins prioritaires : la mise sous contrôle du procédé en vue de garantir les propriétés d'usage est un problème majeur si toutes les pièces sont différentes car personnalisées.**

### Scénario 3 – Production série et gain de performance

Dans le cas des matériaux métalliques, la fabrication additive présente un intérêt économique spécifique pour la production en série lorsque la forme souhaitée est impossible à obtenir à l'aide d'un procédé de production conventionnel ou quand le gain de performance justifie le surcoût associé. Son développement nécessite en premier lieu de reconcevoir les pièces spécifiquement pour la fabrication additive. Ce scénario peut être vu sous deux angles qui peuvent se cumuler dans certains cas de pièces : production série et/ou innovation produit.

La fabrication additive permet de produire une pièce, ou plusieurs simultanément, 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.

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.

L'amélioration de la performance produite obtenue grâce à de nouvelles formes complexes, est une motivation qui devrait multiplier ces cas sur des pièces unitaires.

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 se positionne comme un véritable aboutissement de l'industrialisation de la fabrication additive.

Les gains de performance apportés par la fabrication additive métal peuvent être également indirects, tels que dans les applications à la fabrication de moules avec canaux conformes de refroidissement interne qui permet d'augmenter les cadences de moulage.

Les acteurs travaillent généralement avec des matériaux utilisés couramment et mettent ainsi en œuvre des alliages métalliques aux caractéristiques validées lorsqu'on les utilise avec les procédés conventionnels. On a vu par ailleurs que de nombreuses nuances avaient été laissées de côté et dont, de ce fait, les performances devraient être explorées : sur ce point, ce scénario « Performance et innovation » dépend pour partie du scénario « Prototypage ». Le marché de l'outillage est également à considérer car des aciers à outils pour travail à chaud ou à froid ont été validés en fabrication additive : c'est certainement par-là que va passer l'adoption de la fabrication additive dans des productions industrielles.

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.

Les freins majeurs et les leviers prioritaires de développement de ce scénario sont les suivants :

- les machines actuelles sont peu adaptées à la production industrielle : la productivité des machines en SLM n'atteint que quelques dizaines de cm<sup>3</sup> à l'heure et l'on n'anticipe pas une explosion de la productivité même si elle s'accroît. Produire des composants en grande série semble illusoire,
- la répétabilité de la production de pièces à machines, paramétrages et matières identiques, est insuffisante (voir les délais relativement longs rencontrés par Michelin pour stabiliser une production homogène avec son parc de machines pourtant identiques) et nécessiterait l'intégration des contrôles à la machine,
- la réduction des opérations de post-traitement est nécessaire à terme,
- la validation des poudres métalliques est nécessaire pour travailler en continuité avec différents lots de matière,
- temporalité : dix ans pour un développement individuel, cinq si collectif.

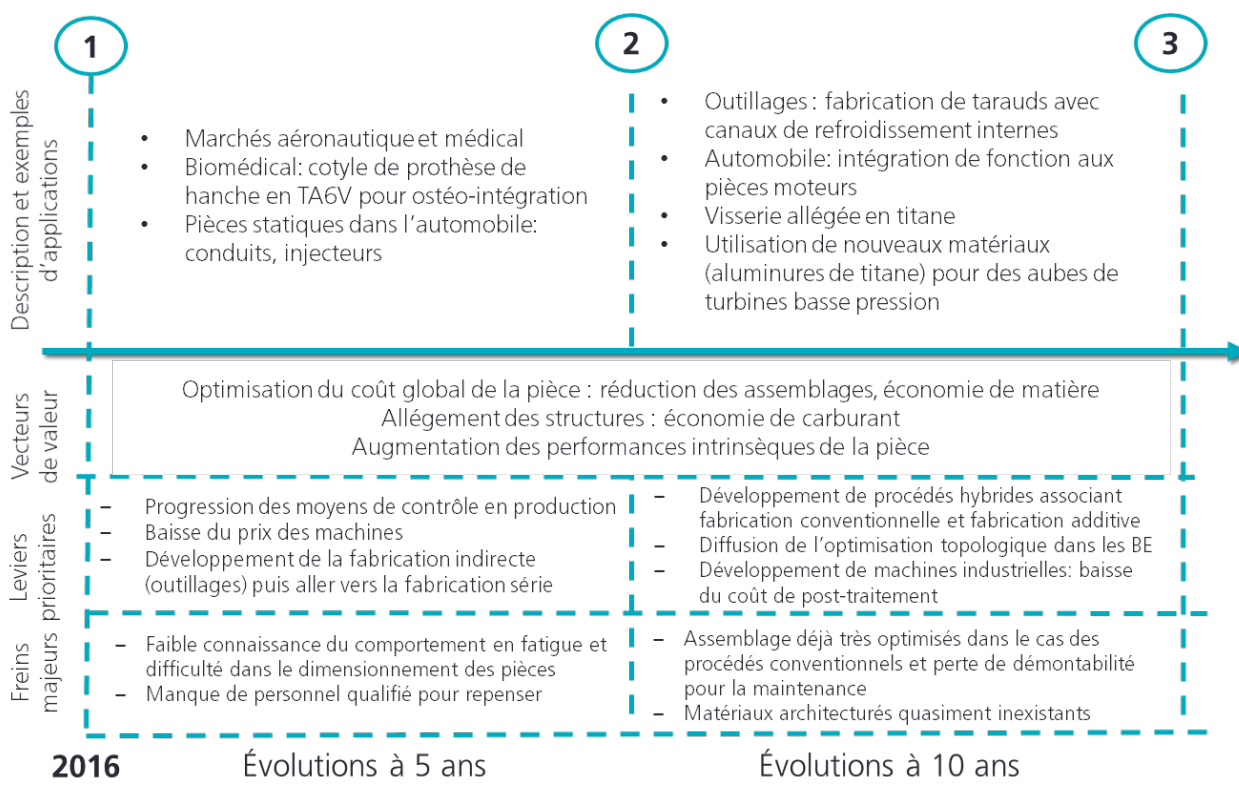


Figure 38: Production série et gain de performances

### Conclusions et enseignements :

- **Le scénario 3 est le plus important pour les matériaux métalliques. Il a la capacité de driver les autres scénarios. Il dépend cependant beaucoup du volontarisme des clients finaux pour tirer la technologie. Par ailleurs la France dispose d'un parc machines limité et un seul groupe industriel, Fives-Michelin, semble vraiment actif pour impulser ce scénario à grande échelle.**
- **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, et incorporer une part significative de pièces métalliques.**
- **Freins : machines industrielles, répétabilité du procédé, post-traitement, conception.**



### **Exemple de la fabrication d'aubes de turbines<sup>39</sup>**

- Illustration du scénario 3 : une production industrielle de pièces critiques pour l'aéronautique.
- Illustration du scénario 4 : simplification du procédé de fabrication, maintien de l'internalisation sur des pièces dites stratégiques mais simplification de la délocalisation.

Les aubes de turbines sont des pièces aéronautiques complexes qui mesurent environ 200 x 50 x 20 mm et qui pèsent jusqu'à 500 g. Elles sont actuellement réalisées par le procédé de cire perdue et posent de nombreux problèmes à leur fabricant tant par la complexité du procédé que la qualité attendue pour ce type de pièce. Les matériaux les plus souvent utilisés sont les bases titane ou inconel et les opérations de mise en forme sont généralement réalisées au sein d'une chaîne de fabrication directement intégrée chez les motoristes. L'ordre de grandeur du prix d'une aube de turbine est de plusieurs milliers d'euros (2 000 à 5 000 €) par pièce. Les fabricants pensent déjà à réaliser ces pièces en fabrication additive afin d'optimiser au mieux leur production, de limiter les rebuts et également de réduire les coûts de fabrication. La maturité du procédé reste encore à démontrer : en effet qualifier des aubes de turbines, des pièces dites critiques, nécessite du temps pour réaliser les essais et un coût non négligeable et s'avère être un frein important au déploiement de cette technologie dans l'aéronautique.



### **Motivations à l'adoption de la fabrication additive**

Les aubes de turbines équiaxes sont des pièces importantes du moteur soumises à de très hautes températures. Elles intègrent un système de canaux de refroidissement internes complexes et difficiles à mettre en œuvre avec le procédé de cire perdue actuel. La fabrication additive d'aubes de turbine permettrait de réaliser les géométries complexes des canaux de refroidissement sans surcoûts tout en laissant la possibilité de complexifier d'avantage la géométrie afin d'avoir des performances moteur encore plus grandes sans pour autant alléger les pièces. La maîtrise de la qualité du procédé de fabrication par voie additive semble atteignable par le biais d'une automatisation plus complète du procédé de fabrication additive par rapport au moulage en cire perdue. Les procédés de fabrication additive sur lit de poudre tels que la fusion par faisceau d'électrons et la fusion laser peuvent permettre la fabrication d'aubes de turbines à partir des matériaux disponibles sur le marché.

### **Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive**

Le point à court terme le plus problématique est la qualification du procédé d'un point de vue aéronautique pour des pièces aussi critiques que les aubes de turbines équiaxes. C'est un processus souvent très long et exigeant car il faut qualifier le procédé (poudres, machines, répétabilité) et les pièces.

D'un point de vue plus industriel, les machines actuellement sur le marché ne sont pas prévues pour réaliser de la production de pièces en série. L'outil industriel autour de cette technologie reste à construire.

D'ici 5 ans, un début de production semble envisageable mais reconstruire complètement une nouvelle chaîne de production et un outil industriel (formation, investissement, qualification...) sera probablement plus long. Sur une vision à 20 ans, un basculement quasi complet de la production d'aubes de turbines équiaxes vers la fabrication additive est une hypothèse envisageable.

### **Impacts sur la chaîne de valeur**

Au vu des enjeux autour de ces pièces moteur, il semble peu probable que les motoristes souhaitent externaliser la production en fabrication additive. Le passage de la fonderie à la fabrication additive réduira le nombre d'étapes de fabrication, le nombre d'opérations ainsi que d'acteurs (fournisseurs, métiers). Sur ce type de pièce, petite et complexe, la fabrication additive est concurrente à la fonderie cire perdue et pourrait à long terme la remplacer. La production sera beaucoup plus automatisée et avec de nouveaux moyens de fabrication ; il faudra former et organiser le personnel des usines actuelles de façon à ne pas manquer de compétences.

<sup>39</sup> Synthèse de l'analyse réalisée par le CTIF, partenaire du consortium. Analyse complète disponible en annexe.

## Scénario 4 – Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande

La fabrication additive de pièces métalliques est également concernée par ce scénario. Les technologies de fabrication additive, en remplaçant des outillages physiques par des fichiers numériques échangeables à distance, offrent aux différents acteurs la possibilité d'évoluer le long de la chaîne de valeur et d'en capter des parts différentes de celles qui étaient les leurs avec les procédés conventionnels. Le principal levier de ce scénario est la fabrication rapide. Ce scénario commence à se développer pour la maintenance et la réparation des avions commerciaux. Dans le domaine de la défense des réparations d'engins sur site ont déjà été expérimentées mais cela constitue une niche. Pour ce scénario, le cas des matériaux métalliques n'est pas fondamentalement différent de celui des autres matériaux en général. Ils peuvent cependant être distingués par certains points :

L'offre en poudres métalliques dédiée à la fabrication additive est encore limitée car la demande est faible mais elle s'accroît régulièrement. La diversité en nuances et l'augmentation des tonnages disponibles pourraient favoriser une mise en œuvre hors des lieux de fabrication industrielle classiques. D'autres freins sont rencontrés :

- la traçabilité des matériaux et des pièces sera un besoin important,
- les coûts de certification seront sans doute importants et il faudra qualifier les procédés,
- la mise en confiance des utilisateurs finaux sera nécessaire, ne serait-ce qu'en raison du changement d'aspect des pièces,
- les besoins importants en post-traitements et en moyen de contrôle freinent ce scénario dans l'attente de machines plus intégrées. Le développement de machines hybrides combinant additif et conventionnel pourrait en revanche être un levier.

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) dans des délais courts et dans des conditions plus économiques qu'une refabrication conventionnelle. Or les matériaux métalliques sont caractérisés par une présence bien plus importante due à leur antériorité, que les matières plastiques sous forme de pièces en service dans les équipements industriels, les divers modes de transports, l'électroménager, le matériel agricole, la défense, etc. Ceci multiplie les cas potentiels d'obsolescence.

En termes de temporalité, ce scénario pourrait tout d'abord concerner les pièces métalliques simples et/ou de faible criticité. Ce n'est qu'ensuite qu'il pourrait s'appliquer à des pièces plus complexes ou plus critiques. Toutefois les pièces métalliques les plus critiques sembleraient hors d'atteinte de la fabrication additive (niveau de criticité 1).

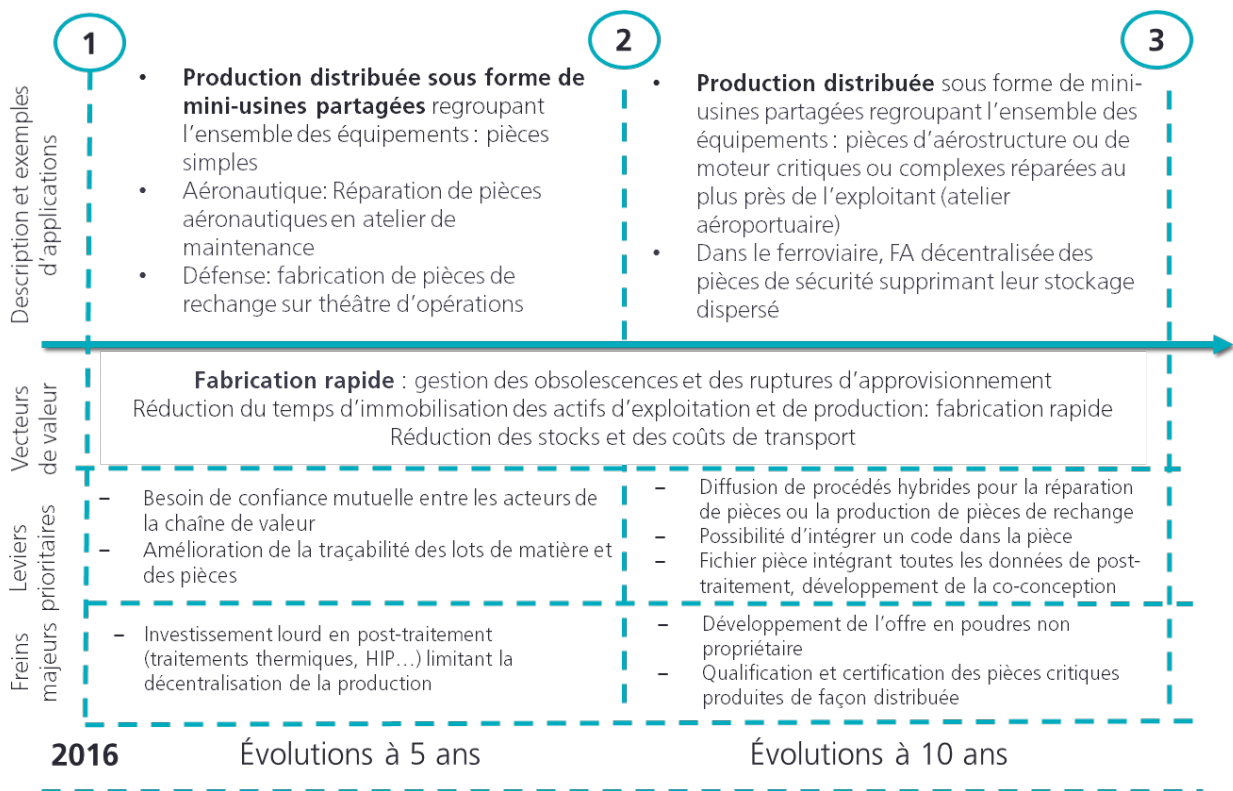


Figure 39: Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande

### 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'activité 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.**

### Conclusion générale aux scénarios « Autres métaux »

En conclusion, l'analyse des différents scénarios laisse entrevoir le schéma d'adoption suivant vis-à-vis de la fabrication additive métallique :

- à court terme : le prototypage indirect par fabrication d'empreintes de moule et noyaux en sable de façon additive devrait progresser en parallèle d'une généralisation aux parties complexes ou soumises à des contraintes fortes dans les outillages industriels. Dans ce dernier cas, il s'agit en effet de pièces souvent unitaires, moins contraintes au niveau réglementaire et qui permettent d'augmenter les performances de procédés de production plus classiques,
- en parallèle, si quelques démarches de reconception et de développement de nouveaux matériaux ont été commencées dans les secteurs de pointe tels que le spatial ou l'aéronautique, une vraie maturité sur la fabrication additive métallique directe est à développer, notamment via le prototypage de préindustrialisation. Les étapes à franchir et verrous technologiques à lever sont encore nombreux,
- Moyen/long terme : le décollage de la fabrication additive métallique directe peut être entrevu à l'horizon 2020-2022.

Les quatre scénarios sont envisageables mais ont des horizons temporels différents. Les trois premiers ont commencé leur déroulement. Le prototypage a été lancé depuis longtemps et le scénario

d'évolution de la chaîne de valeur, le moins avancé, devrait se mettre en place prochainement. À terme le scénario 3 axé sur les gains de performance serait dominant et seul à pouvoir donner du volume d'activité à la fabrication additive. Il dépend cependant beaucoup de la connaissance approfondie des alliages métalliques, voire du développement de nouvelles nuances adaptées à la fabrication additive, et de l'augmentation de la productivité des machines. Une certaine rationalisation des recherches en métallurgie permettrait de se concentrer un nombre limité à une quinzaine d'alliages répondant à 80 % des besoins des différents marchés.

	Prototypage et expérimentation	Personnalisation	Production série et gain de performance	Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande
Aéronautique		X	XXX Titane, Inconel	XX
Médical		XXX Titane, Co-Cr	XX Co-Cr	XXX
Outils	XXX	X	XX	
Énergie	XX		XX	
Automobile	XX	X	X	

Tableau 11 - Tableau de synthèse scénarios/marchés

## Propositions de recommandations

Les propositions de recommandations listées ci-après reprennent les recommandations émises dans le cadre des volets génériques de l'étude.

### Recommandations génériques qui présentent une pertinence forte pour le volet 8 :

- prendre les caractéristiques des alliages et formulations issus des procédés traditionnels et adapter leur composition pour faire de la fabrication additive,
- créer une dynamique collective pour mutualiser les moyens et avancer plus vite dans la caractérisation des alliages et des formulations,
- anticiper les problématiques de fin de vie et l'obsolescence des procédés et/ou matériaux.

### Recommandations spécifiques aux matériaux métalliques hors aluminium :

- dans l'aéronautique au niveau européen, unifier les cahiers des charges actuellement avec des spécifications différentes, éventuellement en s'appuyant sur le Gifas,
- certains alliages ont été mis de côté pour les procédés conventionnels : les reprendre en fabrication additive et les étudier, en choisissant les nuances susceptibles d'atteindre un volume critique de production,
- encourager la recherche dans le domaine de la métallurgie pour développer des nuances « additables ». Prendre en compte la tenue à la fatigue.
- favoriser la recherche pour augmenter les rendements de production de poudres et développer d'autres marchés pour vendre les granulométries hors utilisation en fabrication additive,
- augmenter l'effort de recherche sur les métaux relativement courants (aciers inox) applicables à la fabrication additive,
- sensibiliser et former les concepteurs « métal » à la fabrication additive et intégrer la notion de matériaux et de calcul au métier de la conception,
- pour les applications médicales, développer un mode de financement indépendant des limitations imposées par le système de santé,
- allier les compétences en métallurgie et en mécanique au niveau de la formation,
- coordonner les efforts et les financements publics et privés au niveau régional et national comme c'est le cas dans d'autres pays.

# BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] Adeline Riou, ERASTEEL, "EAMG current and future activities: Éducation, Promotion & Networking", Reims, octobre 2015
- [2] État des lieux de la Fabrication Additive, Benoît Verquin, Cetim, 1er Symposium Fabrication Additive, 26 novembre 2015
- [3] Dossier d'instruction Cetim, Fabrication additive pour commission professionnelle Découpage et Formage des Métaux en feuilles, Christophe Reynaud, mars 2016
- [4] Dispositifs médicaux - Fabrication additive pour l'orthopédie, Cetim rapport n°085250, Jean-Marc Belot, Benoît Verquin
- [5] 3D Printing & Additive Manufacturing In The Aerospace & Defence Market 2015-2025 - Top Companies In Prototyping, Manufacturing & Processes, Finished Parts
- [6] L'impression 3D : Porte d'entrée dans l'industrie du 21<sup>e</sup> siècle, Joël Rosenberg, Conseil général de l'Armement, Pascal Morand, CCI Paris Île-de-France, Dominique Turcq, Institut Boostzone, septembre 2015
- [7] Next Generation Additive Manufacturing, PM 2015 Special Interest Seminar, Reims, 7 octobre 2015, EPMA-Roland Berger
- [8] Du prototypage rapide à la fabrication directe, J.-Y. Hascoët, P. Mognol, Irccyn, Nantes
- [9] Fabrication additive de métaux : parachèvements, finitions, traitements thermiques, Note de veille Cetim
- [10] Fabrication Additive Métallique, Technologies et Opportunités, étude financée par Normandie AeroSpace, INSA Rouen, Département Mécanique et Centre Commun d'Usinage, avril 2015
- [11] Wohlers Report 2016
- [12] Matériaux disponibles en fabrication additive, version 2, Paul Calves, Cetim, 9Q291, avril 2016
- [13] Fabrication additive de composites à matrice titane par fusion laser de poudre projetée, Sebastien Pouzet, thèse, École nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015.
- [14] Introduction to Additive Manufacturing Technology, A guide for Designers and Engineers, European Powder Metallurgy Association 2015, 1st Edition
- [15] Powders for Additive Manufacturing © Höganäs AB (Publ.), September 2015.
- [16] Billet d'étonnement "Journée technique Cetim sur la fabrication additive", Saint-Étienne, 6 novembre 2015, Christian Puget, ARDI Rhône-Alpes
- [17] 3D manufacturing in Safran: managing a disruptive technology, Thierry Thomas, Vice president Safran Additive Manufacturing, 2015
- [18] Arcella, F.; Abbott, D. H.; House, M. A.: Titanium Alloy Structures for Airframe Application by the Laser Forming Process. Alexandria: 2000: 1465-2000.
- [19] Document Fraunhofer IWU - Implants with inner functional cavities
- [20] New features and functions in implants through an innovative design approach and additive manufacturing (Laser Beam Melting), Thomas Töppel, Fraunhofer IWU Chemnitz/Dresden, Master Class Biomedical applications of additive manufacturing, Sirris, 12 mars 2013
- [21] Faisabilité technico-économique de fabrication additive de pièces de pompes. Fabrication de démonstrateurs : Inducer par DMD et Roue par EBM, Florence Doré, rapport 077365, juin 2015
- [22] Dossier de veille Cetim : Fabrication additive Benelux RapidPro 2016, du 1er au 3 mars 2016 à Veldhoven
- [23] Dossier d'instruction fabrication additive et forge, Paul Calves, Cetim, rapport 067444, février 2014
- [24] BeAM, la French touch en fabrication additive, Machines Production n°975, mars 2014
- [25] Partenariat BeAM-Fives en fabrication additive, Machines Production n°991, février 2015
- [26] Fabrication additive métallique : les acteurs - Parachèvements, finitions, traitements thermiques et de surface, Jean-Marc Bélot, Cetim, A3TS, 2 décembre 2015
- [27] VDW Study Additive manufacturing - Opportunities and risks from the perspective of the German machine tool industry, METAV 23-02-16

- [28] Olivier Kerbrat, Florent Le Bourhis, Pascal Mognol, Jean-Yves Hasco et. Environmental Impact Assessment Studies in Additive Manufacturing. Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing, 2, pp.31-63, 2016, Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes, 978-981-10-0606-7.
- [29] M. Baumers, C. Tuck, R. Hague, I. Ashcroft, and R. Wildman, —A comparative study of metallic additive manufacturing power consumption, in Solid Freeform Fabrication Symposium, 2010, pp. 278–288

# ANNEXES

---

## Analyse de pièces

### Analyse du cas des aubes de turbines

#### Introduction

L'analyse est ici menée sur le cas des aubes de turbines, qui sont des pièces aéronautiques complexes qui mesurent environ 200 x 50 x 20 mm et qui pèsent jusqu'à 500 g. Elles sont actuellement réalisées par le procédé de cire perdue et posent de nombreux problèmes à leur fabricant tant par la complexité du procédé que la qualité attendue pour ce type de pièce. Les fabricants pensent déjà à réaliser ces pièces en fabrication additive afin d'optimiser au mieux leur production, de limiter les rebuts et également de réduire les coûts de fabrication. La maturité du procédé reste encore à démontrer : en effet, qualifier des aubes de turbines, des pièces dites critiques, nécessite du temps pour réaliser les essais et un coût non négligeable et s'avère être un frein important au déploiement de cette technologie dans l'aéronautique.



#### Comparaison avec les procédés conventionnels

Les aubes de turbines sont traditionnellement fabriquées par le procédé de moulage cire gravité avec une cadence moyenne de plusieurs centaines d'unités par jour et pour des volumes de série de plusieurs milliers par an. Les matériaux le plus souvent utilisés sont les bases titane ou inconel et les opérations de mise en forme sont généralement réalisées au sein d'une chaîne de fabrication directement intégrée chez les motoristes. L'ordre de grandeur du prix d'une aube de turbine est de plusieurs milliers d'euros (2 000 à 5 000 €) par pièce.

#### Motivations à l'adoption de la fabrication additive

Les aubes de turbines équiaxes sont des pièces importantes du moteur soumises à de très hautes températures. Elles intègrent un système de canaux de refroidissement internes complexes et difficiles à mettre en œuvre avec le procédé de cire perdue actuel. En plus de ces difficultés, les exigences de qualité liées à une pièce critique sont importantes et nécessitent un contrôle à chaque étape de la fabrication. De plus, le procédé de cire perdue reste très manuel ce qui le rend moins robuste et plus difficile à maîtriser.

La fabrication additive d'aubes de turbine permettrait de réaliser les géométries complexes des canaux de refroidissement sans surcoûts tout en laissant la possibilité de complexifier d'avantage la géométrie afin d'avoir des performances moteur encore plus grandes sans pour autant alléger les pièces. L'apport de la fabrication additive est de pouvoir optimiser encore plus le système de refroidissement des aubes de turbines pour pouvoir augmenter leurs performances. Le post-traitement lié à la fabrication additive est différent de celui en fonderie cire perdue mais est toujours présent. La maîtrise de la qualité du procédé de fabrication par voie additive semble atteignable du fait d'une automatisation plus complète du procédé de fabrication additive par rapport au moulage en cire perdue. Tout comme la production des aubes de turbines est internalisée en fonderie cire perdue, la production en fabrication additive devrait, à moyen terme, également rester en interne des motoristes en tant que savoir-faire et compétence spécifiques. Un impact sur le développement de nouvelles géométries d'aubes pourrait également être constaté car le couple – délais de réalisation de prototype/coût – semble avantageux.

Les procédés de fabrication additive sur lit de poudre tels que la fusion par faisceau d'électrons et la fusion laser sont des technologies qui commencent à être répandues et maîtrisées sur le marché français. Les motoristes travaillent sur cette technologie depuis plusieurs années déjà avec pour but de qualifier le procédé et de pouvoir améliorer les performances de leurs moteurs. Dans un futur proche,

les fabricants d'aubes de turbines ne semblent pas vouloir (ou avoir le besoin) de développer de nouveaux matériaux mais plutôt utiliser les matériaux disponibles sur le marché (inconel et titane). La possibilité de développer de nouveaux matériaux (matériaux composites non utilisables en fonderie) afin d'améliorer la résistance mécanique en température des aubes sera très certainement un autre moyen de réponse à la fabrication d'aubes monocristallines, actuellement difficiles à réaliser. La taille des machines, et plus particulièrement celle des plateaux, définit le nombre de pièces réalisables par lot de production et par conséquent le prix des pièces en fabrication additive.

### **Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive**

Aujourd'hui, lorsque l'on compare le procédé de fonderie et la fabrication additive, on s'aperçoit que les retours d'expériences ne sont pas les mêmes. En effet, la fabrication additive métallique est très jeune comparée à la fonderie. Malgré les efforts des grands donneurs d'ordre pour faire avancer cette technologie, il reste de nombreuses inconnues sur le comportement des pièces issues de fabrication additive. Il semble que la technologie soit actuellement limitée davantage par des problèmes de qualification/normalisation aéronautique et de maîtrise de la métallurgie que par des problématiques de coût. Le point, à court terme, le plus problématique est la qualification du procédé d'un point de vue aéronautique pour des pièces aussi critiques que les aubes de turbines équiaxes. C'est un processus souvent très long et exigeant car il faut qualifier le procédé (poudres, machines, répétabilité) et les pièces.

La fabrication additive conduit à une microstructure très différente de la fonderie et ne permet pas de réaliser toutes les aubes de turbines du marché. Les aubes monocristallines sont actuellement réalisées en fonderie avec une structure très liée au procédé de fonderie (vitesse de solidification très lente). Sur du court ou moyen terme il semble très complexe de pouvoir réaliser des aubes de turbines monocristallines en fabrication additive. D'un point de vue plus industriel, les machines actuellement sur le marché ne sont pas prévues pour réaliser de la production de pièces en série. L'outil industriel autour de cette technologie reste à construire.

D'ici cinq ans, un début de production semble envisageable mais reconstruire complètement une nouvelle chaîne de production et un outil industriel (formation, investissement, qualification...) sera probablement plus long. Sur une vision à vingt ans, un basculement quasi-complet de la production d'aubes de turbines équiaxes vers la fabrication additive est une hypothèse envisageable. D'après certaines études, le recours massif à l'impression 3D pour la production de pièces de série ne pourra prendre son envol à moyen / long terme que par l'amélioration des performances, la baisse des prix, la levée des contraintes réglementaires et la conception des produits en fonction des nouvelles possibilités de la technologie.

### **Impacts sur la chaîne de valeur**

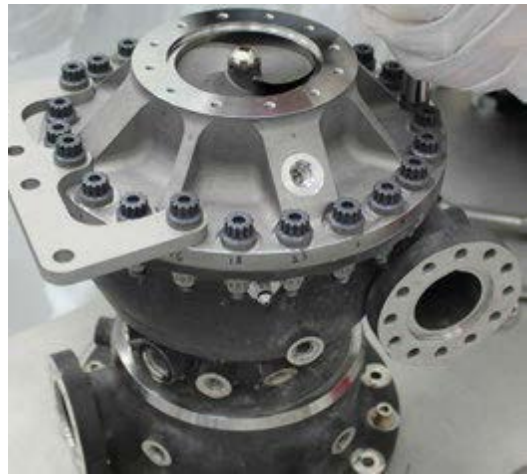
La substitution du moulage en cire perdue par la fabrication additive va littéralement changer la chaîne de valeur, en commençant par le raccourcissement des délais de développement. Les bureaux d'études devront travailler différemment afin d'intégrer les nouvelles règles de conception produit/process et les contraintes issues d'une chaîne numérique profondément transformées (échanges de données...). La production d'aubes de turbines est aujourd'hui complètement réalisée chez les motoristes dans des fonderies intégrées. Au vu des enjeux autour de ces pièces moteur, il semble peu probable que les motoristes souhaitent externaliser la production en fabrication additive. Précisons quand même qu'en fabrication additive, si le nombre d'opérations manuelles diminue et que le procédé est plus répétable, la production serait plus facile à délocaliser. Le passage de la fonderie à la fabrication additive réduira le nombre d'étapes de fabrication, le nombre d'opérations ainsi que d'acteurs (fournisseurs, métiers). Sur ce type de pièce, petite et complexe, la fabrication additive est concurrente à la fonderie cire perdue et pourrait à long terme la remplacer. La production sera beaucoup plus automatisée et avec de nouveaux moyens de fabrication ; il faudra former et organiser le personnel des usines actuelles de façon à ne pas manquer de compétences.



## **Analyse du cas d'un corps de pompe**

### **Introduction**

L'analyse est ici menée sur le cas des corps de pompes, qui sont des pièces de fonderie (fonte ou acier) de moyenne dimension (environ 600 x 400 x 200 mm et jusqu'à 150 kg) réalisés en moulage sable et intégrant des noyaux pouvant être complexes. Il y a plusieurs types de carter de pompes, dont ceux qui n'auront jamais leur chance en fabrication additive car ils ne sont pas volumineux, peu complexes et dans des matériaux peu onéreux. Néanmoins, dans certains secteurs comme l'aéronautique, le spatial ou le nucléaire, on peut retrouver des pièces très complexes avec des circuits de refroidissements intégrés et des fonctions spécifiques. Deux technologies de fabrication additive peuvent être envisagées pour ces carters de pompe : la réalisation de la pièce ou d'une partie de la pièce par projection de poudre métallique et le prototypage de noyaux en sable. La technologie de projection de poudre n'est pas encore assez évoluée pour de la construction de pièces mais la fabrication de noyaux semble technologiquement abordable. Les coûts de réalisation de noyaux restent cependant relativement élevés par rapport à la fabrication traditionnelle.



### **Comparaison avec les procédés conventionnels**

Les corps de pompes sont traditionnellement fabriqués par moulage sable par gravité avec une cadence moyenne inférieure à 100 unités par jour et pour des volumes de série de plusieurs milliers par an. Les matériaux le plus souvent utilisés sont la fonte GS et GS dopée nickel ou encore l'acier. Les opérations de mise en forme sont régulièrement réalisées au sein de fonderies indépendantes. L'ordre de grandeur du prix d'un corps de pompe tel qu'il est décrit est de 500 à 1 000 € par pièce. Les coups d'outillage représentent environ 5 % du prix total.

### **Motivations à l'adoption de la fabrication additive**

La fabrication additive sable ou métallique permettrait l'intégration de fonctions dans le corps des pompes haut de gamme (circuits de refroidissement complexes, réduction du nombre d'assemblages, diminution de la masse). De plus, avec la fabrication additive métallique, le matériau du corps de pompe devra évoluer car la fonte n'est pas envisageable en fabrication additive. Pour la maintenance, le fait d'intégrer des fonctions et de diminuer le nombre de pièces aura une tendance positive du fait d'une diminution des risques associés aux phases d'assemblage.

Les coûts inhérents aux procédés de fabrication additive sable ou métallique sont élevés par rapport à la fonderie, ce qui positionne difficilement ces technologies pour une production série de pièces. Il serait également envisageable de réaliser en fabrication additive métallique des parties de pièces complexes dans un matériau plus noble que la fonte et de les insérer à la coulée.

D'un point de vue économique et des besoins techniques, la fabrication de noyaux en sable est réaliste pour du prototypage, de très petites séries (<20 pièces) et des produits haut de gamme dans des secteurs à forts enjeux (spatial, nucléaire...). Deux procédés de fabrication additive sont envisageables : la projection de poudre (CLAD) pour réaliser des corps de pompe bimatériaux, et le prototypage 3D sable pour fabriquer des noyaux ou des parties de moules non réalisables par voie traditionnelle. En effet, pour des corps de pompe bimatériaux, il serait intéressant d'avoir un matériau métallique au contact du fluide qui résiste fortement à la corrosion (eau, produits chimiques, ...). Toutefois, si l'on prend en compte la géométrie de la pièce (zones internes difficiles à atteindre par le CLAD) ou il faut assurer l'étanchéité et les états de surface ainsi que l'aspect économique (faible valeur ajoutée technique) cette solution semble difficilement industrialisable.

Les séries n'étant pas très importantes, le prototypage de noyaux en sable pour intégrer des fonctions semble à terme plus réaliste. Le prototypage en sable est aujourd'hui un procédé maîtrisé pour les

résines furaniques et phénoliques mais ce dernier reste cher. Il est nécessaire d'identifier ainsi une application technique à forte valeur ajoutée.

### **Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive**

D'un point de vue technologique, en fabrication additive métallique, la fonte (qui est un matériau utilisé par les fondeurs) n'est pas disponible et ne semble pas un bon candidat pour la fabrication additive. Cela implique un changement de matériau ou le développement d'un nouvel alliage.

Le procédé CLAD n'est pas très développé pour la fabrication de pièces et les coûts associés à ce procédé sont importants. La fabrication additive reste un procédé peu adapté pour de grosses pièces (>100 kg).

La fabrication de noyaux sable prototypés est technologiquement réalisable mais encore couteuse (500 – 600 €). En effet, le prix de pièces en fonte réalisées en fonderie sable est très bas (500 à 1 000 €) si on le compare à de la fabrication additive sable ou métallique.

Sur du long terme, la fabrication additive directe (CLAD ou SLM) sera envisageable seulement pour des applications spécifiques à forte valeur ajoutée. La fabrication bimatériau à partir du procédé CLAD a un avenir mais il sera nécessaire de développer les machines et les logiciels de contrôle de trajectoires avant de pouvoir fabriquer des pièces complexes de grande dimension.

Il y a de fortes chances que dans cinq à dix ans, les prix de noyaux soient plus bas et conviennent pour des petites séries de pièces (15-30 pièces).

### **Impacts sur la chaîne de valeur**

L'utilisation de la fabrication additive métal aura un fort impact sur la chaîne de valeur car elle viendra prendre des parts de marché aux fondeurs. Le changement de matériau imposera de redimensionner le corps de pompe et de revoir la conception des systèmes de refroidissement interne.

Le prototypage de noyaux en sable aura quant à lui un impact uniquement mesurable en production car les machines d'impression de sable sont généralement intégrées dans les fonderies et viennent seulement améliorer la chaîne de production. Les fonderies devront s'équiper de machines ou sous-traiter la réalisation des noyaux. L'impression 3D facilitera la maintenance car les pièces pourront être réalisées dans des fonderies utilisant l'alliage de la pièce. De plus, il sera plus facile de reproduire la pièce alors qu'elle n'est plus fabriquée (pas d'outillages perdus ou à refaire).

## Un exemple de combinaison matériaux/procédés/marché : cas des alliages métalliques utilisés pour le Médical

Marché		Médical	
Technologie		Fusion lit de poudre	Impression 3D sans fusion
Familles d'alliages	Bases Fer		
	Alliages Ni		
	Cr-Co	1 Cotyles de prothèses de hanche. 2 Autres constituants de prothèses (hanche, genou, etc.). L'intérêt est la structure lattice. Surtout par EBM	Certaines prothèses sont faites en LS (Laser <i>Sintering</i> ) : c'est un des trois grands procédés
	Titane	Le plus représenté en médical (prothèses de hanche, genou, pied, cheville, rachis, épaule), en particulier Ti poreux. Par EBM, LBM ou LS.	Certaines prothèses sont faites en LS (Laser <i>Sintering</i> ) : c'est un des trois grands procédés
	Niveau de maturité par marché	TRL 9	TRL 9
	Moteurs	Lien opérationnel scannage-conception-fabrication. Texturation poreuse, lattice pour l'ostéo-intégration. Déjà des séries réalisées	Idem fusion lit de poudre
	Freins	Encore des difficultés d'industrialisation. Demande et remboursement si c'est plus cher. Système d'accréditation	Idem fusion lit de poudre

**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.