

ÉTUDES ÉCONOMIQUES

PROSPECTIVE

Futur de la fabrication additive

Focus sur les alliages d'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)

DGE
DIRECTION GÉNÉRALE
DES ENTREPRISES

cget
Commissariat
général
à l'égalité
des territoires

PIPAME
Pôle interministériel de prospective et d'anticipation
des mutations économiques

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 alliages d'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

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

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

Représenté par :

Julien BAJOLET, responsable Ligne Programme
R & D fabrication additive

CTTC : CENTRE DE TRANSFERT DE TECHNOLOGIES CERAMIQUES

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

Représenté par :

Grégory ETCHEGOYEN, directeur du CTTC

CTIF : CENTRE TECHNIQUE INDUSTRIEL FONDERIE

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

Représenté par :

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

YOUFACTORY

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

Représenté par :

Jean NELSON, cofondateur

REMERCIEMENTS

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

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

INTRODUCTION	9
ÉTAT DE L'ART ET DÉFIS TECHNOLOGIQUES DE LA FABRICATION ADDITIVE DE L'ALUMINIUM	9
Les technologies existantes appliquées à l'aluminium	9
Faisabilité par alliage	14
Freins relatifs au procédé de mise en forme de l'aluminium	19
Réflexions en cours	22
DÉVELOPPEMENTS ACTUELS AU NIVEAU MONDIAL	26
ÉTUDE DES PRODUITS AU STADE DE L'INDUSTRIALISATION	27
LA FABRICATION ADDITIVE ALUMINIUM : UN MODÈLE ÉCONOMIQUE À VALIDER	28
Degré de pénétration dans les principaux marchés d'application : aéronautique, automobile, spatial et défense	28
Freins économiques au développement de la technologie	31
COMPARAISON AVEC LES AUTRES MATÉRIAUX ET LES TECHNIQUES DE FABRICATION CONVENTIONNELLES	32
CONCLUSION GÉNÉRALE	36
DESCRIPTION DES SCÉNARIOS PROSPECTIFS	37
Scénario 1 – Prototypage et expérimentation	37
Scénario 2 – Industrialisation de la personnalisation	40
Scénario 3 – Production série et gain de performance	41
Scénario 4 – Evolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande	44
Conclusion générale aux scénarios aluminium	45
PROPOSITIONS DE RECOMMANDATIONS	46
BIBLIOGRAPHIE	48
Annexes	50
Glossaire	51

Introduction

La métallurgie de l'aluminium et de ses alliages a connu en France un développement historique au niveau scientifique et technique majeur. Il s'en est suivi un essor industriel important tant en termes de production de métal que d'utilisation de l'aluminium dans de nombreuses branches manufacturières. Comme les autres matériaux métalliques, l'aluminium est depuis longtemps mis en œuvre par les procédés conventionnels de mise en forme que sont l'usinage, le forgeage ou le moulage. Les propriétés intrinsèques de ce métal en font un objet de réflexion à part. Particulièrement léger et recyclable à l'infini, il dispose de nombreux atouts pour satisfaire les besoins d'économie d'énergie dans les transports et de réduction des gaz à effet de serre qui en découlent. En revanche son aptitude à être usiné, sa température de fusion relativement basse, rendent les procédés industriels conventionnels pertinents, d'autant plus que ceux-ci se perfectionnent. En ce sens, la fabrication additive aluminium est aujourd'hui à un stade de développement beaucoup moins avancé que les polymères, les alliages de titane ou les bases nickel. Si la production de matière métallique par fabrication additive commence à émerger pour ces dernières nuances, les producteurs d'aluminium n'ont pas encore identifié un engagement fort des utilisateurs tels que les constructeurs aéronautiques ou automobiles dans la mesure où ce matériau semble avoir une pertinence à démontrer vis-à-vis de la fabrication additive, par exemple pour satisfaire à une qualification aéronautique ou en raison de sa limitation à des pièces non critiques en après-vente. En revanche, le poids économique de ces derniers, la relative jeunesse de leur métallurgie par rapport à celles des aciers, leur potentiel d'applications dans des produits futurs justifient l'étude approfondie des relations entre fabrication additive et alliages d'aluminium. Le gain de masse a pu en effet être démontré sur certaines niches de marché pour des pièces bien particulières au prix d'un effort de reconception. De nouveaux alliages présentant des caractéristiques physiques et mécaniques équivalentes aux grandes familles (2 000, 7 000, etc.) doivent être investigués car les nuances qui peuvent être mises en œuvre par fabrication additive sont actuellement limitées. Après avoir analysé les techniques de fabrication additive susceptibles d'être appliquées à l'aluminium et dressé un panorama des principaux alliages, ce volet a pour objectif d'évaluer la place actuelle de la fabrication additive pour la mise en œuvre de l'aluminium et des évolutions envisageables selon différents axes de lectures, à savoir la faisabilité technologique, le niveau de pénétration du marché, la compétitivité par rapport aux autres matériaux ou encore les impacts économiques.

État de l'art et défis technologiques de la fabrication additive de l'aluminium

Les technologies existantes appliquées à l'aluminium

Il existe plusieurs technologies de fabrication additive réparties en sept classes de procédés dans la norme. Ne seront traités ici que les procédés utilisés avec l'aluminium ou dont l'emploi est envisageable. Les procédés de fabrication additive par fusion de matière sont actuellement les plus connus et les plus utilisés pour l'ensemble des métaux, y compris l'aluminium. Parmi ces procédés, on distingue plusieurs technologies selon le type de matière brute et la source d'énergie utilisés pour former la pièce. Selon ces deux critères, il existe plusieurs catégories listées ci-dessous.

- **La fabrication par fusion laser sur lit de poudre (SLM, DMLS). Cette technologie est la plus largement utilisée pour mettre en forme des alliages d'aluminium.** Actuellement le standard en termes de machine correspond à un volume de fabrication de l'ordre de 27 dm³ et un laser Nd:YAG d'une puissance de 400 W. On peut notamment citer la machine SLM 280 HL du constructeur SLM SOLUTIONS, dont est équipé le Cetim-Certec. On peut estimer à 80 % la part prise par ce procédé dans la fabrication additive en aluminium.

- **La fabrication par fusion avec un faisceau d'électron sur lit de poudre (EBM).** Le principal constructeur est Arcam. Le fonctionnement de cette technologie est similaire à celui de la fusion laser sur lit de poudre. La différence est qu'un ou plusieurs passages du faisceau d'électron défocalisé sont effectués sur le lit de poudre pour chauffer celui-ci et fritter partiellement la poudre. Aussi, le processus de fabrication est effectué sous vide, ce qui permet de chauffer le lit de poudre à des températures plus importantes puisqu'il y a moins de risque d'oxydation de la matière. Les contraintes résiduelles dues aux cycles de fusion/refroidissement rapides sont ainsi diminuées. De même, la quantité de gaz neutre utilisée par *le process* est très faible, ce qui constitue une économie¹. Des essais de mise en œuvre d'alliages d'aluminium ont été effectués pour cette technologie, mais les résultats sont peu intéressants². De même, le constructeur Arcam ne commercialise pas à ce jour de poudres d'alliages d'aluminium, **ce qui peut laisser penser qu'il existe actuellement peu d'applications industrielles** pour mettre en forme des alliages d'aluminium avec cette technologie, comme des supports d'antenne de satellite. Par ailleurs Arcam a développé en 2015 avec la filiale italienne Avio de General Electric la fabrication additive d'aubes de turbine de moteurs d'avion en aluminure de titane. Cependant ces matériaux intermétalliques sont très différents des alliages d'aluminium conventionnels. General Electric a annoncé en 2016 son intention de racheter deux constructeurs de machines de fabrication additive, Arcam et de SLM Solutions, dans l'optique d'être *leader* dans la fabrication additive métal.

Constructeurs de machines de fabrication additive

Les principaux constructeurs de machines permettant la fabrication additive en aluminium sont indiqués dans le *Tableau 1* suivant, par ordre décroissant du nombre total de machines vendues à fin 2015, sans préjuger de leur utilisation pour l'aluminium.

Constructeurs	Procédés	Pays	Nbre ventes en 2015	Nbre ventes total
3D System	frittage direct	États-Unis	1 925	12 688
EOS	lit de poudre	Allemagne	370	2 132
ConceptLaser	lit de poudre	Allemagne	161	539
Optomec	Projection poudre	États-Unis	63	313
SLM Solutions GmbH	lit de poudre	Allemagne	102	225
Trumpf	Projection poudre, lit de poudre	Allemagne	32	156
Realizer	lit de poudre	Allemagne	19	104
Renishaw	lit de poudre	Royaume-Uni	39	101
Farsoon	lit de poudre	Chine	35	77
OPM Lab, filiale de Sodick	hybride lit de poudre et usinage	Japon	37	47
Matsuura	hybride lit de poudre et usinage	Japon	12	37
BeAM en partenariat avec FMAS	Projection poudre	France	5	12
Bright Laser Technology	lit de poudre	Chine	9	12
Sentrol	lit de poudre	Corée du Sud	10	10
Sciaky	procédé arc-fil	États-Unis	3	6
Fabrisonic	Consolidation ultrasonique	États-Unis	0	5
Additive Industries b.v.	lit de poudre	Pays-Bas	1	1
Fives Michelin Additive Solutions ³ FormUp™	lit de poudre	France	Lancement 2016	

¹ D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk et C. Emmelmann, Additive manufacturing of metals, Acta Materiala, pp. 371-192, July 2016.

² T. Mahale, D. Cormier, O. Harrysson and K. Ervin, "Advances in electron beam melting of aluminum alloys" 2007.

³ http://www.addupsolutions.com/content/uploads/2016/10/FIVES_ADDUP_FORMUP350_FR.pdf

Tableau 1 - Principaux constructeurs de machines permettant la fabrication additive en aluminium (d'après Wohlers 2016⁴)

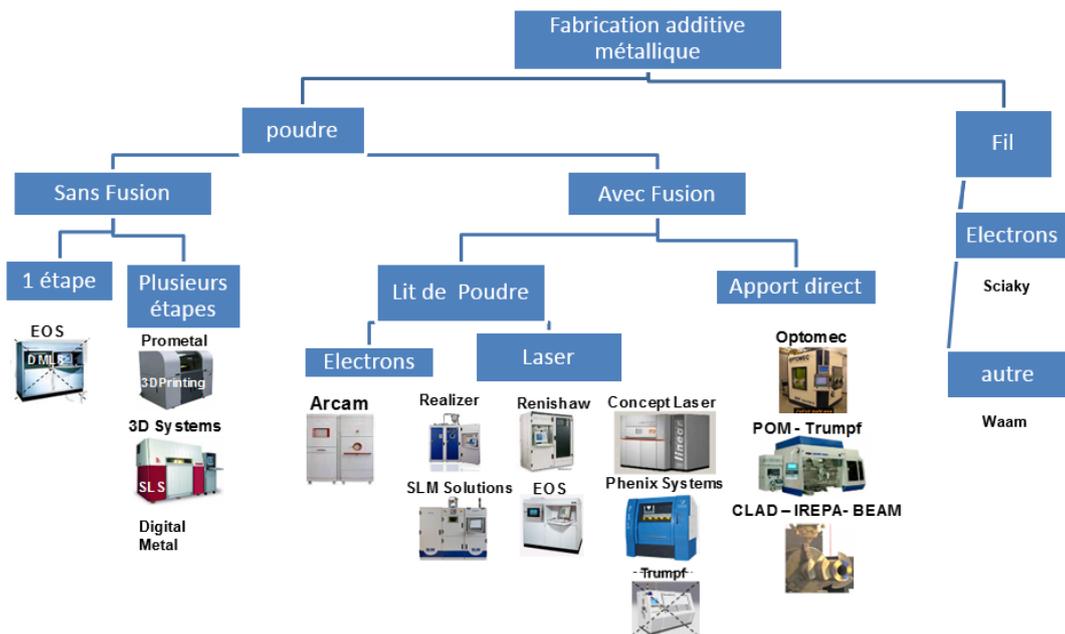


Figure 1 - Principaux constructeurs de machines de fabrication additive par procédé

- **La fabrication par projection de poudre (dont les noms commerciaux sont : CLAD, LENS, DMD, LC, DLF).** Les principaux fabricants de machines sont Optomec, POM, TRUMPF, HUFFMAN et BeAM. Les machines comportent une enceinte de fabrication qui est hermétiquement fermée et remplie de gaz neutre. La poudre est projetée sur une pièce à travers une buse. Dans le même temps, celle-ci est chauffée par une source laser au-delà de son point de fusion. Le dépôt créé fait croître la pièce petit à petit. Certaines machines permettent de positionner la pièce selon plusieurs axes, ce qui permet la création de géométries complexes, sans qu'il soit nécessaire d'inclure des supports. S'il n'est pas certain que des pièces en aluminium soient aujourd'hui réparées avec ce procédé (le coût pour refabriquer le produit étant vraisemblablement moins élevé), la technologie de projection de poudres le permet.
- **La fabrication par dépôt de fil dont le principal fabricant est Sciaky.** Les machines utilisent comme source de chaleur un faisceau d'électron (EBAM), un laser, ou un arc-électrique (WAAM). Avec cette technologie, la pièce est fabriquée par un empilement de cordons de métal fondu. Cette technique **ne permet pas d'atteindre une aussi bonne précision géométrique que celles obtenues avec les procédés précédents** et il n'est pas possible de réaliser des pièces aussi complexes. **Toutefois, sa vitesse d'ajout de matière est plus importante**, ce qui permet de fabriquer des pièces plus rapidement. Cette technologie permet également de fabriquer des pièces plus volumineuses, de plusieurs mètres d'envergure. Un intérêt de cette technologie est que 100 % de la matière première engagée est utilisée sur la pièce et qu'il n'y a pas de pollution de l'environnement ou de risque pour l'opérateur à cause de la poudre. De même, la matière première sous forme de fil présente un coût moins important que celui de la poudre et une plus grande disponibilité⁵. Pour toutes ces raisons, cette technologie est actuellement l'objet de nombreux travaux de R & D en raison du modèle économique satisfaisant qui pourrait être le sien pour certaines pièces.

Les technologies exposées précédemment concernent les alliages d'aluminium, les aciers, les alliages de titane, les alliages Co-Cr...

⁴ T. Wohlers, Wohlers Report 2016.

⁵ D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 465-481, May 2015.

Les procédés de frittage de poudre métallique ne sont pas abordés car ils sont peu utilisés et ne fonctionnent pas très bien sur les alliages d'aluminium. En effet, la poudre d'aluminium présente naturellement une fine couche d'alumine en surface (oxyde d'aluminium) qui si elle n'est pas éliminée lors du *process*, dégrade fortement les propriétés mécaniques de la pièce finie. Or la température de frittage des alliages d'aluminium est inférieure à 660°C (température de fusion de l'aluminium) et la température de fusion de l'alumine est de 2 040°C, ce qui implique que l'oxyde n'est pas évacué lors du frittage.

Technologies « hybrides » de fabrication additive

Il existe des technologies « hybrides » de fabrication additive, pour **lesquelles des opérations d'enlèvement ou de mises en forme de matière sont intégrées dans les processus de construction des pièces**. Ces procédés reprennent les techniques de fabrication additive exposées précédemment, ou mettent en œuvre des techniques différentes. Ces procédés sont généralement moins bien connus⁶. Ils sont exposés ci-dessous :

- Le procédé de fabrication par dépôt de fil peut **intégrer une étape d'écrouissage à froid sur chaque cordon déposé**, par l'intermédiaire d'un rouleau se déplaçant sur la partie haute du cordon en appliquant une contrainte⁷. Cette technique diminue sensiblement la vitesse de fabrication mais permet d'obtenir des pièces plus denses, présentant de meilleures caractéristiques mécaniques. Les applications principales sont identiques à celles visées par le procédé de dépôt de fil : pièces de structures aéronautiques comme des réservoirs de carburant, coque, fuselage, etc.
- La fabrication additive par **consolidation ultrasonique** est également un procédé de fabrication additive hybride un plateau de fabrication est fixé sur la machine, une feuille d'aluminium d'environ 100 µm est étalée sur le plateau par une sonotrode, dont le rôle est d'appliquer une contrainte et de produire des oscillations ultrasoniques, **ce qui permet de créer une liaison solide entre la feuille d'aluminium et le plateau**. Ce processus est répété jusqu'à obtenir la surface consolidée adéquate puis une fraiseuse est utilisée pour enlever le volume superflu et donner la forme voulue. De nouvelles feuilles sont ensuite étalées et le processus est répété jusqu'à atteindre une hauteur de 3 à 6 mm, puis une fraiseuse plus fine est utilisée pour créer les tolérances requises et effectuer la finition de surface. Ces cycles sont effectués jusqu'à ce que l'objet soit terminé. Des applications se trouvent dans les domaines électrique/électronique : joints de batteries ou de piles à combustibles faites de languettes d'aluminium ; dans l'automobile et l'aéronautique ; *packaging* pour sceller des contenants. **L'avantage de cette technique est que l'on n'a pas besoin d'atteindre la température de fusion de l'aluminium pour le mettre en forme ce qui permet de dépenser peu d'énergie**, et d'introduire moins de contraintes et de déformations résiduelles. Comme le souligne le rapport UC Rusal – Global Aluminium Industry Overview, John Hannagan, si des efforts sont faits en termes d'économie d'énergie, le problème de la consommation et des émissions lors de la production ou de la mise en forme d'aluminium reste un des principaux challenges pour les années à venir. De plus le procédé est relativement rapide, automatisable, il ne requiert pas l'utilisation d'un environnement particulier, il offre la possibilité d'introduire des renforts sous forme de fibres entre les feuilles d'aluminium et il permet de créer des structures multimatériaux. **Toutefois, le *process* est encore mal maîtrisé**, il ne permet pas une liberté géométrique aussi importante que pour les technologies de fabrication additive sur lit de poudre, et il est plus consommateur en termes de matière première^{8,9}. Les freins actuels de cette technologie sont qu'elle est relativement peu connue, et il existe peu de données

⁶ D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 465-481, May 2015.

⁷ J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, P. Ma and Y. Zhai, "The effect of inter-layer cold working and post deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys," Journal of material processing technology, no. 230, pp. 26-34, 2015.

⁸ F. C. Inc., "The Fabricator," 2016. [Online]. Available: <http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/understanding-ultrasonic-welding>. [Accessed 05 24 2016].

⁹ G. S. Kelly, S. M. Just, S. G. Advani and G. W. Gillespie, Energy and bond strength development during ultrasonic consolidation, Journal of materials processing technology, no. 214, pp. 1665-1672, 2014.

concernant la tenue mécanique de pièces fabriquées avec ce procédé dans le cas de pièces nécessitant une forte résistance mécanique ou une forte dureté.

- Enfin il faut citer le procédé combiné de dépôt de poudre et d'usinage. Ainsi, le constructeur japonais Matsuura commercialise la machine LUMEX Avance-25 qui introduit une fraiseuse dans une machine de fusion laser sur lit de poudre. **La fraiseuse usine la pièce après une ou plusieurs opérations de fusion de couche**, ce qui permet de limiter les opérations de post-traitements. Mais l'inconvénient de ce procédé est l'introduction de copeaux d'usinage dans le lit de poudre, ce qui peut poser des problèmes de recyclabilité de la poudre, et de mise en couche. Ce procédé n'est à ce jour pas indiqué comme traitant l'aluminium.

Autres technologies

- La fabrication par empilement de strates métalliques aussi appelée **stratoconception**, consiste en la décomposition automatique d'une pièce en une série de couches élémentaires appelées strates, dans lesquelles des inserts de positionnement sont placés. **Au cours d'une opération en amont du procédé de fabrication additive, chacune des strates est mise en panoplie puis fabriquée par microfraisage ou découpe laser à partir d'aluminium en plaques.** Les éléments sont ensuite assemblés à partir de colles spécifiques, par brasage ou par vissage, afin de constituer la pièce finale. Cette technologie présente des applications dans la réalisation de prototypes et de moules d'injection plastique mais **ne permet pas de fabriquer des pièces pour lesquelles de bonnes propriétés mécaniques et un bon aspect de surface sont attendus.** Un inconvénient de cette technologie est que le *process* n'est pas reproductible puisque la qualité finale de la pièce dépend fortement de la technique d'assemblage et de la qualité du travail de l'opérateur. De plus, des défauts de planéité et de liaison entre les strates sont susceptibles d'apparaître et le processus d'assemblage est difficilement automatisable¹⁰. Il convient enfin de noter ici les importants efforts de développement du Cirtes en France qui a considérablement amélioré le ratio précision/taille de la pièce avec son procédé breveté et qui voit aujourd'hui une grosse partie de son activité tirée par des moules et outillages de grande taille.

En termes d'utilisation le procédé de fusion par laser est le procédé largement dominant pour la mise en forme des alliages d'aluminium par fabrication additive. Cette technologie est cependant pénalisée par sa faible productivité. Les procédés alimentés en matière par fil sont plus rapides mais moins précis et exigent un important parachèvement.

¹⁰ B. Delebecque, « Intégration de fonctions avancées à l'inter-strate de pièces réalisées par le procédé de Stratoconception » Université Henri Poincaré, Nancy, 2007.

Procédés	Avantages	Inconvénients	Utilisation du procédé pour Al	Pièces
Fusion laser sur lit de poudre	Précision, pièces complexes	Faible productivité	Forte	Pièces creuses, structures lattices,
Fusion faisceau d'électrons sur lit de poudre	Faibles contraintes internes, faibles déformations	Taille de pièce très limitée, productivité moyenne	Faible	Pièces creuses, structures lattices,
Fusion avec projection de poudre	Productivité moyenne élevée	Rugosité élevée	Moyenne	Pièces de moyenne dimension
Dépôt de fil	Productivité élevée	Rugosité élevée, peu apte à la complexité	Faible (peu de machines)	Pièces de grandes dimensions
Dépôt de fil et laminage	Productivité élevée	Rugosité élevée, peu apte à la complexité	Faible (peu de machines)	Pièces de grandes dimensions
Fusion laser sur lit de poudre et fraisage	Post-traitements limités, précision	Problème de l'incorporation de copeaux dans la poudre	Faible, en émergence	Moules et outillages
Stratoconception	Simplicité	Qualité peu reproductible Faible qualité de surface	Limitée à des applications de type moules	Moules de plasturgie Outillage de grande taille
Consolidation ultrasonique	Précision, consommation énergétique faible	Technologie peu connue, tenue mécanique inconnue	Faible (peu de machines, applications particulières)	Joints de batterie, piles à combustible

Tableau 2 - Avantages et inconvénients des différents procédés de fabrication additive.

Faisabilité par alliage

Les alliages d'aluminium qui se mettent en œuvre par technologies de fabrication additive (excepté pour la stratoconception et la consolidation ultrasonique) doivent **présenter de bonnes propriétés de coulabilité et de soudabilité**, et doivent être **peu sensibles à la fissuration lors de la solidification**.

Une liste non exhaustive d'alliages d'aluminium testés en fabrication additive est présentée ci-dessous.

- **L'AlSi12, l'AlSi10Mg, l'AlSi7Mg0,6 et l'AlSi9Cu3** sont des alliages de fonderie de la famille 40 000 qui se mettent en œuvre par fusion laser sur lit de poudre. En effet, ils présentent un taux important de silicium dont l'ajout permet d'éviter la fissuration et de conférer de bonnes propriétés de soudabilité et de coulabilité. Ces alliages sont commercialisés par un ou plusieurs constructeurs et un certain nombre de données bibliographiques est disponible. **L'AlSi5Cu3Mg est également un alliage de fonderie qui a été étudié pour le procédé de fusion laser sur lit de poudre.** Il présente une concentration en cuivre de 3 % causant *a priori* la fissuration, mais la présence de 5 % de silicium permet d'éviter ce problème. Ce dernier présente toutefois de moins bons résultats de mise en œuvre. L'AlSi12 est également mis en œuvre par technique de projection de poudre, et est commercialisé pour ce procédé. L'AlSi10Mg se met en œuvre par technique de dépôt de fil et est commercialisé pour ce procédé.

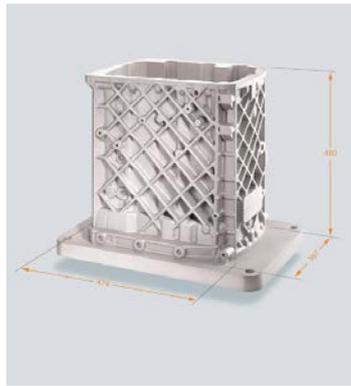


Figure 2 - Enveloppe de transmission mécanique en aluminium AlSi10Mg : réductions de poids, de coût, de temps de fabrication et liberté de conception (source Concept Laser).

Les constructeurs de machine (SLM Solutions, EOS, 3DSystem...) fournissent des poudres adaptées à leur machine et généralement adaptées au *process*.

- Concernant les fournisseurs de poudre qui ne sont pas des constructeurs de machines, les caractéristiques des poudres doivent être spécifiées au fournisseur dans un cahier des charges (CDC).
- Des efforts sont faits par certains fabricants pour adapter la composition des poudres au *process* de SLM : par exemple, TLS Technik fournit par défaut une poudre d'AlSi7Mg0,6 qui contient une concentration en magnésium dans la fourchette haute de la norme car le magnésium a une tendance importante à l'évaporation lors du *process*, ce qui fait que la concentration en magnésium (Mg) de la pièce obtenue en sortie de *process* se situe dans la norme.

Procédés	Type de fournisseurs	AlSi10Mg	AlSi12	AlSi7Mg0,6	AlSi9Cu3
Fusion laser sur lit de poudre	Fournisseur de poudre standard	TLS Technik, Additive metal alloy (AMA), LPW technology	Additive metal alloy (AMA), LPW Technology, ECKA Granules	TLS Technik, , NMD, Valimet, ECKA Granules	
	Constructeurs de machines	SLM Solutions, EOS, Renishaw, Concept Laser, 3D System	SLM Solutions, Concept Laser	SLM Solutions	SLM Solutions
Projection de poudre	LPW Technology	LPW Technology, Optomec	LPW Technology		LPW Technology

Tableau 3 - Liste non exhaustive de fournisseurs des nuances AlSi10Mg, AlSi12, AlSiMg0.6 et AlSi9Cu3

- **Le 1 050A est un alliage de corroyage à durcissement par écrouissage** de la famille 1 000, qui est composé à plus de 99,5 % d'aluminium. Il peut se mettre en œuvre par fusion laser sur lit de poudre. En effet lorsque l'aluminium contient un faible pourcentage d'éléments d'addition, il ne présente pas de problème de fissuration lors de la solidification.
- **Les alliages 2 017A et 2 219 sont deux alliages de corroyage à durcissement structural** de la famille 2 000. Ils ne se mettent pas bien en œuvre par fusion laser sur lit de poudre pour cause de fissuration. Ces résultats sont logiques concernant le 2 017A, réputé difficilement soudable et fissurant lors de la solidification, mais non envisagés pour le 2 219, car sa teneur plus forte en cuivre n'est pas cause de fissuration. Une étude a montré que **le 2 219 se met en œuvre par technique de dépose de fil avec faisceau**

d'électron¹¹. Il en est de même pour l'alliage 2 319 qui possède également une forte teneur en cuivre, propice à l'absence de fissuration. Cet alliage est par ailleurs commercialisé par le constructeur de machines Sciaky. Sciaky développe et promeut cette technologie, en partenariat avec des industriels de l'aéronautique et des universités. Ce procédé n'est cependant pas encore aussi répandu et développé que le procédé SLM.

- **Le 6 061 est un alliage de corroyage** de la famille 6 000, qui est commercialisé pour les technologies de fusion laser sur lit de poudre et de projection de poudre. Il présente toutefois des difficultés de mise en œuvre par fusion laser pour cause de fissuration lors de la solidification. En effet, il est difficilement soudable et fissurant à chaud à cause de son taux de silicium et de magnésium.
- Les alliages 7 020, 7 050 et 7 075 sont des alliages de corroyage de la famille 7 000 possédant une teneur importante en zinc, qui est un élément présentant une évaporation importante lors du processus de fusion laser. Les alliages 7 050 et 7 075 sont commercialisés **pour les processus de fusion laser sur lit de poudre et de projection de poudre**. Ils présentent des difficultés de mise en œuvre par fusion laser à cause du phénomène de fissuration lors de la solidification. L'alliage 7 020 possède un taux de zinc compris entre 3 % et 6 % et un taux de magnésium compris entre 1 % et 1,5 %. La **Figure 5** prédit ce phénomène de fissuration pour ces plages de concentration. Il en est de même pour les alliages 7 075 et le 7 050 qui contiennent une plus grande quantité de magnésium mais également un taux de cuivre plus important.
- L'alliage 5 083, qui est un alliage de corroyage à durcissement par écrouissage de la famille 5 000, **ne semble pas pouvoir se mettre en œuvre par fusion laser**. Cet alliage contient une forte teneur en magnésium, qui est un élément présentant une évaporation importante lors du processus de fusion laser. Ainsi, avec la baisse du taux de magnésium, l'alliage devient sensible à la fissuration lors de sa solidification. **L'alliage 5 087 se met bien en œuvre par technique de dépose de fil par arc électrique**.
- L'AlMgScZr (nom commercial : Scalmalloy) est un alliage à durcissement structural développé par Airbus et l'Institut Fraunhofer pour des procédés de fabrication additive, pour des applications aéronautiques. Cet alliage se met en œuvre par fusion laser sur lit de poudre¹². Cet alliage vise des applications demandant à la fois de bonnes caractéristiques mécaniques et une densité relativement faible. Il vise la fabrication de pièces de taille petite à moyenne et de type semi-structural apte à satisfaire certaines exigences de sécurité grâce à sa meilleure résistance mécanique. Les domaines d'application sont l'aéronautique, la robotique et l'automobile.

¹¹ K. Taming and R. Hafley, "Electron Beam Freeform Fabrication for Cost Effective Near-Net Shape Manufacturing," Metals & Thermal Structures Branch, NASA Langley Research Center, Hampton, 2006.

¹² D. Buchbinder and K. Wissenbach, "Additive manufacturing of high-strength aluminium components," Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT, June 2011.



Figure 3 - Exosquelette bionique de moto en Scalmalloy® par fabrication additive¹³.



Figure 4 - Roue de pompe à eau pour moteur de sport automobile¹⁴.

En ce qui concerne les technologies de fabrication additive par dépôt de fil, la matière première **présente un coût inférieur, une disponibilité plus importante et un choix de nuances plus large par rapport aux poudres**, de par l'existence de la filière soudure qui utilise largement les alliages d'aluminium sous forme de fil. À titre indicatif, les nuances suivantes sont disponibles dans le commerce sous forme de fil : 1 100, 2 318, 2 319, la série des 3 000, 4 043, 4 047, 5 183, 5 356, 5 554, 5 556¹⁵.

Il est également possible de mettre en œuvre **des composites à matrice métallique par fabrication additive**. Ce type de matériau est constitué d'une matrice métallique et d'un renfort métallique ou céramique. Il est couramment désigné par le sigle CMM. Le renfort dont le but est d'améliorer les caractéristiques mécaniques du matériau peut être introduit en proportion variable dans la matrice métallique, le but étant de se situer dans des plages de valeur pour lesquelles on n'a pas de fissuration du matériau lors de la solidification. Par exemple, l'AlSi10Mg avec un renfort sous forme de particules de SiC peut être mis en œuvre, avec un pourcentage de renfort de 0 à 10 %¹⁶.

¹³ http://www.airbusgroup.com/int/en/news-media/press-releases/Airbus-Group/Financial_Communication/2016/05/en_APWorks-Launch-Light-Rider.html

¹⁴ <http://articles.sae.org/14175/>

¹⁵ S. Inc., "Sciaky Inc., Industrial metal 3D Printing, Arc + EB welding," 2016. [Online]. Available: <http://www.sciaky.com/>

¹⁶ A. Mauduit, S. Pilot and F. Frascati, "Application study of AlSi10Mg alloy by selective laser melting, physical and mechanical properties, microstructure, heat treatments and manufacturing of aluminium metallic matrix composite (MMC)," Metallurgical Research & Technology, pp. 1-23, September 2015.

Alliage	Série	Lit de poudre	Projection de poudre	Fil+arc	Fil+faisceau électrons	Simplicité d'approvisionnement
AlSi12	40 000	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui, alliage répandu en FA aluminium
AlSi10Mg		Oui	Oui			Oui, alliage FA aluminium par défaut
AlSi7Mg0,6		Oui				Alliage moins répandu en FA aluminium
AlSi9Cu3		Oui				
AlSi5		Oui			Oui	Oui
1050A	1 000	Oui				
1100		N.C.		Oui	Oui	Oui, filière soudure
2017A	2 000	Fissuration				
2219		Fissuration		Oui	Oui	
2318				Oui	Oui	Oui, filière soudure
2319				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5083	5 000	Fissuration				
5087				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5183				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5356				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5554				Oui	Oui	Oui, filière soudure
5556				Oui	Oui	Oui, filière soudure
6061	6 000	Fissuration	Oui			
7020	7 000	Fissuration	Oui			
7050		Fissuration	Oui			
7075		Fissuration	Oui			
AlMgScZr ScAlmalloy		Oui	Oui			Nouvelle nuance favorable à la fabrication additive

Tableau 4 - Synthèse de la faisabilité par nuance et par procédé

Conclusion et enseignements sur cette partie

Certains alliages (principalement de la famille 40 000) peuvent être mis en œuvre par fabrication additive et donnent des propriétés mécaniques tout à fait correctes. Ceux-ci peuvent être approvisionnés relativement bien car plusieurs fournisseurs, pouvant livrer des quantités importantes existent. En revanche, d'autres alliages classiquement utilisés dans l'industrie (6 061, 7 075...) ne fonctionnent pas ou mal en fabrication additive.

L'avantage de la filière fil est qu'elle est déjà développée d'où la facilité d'utilisation et d'approvisionnement, permettant une industrialisation plus facile lorsque le procédé de fabrication additive par dépôt de fil sera maîtrisé. Au cœur d'un engouement général pour l'ensemble des matériaux métalliques, la filière poudre ne doit pas être négligée car des solutions pour développer de nouveaux alliages substituables aux nuances qui ne peuvent pas être mises en œuvre par fabrication additive, peuvent être trouvées (exemple du ScAlmalloy). Une phase de recherche intense et si possible mutualisée doit toutefois être menée.

Pour augmenter les possibilités de fabrication additive aluminium, il serait nécessaire de développer la recherche sur les alliages non dédiés à la soudure.

Freins relatifs au procédé de mise en forme de l'aluminium

Comme il est expliqué dans la partie précédente, **tous les alliages d'aluminium ne se mettent pas en œuvre par fabrication additive**. Une des difficultés principales est le **phénomène de fissuration lors de la solidification du matériau**. Celui-ci est directement lié au type et à la concentration des éléments chimiques présents dans l'alliage et à la vitesse de refroidissement de l'alliage, qui dépend de la technologie utilisée. Comme on peut le voir sur la **Figure 5** une forte teneur en cuivre, silicium et/ou magnésium permet d'éviter le problème de fissuration. Il en est de même pour un alliage contenant une très faible teneur de l'ensemble des éléments d'alliages, tel que le 1 050A.

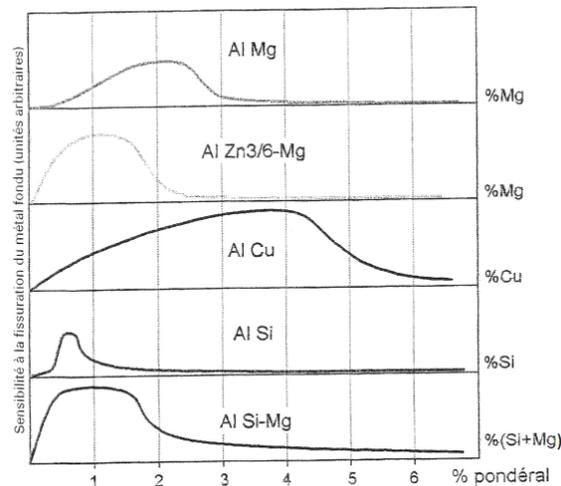


Figure 5 - Courbe de sensibilité à la fissuration pour l'aluminium en fonction du taux d'élément d'alliage

Afin de faciliter la lecture, nous avons décomposé les principaux freins par procédé de mise en œuvre :

Freins spécifiques à la fabrication additive aluminium sur lit de poudre

- Pour la fabrication additive sur lit de poudre, les alliages d'aluminium se mettent en œuvre difficilement à cause de **la légèreté des poudres, de leur faible mouillabilité** lorsqu'ils sont à l'état liquide, de leur forte réflectivité et de leur forte conductivité thermique¹⁷. La présence **d'oxyde d'aluminium, l'alumine, est également une limite importante** à la mise en œuvre des alliages d'aluminium. La dimension micrométrique des poudres favorise leur oxydation en surface, et la formation d'alumine qui est un oxyde requérant un apport d'énergie important pour être enlevé, nécessite une puissance de laser importante. Si la puissance du laser est insuffisante, l'oxyde persiste lorsque le matériau est solidifié et les propriétés mécaniques subissent une dégradation¹⁸. De même, des problèmes pratiques peuvent apparaître lors de la manipulation des poudres : une mauvaise coulabilité et un taux d'humidité trop important **peuvent conduire à des difficultés de mise en œuvre**.
- **Les cycles de montée et descente en température** que subissent les alliages lors de leur mise en œuvre, engendrent des contraintes et des déformations résiduelles plus ou moins importantes au sein du matériau. **Les déformations sont sources d'écarts dimensionnels** avec le dessin d'origine de la pièce. Ces inconvénients sont plus ou moins marqués suivant la technologie de fabrication additive employée, mais également suivant la stratégie de fabrication adoptée. Par exemple, pour les technologies de fabrication sur lit de poudre, **il est conseillé de varier la direction de lasage de 90 ° ou 67 ° entre chaque couche pour diminuer les contraintes et les déformations résiduelles**. Dans le cas des technologies de fabrication additive par dépose de fil, **un écrouissage à froid permet de réduire les contraintes résiduelles**.

¹⁷ N. Aboulkhair, N. Everitt, I. Ashcroft and C. Tuck, "Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting," Additive Manufacturing, pp. 77-86, august 2014.

¹⁸ E. Olakanmi, R. Cochrane and D. K.W., "A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties," Progress in Materials Science, March 2015.

- Pour les technologies de fabrication sur lit de poudre, **la vitesse de fabrication des pièces est également un frein à leur développement**. En effet, pour une machine possédant un laser 400 W, la vitesse de construction maximale avoisine les **28 cm³/h**, pour les paramètres du constructeur. La technologie de fusion par faisceau d'électron sur lit de poudre présente des vitesses de fabrication légèrement supérieures car le lit de poudre est chauffé à des températures plus importantes et l'apport d'énergie nécessaire à la fusion est moins important. **La vitesse de construction maximale est calculée comme le produit de la vitesse du laser, de l'écart vecteur (c'est-à-dire l'écart entre les traits laser) et de l'épaisseur de couche, pour le procédé de fusion laser sur lit de poudre**. La vitesse de fabrication réelle est inférieure à cette valeur car elle ne prend pas en compte le temps de mise en couche ainsi que le *sky-writing* (temps de déplacement laser lorsque celui-ci ne lase pas).

Toutefois, dans le contexte de développement actuel des technologies de fabrication additive sur lit de poudre, **la vitesse de fabrication tend à augmenter** car les machines conçues actuellement présentent des lasers allant jusqu'à une puissance de 1 000 W, ce qui implique d'atteindre des vitesses de lasage plus importantes et de laser une couche sur deux, lorsqu'il s'agit du volume de la pièce. Par exemple sur une machine prototype de l'Institut Fraunhofer, pour une **puissance de 1 000 W, un écart vecteur de 0,2 mm et une vitesse laser de 2 200 mm/s, la vitesse de fabrication maximale atteinte est de 75 cm³/h** et les pièces fabriquées sont denses¹⁹. De même, une solution pour augmenter la vitesse de fabrication est d'intégrer plusieurs lasers. La machine SLM 500 HL du constructeur SLM SOLUTIONS peut par exemple intégrer quatre lasers. *A priori*, Il n'y a pas de problèmes pour une utilisation simultanée de quatre lasers (et plus encore) de 400 W, car l'aluminium présente une forte conductivité thermique, qui prévient les risques de brûlage du matériau. L'utilisation de lasers de 1 000 W nécessite des investigations sur les conditions de faisabilité et les paramètres à adopter.

Freins spécifiques à la fabrication additive aluminium par projection de poudre

Concernant les technologies de fabrication additive par projection de poudre, en préalable à l'évocation des freins que rencontre cette technologie, nous rappelons qu'ici les vitesses de fabrication sont plus importantes, **puisque l'on peut atteindre une vitesse de 250 cm³/h**. Les technologies de fabrication additive par dépôt de fil sont celles qui permettent les fabrications les plus rapides. Par exemple, on obtient des vitesses comprises entre 178 et 594 cm³/h pour l'alliage 2 219.

Les freins principaux sont les suivants :

- existence de contraintes et déformations résiduelles au sein des pièces pour les mêmes raisons que les procédés de fusion sur lit de poudre,
- les problématiques de mise en œuvre liées aux poudres sont moins présentes car la taille des grains est plus importante : la surface spécifique de la poudre est réduite ce qui permet de réduire le niveau d'oxydation, la coulabilité est améliorée.

Freins spécifiques à la fabrication additive aluminium par dépose de fil :

- on peut également s'attendre à une future augmentation de la vitesse pour les technologies à dépose de fil, car il est possible d'ajouter plus de robots de dépose. Toutefois, l'inconvénient de ces technologies est que l'augmentation de la vitesse de fabrication va généralement de pair avec la baisse de la précision dimensionnelle et de l'état de surface. Par exemple pour la fabrication additive par dépose de fil, qui est la technologie de fabrication additive la plus rapide, on observe une variabilité de la hauteur des cordons et un effet de bord matérialisé par des vagues,
- existence de contraintes et déformations résiduelles au sein des pièces pour les mêmes raisons que les procédés de fusion sur lit de poudre.

¹⁹ D. Buchbinder, H. Schleifenbaum, S. Heidrich, W. Meiners and J. Bültmann, "High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts," *Physics Procedia*, pp. 271-278, 2011.

Une des limites majeures et relativement transverses des procédés de fabrication additive est la nécessité d'effectuer des opérations de post-traitement, à savoir :

- un détensionnement des pièces fabriquées car il existe des contraintes résiduelles dans les pièces, dues à la forte vitesse de refroidissement de l'alliage,
- le détensionnement peut être suivi ou remplacé par des traitements thermiques supplémentaires (mise en solution, trempe, revenu) pour homogénéiser la structure des pièces et éventuellement améliorer les caractéristiques mécaniques,
- le découpage des pièces et le retrait des supports de fabrication des pièces par usinage, lorsque les pièces sont fabriquées sur un plateau de fabrication,
- une finition de surface des pièces fabriquées (par sablage, attaque chimique, usinage...) car la surface des pièces brutes de fabrication n'est, suivant la technique de fabrication additive et l'application recherchée, pas toujours fonctionnelle.

Les opérations de post-traitement sont communes aux procédés de fusion de matière sur lit de poudre, fabrication par dépôt de fil et projection de poudre. La seule exception concerne le retrait des supports de fabrication et le découpage des pièces du plateau pour la fabrication additive par projection de poudre, dans le cas de la réparation d'une pièce. Ces opérations n'ont en effet pas lieu d'être dans ce cas.

Freins	Procédés		
	Lit de poudre	Projection de poudre	Dépose de fil
Légèreté des poudres, faible mouillabilité	X		
Formation d'oxyde d'aluminium	X	X	
Mauvaise coulabilité	X		
Taux d'humidité trop important	X		X
Contraintes et déformations résiduelles	X	XX	XX
Précision dimensionnelle	X	XX	XX
Opérations de post-traitement nécessaires	X	X	XX
Faible vitesse de fabrication	X		

Tableau 5 - Synthèse des principaux freins technologiques de la fabrication additive aluminium (X : frein mineur ; XX : frein majeur)

Conclusion et enseignements sur cette partie

De manière générale, les freins actuels des procédés de fabrication additive aluminium sont la difficulté de mise en œuvre de certaines nuances, les opérations de post-traitements, les contraintes/déformations résiduelles qui sont sources d'écarts dimensionnels ou encore les mauvais états de surface obtenus. Bien que de nombreux alliages d'aluminium existent, peu sont adaptés à la fabrication additive. De manière spécifique, pour les procédés SLM, EBM : les principaux freins actuels sont la faible vitesse de construction, les caractéristiques physiques/chimiques des poudres d'aluminium.

Selon le tableau de synthèse ci-dessus, les procédés de lit de poudre sembleraient être la technologie de mise en œuvre de l'aluminium par fabrication additive qui présente le plus de verrous technologiques et de limitations actuelles, comparés à la projection de poudre et au dépôt de fil. Cependant les freins évoqués, légèreté des poudres, faible mouillabilité, formation d'oxyde, mauvaise coulabilité, taux d'humidité important, peuvent être contournés facilement si la poudre approvisionnée est commandée avec le bon cahier des charges. En termes de contraintes et déformations résiduelles, et en précision dimensionnelle, c'est la technologie qui offre les meilleurs résultats.

Réflexions en cours

Alliages d'aluminium

Les alliages d'aluminium existants sont élaborés pour des procédés de mise en forme conventionnels tels que la fonderie, l'usinage, le forgeage, le filage... Les technologies de fabrication additive **font émerger des problématiques telles que l'évaporation des éléments d'alliage** présentant une faible température d'ébullition, **la génération de niveaux élevés de porosité et la fissuration des matériaux** dans le cas d'un refroidissement rapide. Les alliages d'aluminium existants qui présentent de bonnes propriétés de coulabilité, de soudabilité et présentant peu ou pas de fissuration lors de la solidification permettent d'éviter les problèmes cités précédemment et peuvent potentiellement être mis en œuvre. **Toutefois, il existe des alliages d'aluminium pour lesquels il y a un compromis à trouver** entre les propriétés intéressantes et la mise en œuvre par les technologies de fabrication additive. C'est pour cette raison **qu'il est intéressant d'envisager l'élaboration de nouvelles nuances**.

- Certains alliages d'aluminium tels que **l'AlSi7Mg0,6 et l'AlSi10Mg** présentent une amélioration de leurs caractéristiques mécaniques pour le procédé de fusion laser sur lit de poudre dans leur état brut de fusion, en comparaison aux mêmes alliages bruts de fabrication par fonderie. En effet, **le cycle de chauffage/refroidissement des alliages est très rapide et permet d'obtenir une microstructure très fine et de meilleures propriétés mécaniques**^{20 21}. De même, les caractéristiques mécaniques obtenues après traitement thermique sont supérieures à ce que prévoit la norme NF EN 1 706, et au moins égales à celles d'alliages d'aluminium obtenus en fonderie après traitement thermique similaire.
- Concernant la fabrication additive par dépôt de fil avec chauffage par faisceau d'électron (EBAM) pour l'alliage 2 219, on obtient de meilleures propriétés mécaniques en traction dans l'état brut de fabrication, **en comparaison avec un alliage n'ayant pas subi de traitement thermique**. On obtient des propriétés mécaniques similaires après traitement thermique. Toujours pour l'alliage 2 219, le procédé de dépôt de fil par chauffage à arc électrique (WAAM) ne permet pas d'obtenir des pièces denses avec de bonnes caractéristiques mécaniques. Toutefois, une opération d'écrouissage à froid sur chaque cordon déposé, complétée par un traitement thermique adéquat en fin de fabrication

²⁰ D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E. Ambrosio and E. Atzeni, "From Powders to Dense Metal Parts: Characterization of a Commercial AlSiMg Alloy Processed through Direct Metal Laser Sintering," *Materials*, pp. 856-869, March 2013.

²¹ J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, J. Bai, Y. Zhai and P. Ma, "The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy," *Materials Science & Engineering A*, no. 651, pp. 18-26, 2015.

permet d'affiner la microstructure du matériau et donc d'améliorer les caractéristiques mécaniques finales de la pièce, tout en réduisant la porosité, les contraintes résiduelles, la variabilité de la hauteur des cordons et les déformations latérales²².

- Concernant les techniques de fabrication additive par projection de poudre et fusion par faisceau d'électron sur lit de poudre, il existe peu de résultats concernant les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium.

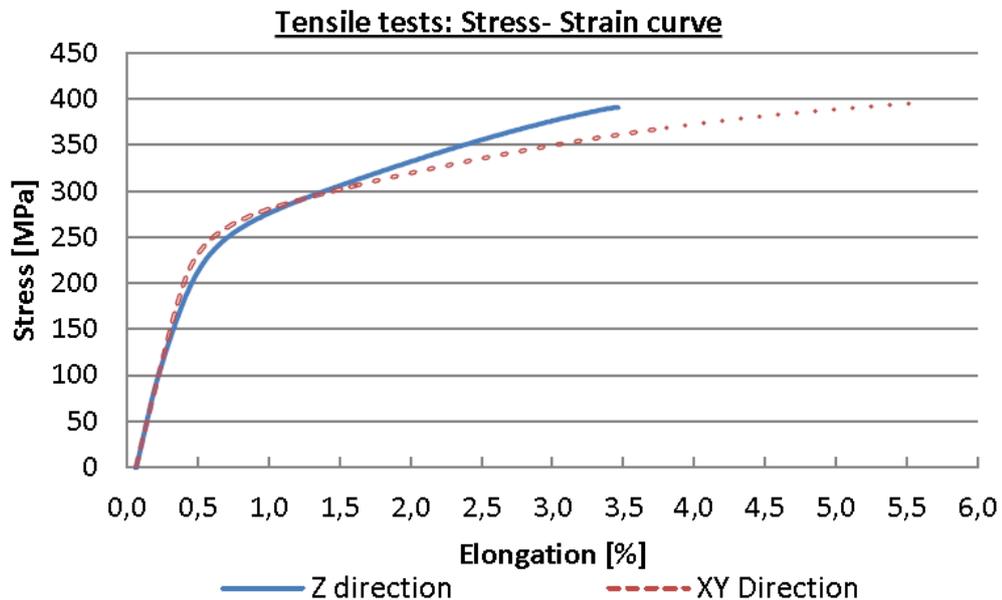


Figure 6 - Propriétés mécaniques obtenues pour de l'AlSi10Mg brut de fabrication, avec un laser de 200 W. [1]

Alliages	Sources	Conditions	Direction	Rm (MPa)	Rp0,2 (MPa)	A% (%)
AlSi7Mg0,6	Cetim-Certec - SUPCHAD	Brut fusion (150°C)	XY	407	272	7,9
			Z		249	5,5
	NF EN 1706, valeurs min	Coulée en coquille - T6	XY	234	149	18,1
			Z			241
AlSi10Mg	Cetim-Certec [2]	Brut fusion (RT)	XY	456	368	3,0
			Z	359,5	306,5	1,7
		Brut fusion (180°C)	XY	348	253	3,3
			Z	285	213	3,5
		Brut fusion (RT) + T6	XY	312		3,2
			Z	290	262	2,5
	NF EN 1706, valeurs min	Coulée en coquille - T6	XY			
			Z	251	198	2,6
AlSi12	Herzog et al. [3]	Brut fusion (RT) 450°C – 6H	XY	380	260	3
			Z	145	95	13
AlMg4.4Sc0.66 MnZr (Scalmalloy)	Herzog et al. [3]	325°C – 4H	XY	530	520	16
			Z	515	500	14

Tableau 6 - Comparaison des caractéristiques mécaniques de divers alliages d'aluminium mis en œuvre par fabrication additive

²² A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina and J. Ding, "Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications," Procedia CIRP, no. 37, pp. 48-53, 2015.

Ces résultats permettent d'envisager des applications pour lesquelles des propriétés mécaniques élevées sont nécessaires, notamment **dans les secteurs de l'aéronautique, de la défense et de l'aérospatial.**

Traitements thermiques

La grande majorité des alliages d'aluminium subissent une série de traitements thermiques avant utilisation pour garantir leurs propriétés mécaniques et physiques. Les alliages d'aluminium mis en forme par fabrication additive présentent de **très bonnes caractéristiques mécaniques lorsqu'ils sont bruts de fusion**, grâce à leur fine structure métallurgique. Il est donc important de faire subir à ces alliages les traitements thermiques adéquats pour obtenir une structure homogène et un matériau fiable, tout en conservant de bonnes propriétés mécaniques. Il existe peu d'informations disponibles sur **la possibilité d'optimisation des traitements thermiques pour les alliages d'aluminium issus de fabrication additive.** C'est toutefois un axe d'étude qui nécessite un approfondissement si l'on veut bénéficier des hautes caractéristiques mécaniques obtenues par fabrication additive.

L'aluminium et ses alliages présentent de bonnes propriétés de résistance à la corrosion généralisée car un film protecteur d'alumine se forme par oxydation à la surface des pièces. Toutefois, il existe d'autres modes de corrosion auxquels sont sensibles les alliages d'aluminium : la corrosion galvanique, la corrosion par piqûre et la corrosion caverneuse.

- La présence d'une certaine rugosité et de pores à la surface des pièces augmente le risque d'apparition de la corrosion caverneuse et la **formation d'un film d'oxyde peu épais durant le process de fabrication augmente le risque de corrosion par piqûre.** Des finitions de surface de types sablage et polissage permettent d'augmenter la résistance à ces types de corrosion. Également, une corrosion des surfaces parallèles à la direction de fabrication peut être observée. En effet, **un phénomène de corrosion galvanique peut avoir lieu au niveau des cordons de fabrication**, à cause de la présence de piles galvaniques.²³

Conception des pièces

Les technologies de fabrication additive amènent également des réflexions sur la manière de concevoir les pièces : il existe en effet des règles de fabrication propres à ces technologies qu'il est nécessaire de prendre en compte pour minimiser les opérations de post-traitement, le volume de matière ajoutée et obtenir des pièces fonctionnelles. Par exemple, il est nécessaire de prendre en compte la présence de supports entre le plateau et les pièces. Ceux-ci permettent une bonne évacuation de la chaleur et de bloquer la déformation des pièces à cause des contraintes résiduelles. Ainsi, il est important de comprendre que **ces technologies présentent un intérêt seulement si la conception des pièces est pensée pour de la fabrication additive.** L'exemple de la **Figure 7** illustre cet intérêt. On observe une pièce sur l'image de gauche (en gris) qui présente un nombre important de supports de fabrication (en rouge). Cette pièce nécessiterait plusieurs postopérations d'usinage pour enlever les supports de fabrication. **Le surcoût serait dans ce cas important** puisque l'ensemble de la matière utilisée pour la fabrication des supports est perdu, et le prix de la pièce dépend directement du volume de matière utilisé. De plus, les opérations d'usinage introduisent un coût supplémentaire. Au contraire, la pièce de droite n'a pas nécessité de supports de fabrication et donc pas de postopérations d'usinage.

²³ M. Cabrini, S. Lorenzi, T. Pastore, S. Pellegrini, D. Manfredi, P. Fino, S. Biamino and C. Badini, "Evaluation of corrosion resistance of Al-10Si-Mg alloy obtained by mean of Direct Metal Laser Sintering," Journal of Material Processing Technology, pp. 326-335, december 2015.



Figure 7 - Pièce non prévue pour de la fabrication additive (à gauche) et pièce prévue pour de la fabrication additive (à droite).

Dans des domaines tels que l'automobile, l'aéronautique, l'aérospatial et la défense pour lesquels un allègement des structures est constamment recherché, ce qui justifie complètement l'utilisation de l'aluminium sur ces segments, il est intéressant d'effectuer une optimisation topologique des pièces en effectuant une ou plusieurs étapes de reconception. Cela permet de trouver la meilleure structure possible qui aura le coût de fabrication le plus faible, tout en offrant les performances les plus adaptées. La **Figure 8** fournit un exemple d'optimisation topologique avec à droite, la pièce d'origine, et à gauche la pièce optimisée obtenue par un procédé de fabrication additive sur lit de poudre. On observe clairement que la pièce de gauche présente une structure « aérée » et donc une masse plus faible. Si l'optimisation topologique n'est spécifique ni aux alliages d'aluminium, ni aux procédés de fabrication additive – elle est également appliquée avec le titane ou bien dans le domaine de la fonderie – son emploi se justifie pleinement avec la recherche d'un allègement le plus optimisé possible en maximisant l'intérêt d'un alliage léger.



Figure 8 - Exemple de l'optimisation topologique d'une pièce

Les technologies de fabrication additive sur lit de poudre et de projection de poudre sont particulièrement indiquées pour aller de pair avec l'optimisation topologique. Elles permettent une plus grande liberté de formes de fabrication et donc possiblement un meilleur compromis entre l'allègement, le coût, et la résistance de la structure. Le couplage des technologies de fabrication additive et d'optimisation topologique est pour le moment peu répandu mais tend à se développer au vu des avantages qu'il présente.

Conclusion et enseignements sur cette partie

Les problèmes de mise en œuvre de certains alliages peuvent être contournés en mettant au point de nouvelles nuances visant le même type d'application, comme on le voit avec le Scalmalloy.

Par ailleurs, il semble important de mentionner l'optimisation des traitements thermiques comme un axe de réflexion majeur pour l'industrialisation de la fabrication additive aluminium.

Enfin, il est nécessaire d'adapter la conception des pièces au procédé de fabrication additive pour réduire les défauts de fabrication, minimiser la matière mise en œuvre, le temps de fabrication et les opérations de post-traitements. Une bonne utilisation des logiciels d'optimisation topologique et de calcul numérique permet une utilisation optimale des procédés.

Développements actuels au niveau mondial

À l'heure actuelle, les technologies les plus répandues pour mettre en forme les alliages d'aluminium sont les technologies de fusion laser sur lit de poudre. Les alliages sur lesquels **il existe le plus de données bibliographiques sont les alliages habituellement utilisés en fonderie**, tels que l'AlSi10Mg et l'AlSi12, de par leur facilité de mise en œuvre. Les taux de porosité sont relativement faibles, les caractéristiques mécaniques et les caractéristiques métallurgiques obtenues sont connues et reproductibles. Celles-ci sont abordées plus en détail dans les publications suivantes^{24,25}. **Toutefois, il est nécessaire d'approfondir les connaissances en termes de tenue en fatigue et de durabilité de ces alliages mis en œuvre par fusion laser.** En effet, les essais de fatigue présentent un coût élevé, une durée de mise en œuvre importante et les mécanismes d'endommagement sont souvent complexes à comprendre et à prédire, ce qui implique que peu d'études soient réalisées ou que celles-ci ne soient pas divulguées. Pour cette raison, il existe encore peu de données bibliographiques sur le sujet.

La fabrication additive par **dépose de fil présente un intérêt industriel important pour les secteurs de l'aéronautique et l'aérospatial, puisqu'elle permet de fabriquer des pièces volumineuses relativement rapidement**, avec de faibles pertes de matière puisque le ratio « buy-to-fly » (rapport entre la masse de matière mise en œuvre pour réaliser une pièce et la masse qui vole effectivement) peut atteindre 1,2. Toutefois, cette technologie est encore peu répandue et nécessite plus d'investigations pour maîtriser le procédé et obtenir des pièces denses et des résultats répétables. Le constructeur Sciaky, *leader* dans ce domaine, effectue notamment un certain nombre de projets R & D en partenariat avec l'U.S. Air Force, Lockheed Martin ainsi que Boeing. De même, certaines universités telles que l'université de Cranfield en Angleterre étudient de près ce procédé et ses possibilités.

Les alliages d'aluminium présentent une qualité d'état de surface dépendante de la technologie utilisée. Les technologies à **lit de poudre permettent d'obtenir les meilleurs états de surface avec un Ra sous les 10 µm**, puis viennent les technologies à projection de poudre avec un Ra de l'ordre de 20 µm, et enfin les technologies à dépose de fil avec un Ra de l'ordre de 200 µm. Suivant le besoin il peut être nécessaire de retravailler la surface des pièces pour obtenir des surfaces fonctionnelles. Par exemple, un sablage ou un polissage permet d'améliorer l'état de surface des pièces. La précision dimensionnelle obtenue dépend également de la technologie utilisée. Celle-ci est meilleure pour les technologies à lit de poudre puisqu'elle est de l'ordre de ± 0,04 mm. Elle est de l'ordre de ± 0,13 mm pour les technologies à projection de poudre et enfin, de l'ordre de ± 0,2 mm pour les technologies à dépose de fil. Les valeurs de précision dimensionnelle renseignées pour chaque technologie ne prennent pas en compte les éventuels effets de bord qui peuvent exister sur certaines géométries, et qui dégradent les mesures de précision dimensionnelle.

²⁴ A. Mauduit, S. Pillot and F. Frascati, "Application study of AlSi10Mg alloy by selective laser melting, physical and mechanical properties, microstructure, heat treatments and manufacturing of aluminium metallic matrix composite (MMC)," Metallurgical Research & Technology, pp. 1-23, September 2015.

²⁵ E. Olakanmi, R. Cochrane and D. K.W., "A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties," Progress in Materials Science, March 2015.

Il existe des entreprises aéronautiques et aérospatiales qui possèdent déjà une bonne maîtrise de certains alliages d'aluminium mis en œuvre par fabrication additive. **Par exemple, Airbus a développé un alliage d'aluminium par durcissement structural, le Scalmalloy AlMgScZr**, présentant une bonne résistance à la corrosion, une bonne soudabilité et de bonnes propriétés mécaniques [4]. Les premiers résultats liés à sa mise en œuvre par fusion laser présentent une forte résistance mécanique et une bonne résistance à la fatigue.

Conclusion et enseignements sur cette partie

Au niveau mondial, il paraît évident que les procédés de fabrication additive (FA) ne sont pas tous sur le même niveau de développement, particulièrement sur le plan de la mise en œuvre des alliages d'aluminium. En effet :

- procédé SLM : les axes de développement actuels majeurs concernent l'ensemble des matériaux métalliques (et pas seulement les alliages d'aluminium) et visent l'industrialisation du procédé et l'augmentation de la vitesse de fabrication (plusieurs lasers et des lasers plus puissants),
 - procédé de dépose de fil : les axes de développement actuels concernent la promotion et le développement de la technologie, le but étant à court terme de rendre le procédé connu et viable, et à long terme industrialisable.
-

Étude des produits au stade de l'industrialisation

Historiquement, les technologies de fabrication additive sont utilisées pour réaliser des pièces unitaires et **notamment pour faire du prototypage rapide**, que ce soit à partir de matériaux métalliques ou polymères. Ces technologies sont en effet utiles lorsqu'il n'est pas souhaitable de **mettre en place toute une chaîne de production**. La technique de fabrication additive par projection de poudre est également utilisée pour effectuer des ajouts de fonctions (par exemple, ajout de pales sur un arbre) et pour de la réparation de pièces endommagées lorsque celles-ci nécessitent seulement un ajout de matière et sont coûteuses à fabriquer de nouveau.

Plus récemment, **ces technologies ont été exploitées pour de l'outillage rapide**, permettant par exemple la création de moules d'injection polymère avec des canaux de refroidissement, utilisés pour un refroidissement plus rapide de la matière, et donc une diminution des temps de cycle de fabrication. Ces moules sont couramment créés à base d'acier, et **plus rarement à base d'alliages d'aluminium** (pour de plus petites séries). Ces technologies ont trouvé une application dans le secteur de la joaillerie, avec des métaux tels que l'or et l'argent car les pièces produites ont une forte valeur ajoutée, mais également dans le domaine dentaire avec la réalisation d'implants en CoCr ou en polymère biocompatible, car ce sont des pièces personnalisées.

Aujourd'hui, avec le développement des machines de fabrication additive, l'augmentation des vitesses de fabrication, l'augmentation de la taille des zones de fabrication, la diminution des coûts de fabrication, et la parution de données bibliographiques sur le sujet, il devient peu à peu possible d'envisager l'emploi de ces technologies en production industrielle, **à certaines conditions**. Illustration de cette dynamique, l'usine de Thales qui devrait ouvrir l'an prochain à Casablanca prévoit d'intégrer des machines de fabrication additive aluminium.

En effet, le désavantage de ces technologies réside dans leur faible vitesse de fabrication (excepté pour les technologies à dépose de fil) et leur coût de mise en œuvre relativement important. **Elles ne sont donc pas adaptées si l'on souhaite fabriquer de nombreuses pièces présentant un volume important**, comme le montre la Figure 9. De même, la taille des pièces qu'il est possible de fabriquer est réduite à la dimension de la zone de fabrication des machines, qui aujourd'hui

n'excède pas les 125 dm³ pour les machines de fabrication sur lit de poudre²⁶ et 2 m³ pour les machines de fabrication par jet de poudre²⁷.

Ainsi ces technologies sont compétitives lorsque l'on souhaite fabriquer :

- des pièces en petite série,
- des pièces présentant des formes complexes ou personnalisées, qu'il est difficile voire impossible d'obtenir par des techniques de fonderie, usinage, forgeage...
- des pièces destinées à remplacer des assemblages complexes,
- des pièces présentant une forte valeur ajoutée.

Les techniques de projection de poudre, dépôt de fil et fusion par faisceau d'électron sur lit de poudre sont moins répandues. Il est d'ailleurs plus difficile de trouver des informations sur ces technologies dans la littérature et ces procédés sont généralement moins bien maîtrisés.

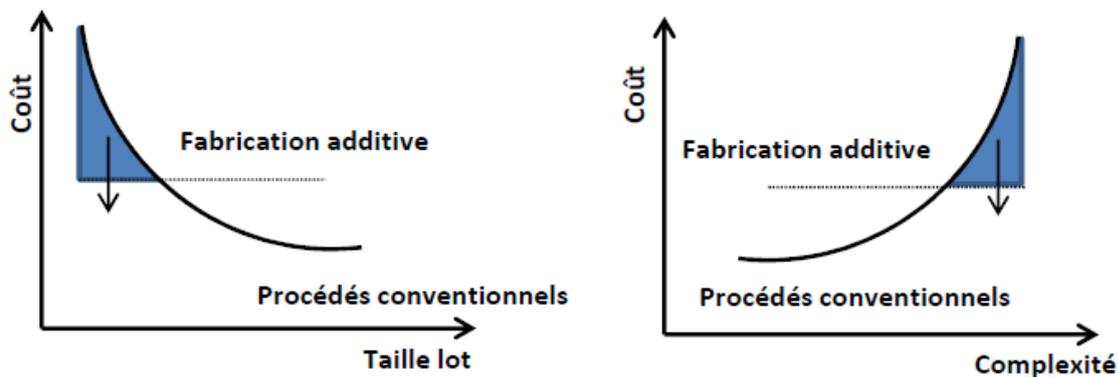


Figure 9 - Représentation schématique des domaines d'intérêt des technologies de fabrication additive par rapport aux procédés conventionnels de fabrication.

La fabrication additive aluminium : un modèle économique à valider

Degré de pénétration dans les principaux marchés d'application : aéronautique, automobile, spatial et défense

Pour les secteurs de l'aéronautique, de l'aérospatial et de la défense, **les technologies de fabrication additive sur lit de poudre pour les alliages d'aluminium présentent un intérêt majeur**. En effet, comme évoqué précédemment, ces technologies conviennent actuellement pour des fabrications en petite série, pour des fabrications de pièces personnalisées, pour la réalisation de pièces complexes et ayant une forte valeur ajoutée. **De plus les alliages d'aluminium sont historiquement très utilisés dans ces domaines, en raison de leur densité relativement faible.**

²⁶ T. Wohlers, "Wohlers Report 2013," Wohlers Associates, Fort Collins, 2013.

²⁷ P. Calves and CETIM, "Matériaux disponibles en fabrication additive," Senlis, 2016.

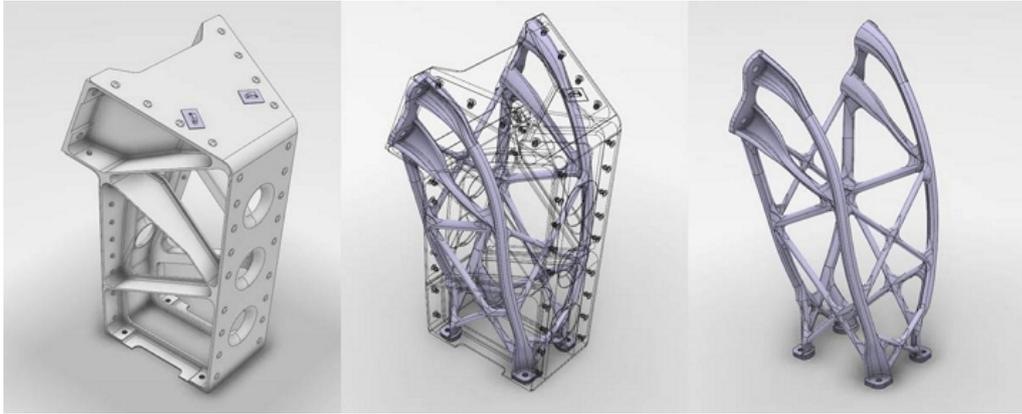


Figure 10 - Première pièce de fabrication additive en aluminium qualifiée pour le spatial d'Airbus Defence and Space UK.

Leur mise en œuvre concerne plus spécifiquement les applications pour lesquelles une réduction du poids, de bonnes propriétés mécaniques et une complexité inégalée par les techniques de fabrication conventionnelles sont recherchées. À titre d'exemple, dans le cadre du projet SUPCHAD (*SUPply CHain for Aeronautics and Defense*), qui englobe une plateforme de développement en fabrication additive partagée entre le Cetim-Certec et plusieurs industriels, **de nombreuses demandes concernent des pièces utilisées pour de la circulation de fluide**. Celles-ci nécessitent des caractéristiques mécaniques suffisantes et l'utilisation de formes complexes, puisqu'il est nécessaire d'y intégrer des canaux de circulation de fluide. De même, le couplage entre ces technologies et l'optimisation topologique présente un grand intérêt. À l'avenir, les technologies de fabrication additive **par dépôt de fil sont susceptibles de présenter un intérêt pour la fabrication de pièces massives de structure en aluminium** telles que des réservoirs, fuselages, coques... Leur intérêt réside dans les faibles pertes de matière première qu'elles engendrent et dans leur capacité à réaliser des pièces personnalisées, relativement rapidement. Comme expliqué précédemment, ces technologies sont pour le moment peu développées et leur essor dépendra des caractéristiques mécaniques et de la santé matière obtenues ainsi que de la répétabilité du *process*. Actuellement, de grands groupes aéronautiques et aérospatiaux tels qu'Airbus, Safran, Thales, Zodiac, MBDA, ou bien le projet de Stelia avec Constellium qui est très représentatif de cette dynamique, s'intéressent de près à ces technologies, **mais celles-ci sont en cours de validation due à leur apparition récente en environnement de production**. Pour cette raison, il existe encore peu d'entreprises sous-traitantes aéronautiques qui utilisent ces technologies.

Illustration par le projet FAST: application de la fabrication additive aux aérostructures



Le fabricant de produits semi-finis en aluminium Constellium a annoncé sa collaboration avec le numéro 1 Européen des aérostructures, Stelia Aerospace et CT Ingénierie sur la thématique de l'impression 3D. Commencées en 2014 entre les trois acteurs, les discussions ont conduit au financement du projet de recherche et développement FAST afin d'investiguer les opportunités d'optimisation des procédés de fabrication additive de l'aluminium en aéronautique.

Encore aux premières phases de développement, le projet FAST a pour objectif à moyen terme d'accélérer et de faciliter la production de larges aérostructures de formes complexes tout en réduisant les coûts et en augmentant l'efficacité du *process*. « FAST va nous permettre d'étendre encore plus les applications de la fabrication additive et d'atteindre des designs et des propriétés complètement nouvelles. La collaboration avec notre client Stelia démontre notre volonté de trouver des alternatives innovantes aux solutions de mise en forme actuelles pour toujours mieux répondre aux besoins de nos marchés cibles » déclare le directeur R & D de Constellium. Au sein du consortium, Constellium apportera la matière première tandis que Stelia se chargera de la conception et de la production des pièces métalliques avec le support de CT Ingénierie pour les parties design et optimisation.

Concernant le secteur de la fabrication automobile en grande série, les technologies de fabrication additive aluminium restent majoritairement utilisées pour la réalisation de prototypes. En effet, les pièces automobiles sont fabriquées pour des séries plus importantes que pour les secteurs de l'aéronautique, de l'aérospatial et de la défense, et les pièces présentent souvent une valeur ajoutée plus faible. Les technologies de fabrication additive ne sont actuellement pas compétitives pour ce secteur. Pour les secteurs de la course automobile et de l'automobile de luxe, la fabrication additive des alliages d'aluminium présente un intérêt pour les mêmes raisons que les secteurs aéronautique et aérospatial. Cependant, il convient de rajouter qu'en parallèle du prototypage rapide, les équipementiers de l'industrie automobile se mettent à investiguer la technologie de fabrication par fusion sur lit de poudre aluminium pour les pièces détachées pour les modèles anciens ou de collection (*i.e.* outillage aluminium de petites pièces moteur).



Figure 11 - Séparateur d'huile pour automobiles de compétition.



Figure 12 - Carter de pompe à huile - alliage d'aluminium AlSi10Mg : réduction du temps de fabrication, conception optimale en termes de propriétés d'écoulement car il n'y a pas d'arêtes vives dues à des trous de perçage (source Concept Laser).

Pénétration de la fabrication additive aluminium par le segment de l'outillage

La réalisation de moules et de noyaux en sable avec addition de liant par fabrication additive, **est destinée à des applications de fonderie d'aluminium.**

En ce qui concerne la fabrication additive aluminium pour l'outillage rapide, le moule en aluminium n'est pas la pièce finale. On parle donc de fabrication additive indirecte. Les moules en alliages d'aluminium actuels sont employés pour deux applications :

- la réalisation de moules prototypes, avec des alliages non spécifiques tels que le 2 017A facilement usinable et relativement peu cher,

- la réalisation de moules destinés à des fabrications de pièces en moyenne série, généralement de 50 000 à 100 000 pièces et jusqu'à un million de pièces, avec des alliages spécifiques de la série 7 000.

L'utilisation des alliages d'aluminium pour de l'outillage rapide s'avère intéressante car l'aluminium présente une conductivité thermique plus importante que l'acier à outil classiquement utilisé pour la réalisation de moules, ce qui permet un refroidissement rapide des pièces et une cadence de production accélérée. De même, ces alliages sont plus facilement usinables car leur dureté est moins importante que celle des aciers à outils utilisés. Ces moules s'usent toutefois bien plus rapidement que ceux réalisés en acier à outils.

D'ailleurs, les moules en alliage d'aluminium employés pour de la moyenne série sont réalisés dans des alliages spécifiques appartenant à la série 7 000, optimisés pour présenter une dureté importante et donc une usure réduite. Toutefois, les essais de mise en œuvre d'alliages de cette série par fabrication additive donnent lieu à des pièces fissurées. Aussi pour une application en outillage rapide, **il est nécessaire de développer des alliages ayant des duretés suffisamment élevées et qui se mettent en œuvre par fabrication additive, ce qui place encore une fois la problématique du développement de nouveaux alliages adaptés à la fabrication additive, au centre des besoins.**

Il est intéressant de créer des moules en fabrication additive sur lit de poudre car cette technologie permet à la fois de réaliser des canaux de refroidissement au plus près de la matière injectée, ce qui permet un temps de refroidissement optimal, et également d'apporter une complexité de forme importante.

Les secteurs du bâtiment et de l'emballage ne sont pour l'instant pas positionnés sur le marché des technologies de fabrication additive aluminium.

Conclusion et enseignements sur cette partie

Les secteurs actuellement concernés par les technologies de fabrication additive aluminium sont ceux pour lesquels les pièces sont complexes, présentent une forte valeur ajoutée et sont fabriquées en petite série. Ces secteurs sont l'aéronautique, le spatial, la défense et l'automobile de luxe ou de compétition.

Par ailleurs, il est important de souligner que la fabrication additive aluminium devrait pénétrer à court terme ces différents marchés par le segment de l'outillage. En effet, les contraintes technologiques, économiques et réglementaires sont moins importantes en fabrication indirecte, ce qui permet aux acteurs de progresser de façon continue. En revanche, il est possible d'apercevoir un véritable paradoxe dans la mesure où le segment de l'outillage aluminium par fabrication additive semble être le plus porteur mais ne représente pas des volumes de matière significatifs car il serait limité à des outillages complexes. Il faudrait alors au moins une dizaine d'années avant que la fabrication aluminium directe ne se développe, ainsi que les volumes associés.

Freins économiques au développement de la technologie

Un des principaux freins à l'implantation de ces technologies est leur coût.

- Le coût d'achat machine est le frein le plus important puisqu'une machine de fabrication additive métallique coûte entre 150 k€ et 1 500 k€ selon la technologie de fabrication utilisée et le niveau de performance visé.
- Comme les technologies de fabrication additive aluminium sont récemment utilisées dans des milieux industriels et donc encore peu caractérisées, **il faut compter des coûts et un temps important de qualification et de mise en place du *process*** pour pouvoir fabriquer des pièces dont on connaît les caractéristiques mécaniques, les propriétés physiques et chimiques, et que l'on peut produire de manière répétable.
- Le troisième frein le plus important en termes de coût est celui **du post-traitement des pièces fabriquées** (traitements thermiques, usinage, finition de surface...). **Puis viennent**

les coûts de main-d'œuvre, en termes de fonctionnement et de formation ainsi que le coût des produits « consommables » (électricité, gaz inerte, poudre ou fil...).

Par ailleurs, concernant les technologies utilisant la poudre comme matière première, **il existe encore peu d'entreprises qui proposent un ou plusieurs alliages d'aluminium spécifiques aux applications de fusion sur lit de poudre**. On peut notamment citer les fournisseurs suivants : TLS Technik, Additive Metal Alloy (AMA), LPW Technology, ACuPowder, New Materials Development (NMD), Tekna, Valimet, ECKA Granules [5] Toutefois, **les poudres proposées présentent un écart de prix variant du simple au quadruple suivant le fournisseur et le cahier des charges** (granulométrie, restriction sur les polluants, ajustement de composition, conditionnement...). À ce jour aucun fournisseur français n'est présent sur ce marché.

Comme énoncé précédemment, ces technologies concernent des applications de niche, puisqu'elles sont rentables pour les pièces fabriquées en petite série, à géométrie complexe et à forte valeur ajoutée. **De plus, l'aluminium et certains de ces alliages sont des matériaux peu chers, lorsque l'on compare avec le coût des procédés de fabrication additive.**

Mettre en forme ces matériaux par fabrication additive est coûteux, et le prix de la pièce finale est peu concurrentiel par rapport à celui d'une pièce fabriquée à partir de procédés conventionnels. Les avantages liés à l'optimisation topologique des pièces et de la diminution du ratio « buy-to-fly » ne sont souvent pas suffisants pour justifier l'utilisation de ces technologies. Par ailleurs, ces technologies sont plus concurrentielles pour des alliages d'aluminium dont le prix des éléments d'alliage est plus important car une faible quantité de matière est perdue dans le *process*, ce qui constitue une économie importante en comparaison aux procédés de fabrication par enlèvement de matière. Ces considérations font qu'il est actuellement difficile d'adopter ce type de technologie pour les alliages d'aluminium.

Dans les années à venir, on peut s'attendre à une diminution du coût des machines, de la matière première, de la formation et de la qualification des *process* car les constructeurs de machines sont de plus en plus nombreux et les technologies de fabrication additive sont de mieux en mieux maîtrisées.

Comparaison avec les autres matériaux et les techniques de fabrication conventionnelles

Comparaison avec les autres matériaux

Les techniques de fabrication additive permettent de mettre en œuvre différents types de matériaux. Les plus utilisés et maîtrisés sont les matériaux polymères, puis viennent les matériaux métalliques et plus rarement, les matériaux céramiques, les carbures, les composites à matrice métallique ou polymère.

- Concernant les polymères, il existe comme pour les métaux plusieurs technologies de fabrication additive ayant chacune leurs avantages et leurs inconvénients : la stéréolithographie (SLA), le frittage sélectif par laser (SLS) et la fabrication par dépôt de fil (FDM).
- **La technologie SLS est identique aux technologies métalliques utilisant un lit de poudre**, à la différence près que le laser fritte la poudre au lieu de fusionner celle-ci. **Les vitesses de fabrication sont par ailleurs plus rapides** car l'apport d'énergie nécessaire au frittage est moindre. Par exemple le constructeur PRODWAYS annonce des vitesses maximales théoriques de l'ordre de 1 000 cm³/h. De plus, cette technologie ne nécessite pas de supports de fabrication et permet une mise en œuvre plus facile car les étapes de post-traitement sont peu nombreuses.
- **Les matériaux céramiques se mettent en œuvre par la technologie de stéréolithographie.** Des matériaux tels que l'alumine, la zircone, etc., sous forme de poudre sont mélangés avec un liant polymère et subissent une polymérisation permettant

de mettre la pièce en forme. Le matériau obtenu nécessite une opération de déliantage et de frittage pour atteindre les caractéristiques physiques et mécaniques recherchées.

- Concernant les matériaux métalliques, le **tableau 7 donne un point de comparaison entre les différents matériaux en termes de vitesse maximale de fabrication**. Les vitesses renseignées sont issues des données du constructeur EOS, pour une machine EOSINT M280 comprenant un laser de 400 W, qui correspond à un standard en termes de machines de fusion laser sur lit de poudre.

Matériaux	Vitesse maximale de fabrication (cm ³ /h)
Acier maraging 300	19,8
316L, 17-4 PH	7,2
15-5 PH	11,5
Inconel 625, hastelloy X	7,2
Inconel 718	14,4
Alliages de titane	32,4
Alliages d'aluminium	26,6

Tableau 7 - Vitesse maximale de fabrication (cm³/h) de différents matériaux métalliques selon les données du constructeur EOS, pour une machine EOSINT M280 contenant un laser de 400 W

Ce tableau montre que les alliages d'aluminium **font partie des matériaux les plus « rapides » à mettre en œuvre par fusion laser sur lit de poudre**.

D'un point de vue économique, certains matériaux tels que les alliages de titane et les superalliages se prêtent mieux à la fabrication additive que les alliages d'aluminium, de par leur prix élevé et leur densité importante. En effet si la conception de la pièce est adaptée au procédé de fabrication additive utilisé et si une optimisation topologique est effectuée, la matière est utilisée seulement aux endroits nécessaires, donc plus le matériau est dense et cher, plus l'économie de matière est significative. De même, la quantité de matière perdue lors du *process* de fabrication additive est relativement faible par rapport aux technologies de mise en forme par enlèvement de matière, selon le type de pièce fabriquée, ce qui peut constituer une économie de matière importante. **Ces économies de matière constituent une réduction importante du coût des pièces dans le cas où la matière première est chère** et elles constituent un atout pour justifier de l'utilisation des technologies de fabrication additive plutôt que d'un procédé de mise en forme par enlèvement de matière.

Comme expliqué précédemment, les alliages d'aluminium mis en œuvre par fabrication additive présentent une amélioration de leurs propriétés mécaniques lorsqu'ils sont bruts de fusion, due à leur microstructure fine. De plus, les possibilités qu'offre la fabrication additive sur lit de poudre et par projection de poudre en termes de réalisation de formes complexes et le couplage de ces technologies avec une optimisation topologique font que des pièces peuvent être conçues en offrant un bon compromis entre résistance mécanique élevée et légèreté. **Pour ces raisons, les alliages d'aluminium mis en forme par fabrication additive sont susceptibles de prendre des parts de marché aux matériaux plus denses notamment dans les secteurs où un allègement des structures est recherché. Ainsi des pièces actuelles fabriquées dans des matériaux plus denses (titane, acier...) peuvent être repensées pour une production par fabrication additive en alliage d'aluminium, dans les considérations économiques énoncées précédemment.**

Comparaison avec les techniques de fabrication conventionnelles

Il est difficile de **comparer les technologies d'enlèvement de matière** par usinage et **de mise en forme par fonderie, forgeage, filage**, etc., aux technologies de fabrication additive, **car elles ne permettent pas de réaliser le même type de produits**. Comme énoncées précédemment les technologies de fabrication additive sont particulièrement adaptées pour les petites séries, les pièces complexes ou personnalisées à forte valeur ajoutée.

En fabrication additive, il est plus facile d'estimer un coût de mise en œuvre de la matière car celui-ci dépend directement du volume de matière fusionné composant la pièce. Concernant les techniques conventionnelles, il est difficile de déterminer de manière simple et générale un coût de fabrication unitaire pour des pièces, car celui-ci dépend également de leur complexité, du nombre et du type d'opérations à effectuer pour de l'usinage, de la taille de la série à fabriquer, etc.

Par exemple, d'après les données provenant d'une machine SLM 280 HL du fabricant SLM SOLUTIONS avec un laser de 400 W, sans considérer le coût de main-d'œuvre, de post-traitement, et de perte de poudre, **on établit la courbe du prix de fabrication au gramme en fonction de la surface lasée moyenne pour l'alliage AlSi10Mg** (la courbe correspondant à l'AlSi10Mg est également valable pour une partie des alliages d'aluminium de fonderie car les paramètres de fabrication sont identiques), ce qui permet d'en déduire une approximation du coût de réalisation des pièces. Les résultats sont présentés sur la **Figure 13**, et une comparaison est proposée avec du 17-4 PH et de l'acier *maraging*.

Il est important de retenir que l'ordre de grandeur du coût matière de réalisation d'une pièce correspond à quelques euros par gramme.

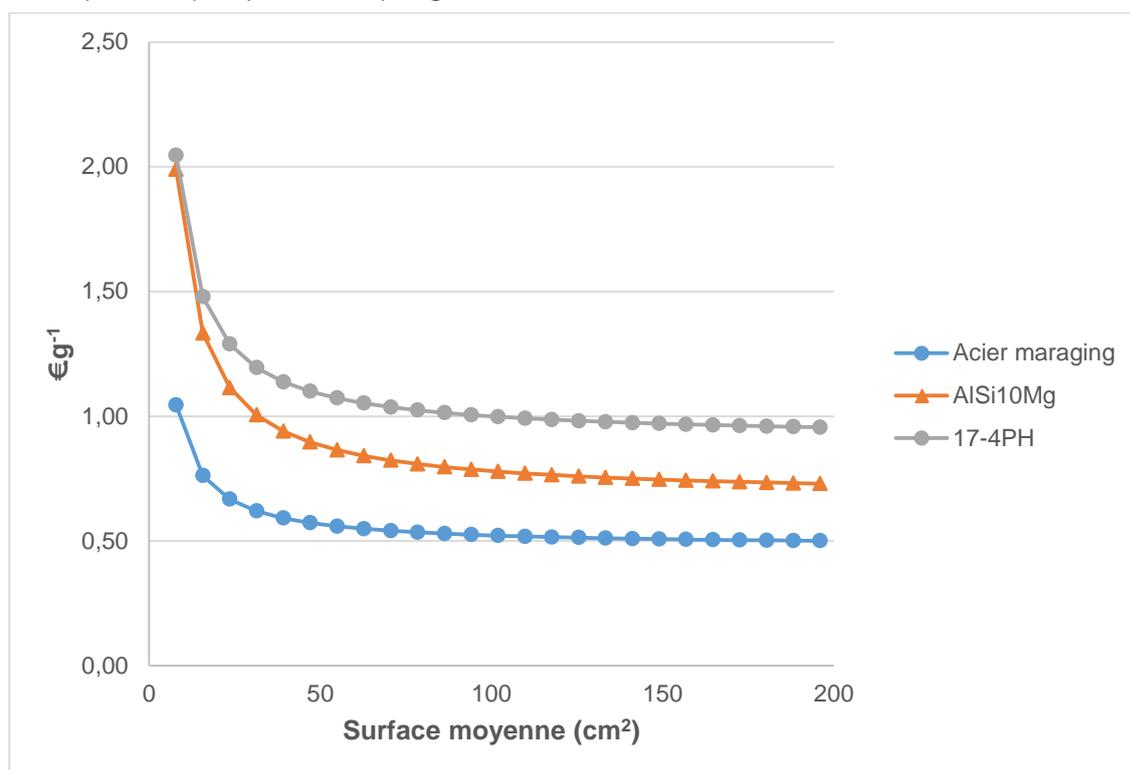


Figure 13 - Prix de fabrication au gramme en fonction de la surface moyenne lasée sur l'ensemble des couches, pour une machine de fabrication sur lit de poudre SLM 280 HL du constructeur SLM SOLUTIONS.

D'un point de vue environnemental, les techniques de fabrication additive permettent de réduire considérablement les pertes de matière lorsque l'on compare avec les techniques d'usinage, ce qui coïncide avec une économie d'énergie et une réduction des émissions puisqu'une quantité de matière première moins importante est nécessaire. De même, les technologies de fonderie nécessitent un apport d'énergie important pour fondre la matière et il est nécessaire de fabriquer préalablement des moules et noyaux pour la fabrication des pièces.

Les machines de fabrication additive requièrent également l'utilisation de produits « consommables » : les équipements de protection jetables, les filtres permettant de garantir une atmosphère propre au sein de la chambre de fabrication, etc. Ces produits, une fois consommés, doivent être pris en charge de manière plus ou moins lourde. Ainsi les filtres doivent être inertés à l'eau et retraités par des sociétés spécialisées. Par ailleurs, les procédés de fabrication additive ne requièrent pas directement l'utilisation de lubrifiant ou de liquide de refroidissement. Toutefois, les pièces réalisées par fabrication additive nécessitent des opérations de post-traitements plus ou moins lourdes.

Conclusion et enseignements sur ces deux parties

En termes de compromis entre propriétés mécaniques et légèreté, la fabrication additive des alliages d'aluminium apporte de nouvelles solutions qui permettent d'envisager le remplacement de matériaux plus denses pour un allègement des structures. Ces propriétés en font un matériau bien adapté aux applications du secteur des transports et est depuis longtemps mis en forme par moulage dans la filière fonderie pour des pièces de formes assez complexes. Cependant dans le secteur de la fonderie, la fabrication additive aluminium pourrait concurrencer le procédé à cire perdue dans la mesure où les coûts en fabrication additive baisseraient suffisamment. Le forgeage des alliages d'aluminium ou matriçage est également bien implanté pour réaliser des pièces à caractéristiques mécaniques élevées dans l'aéronautique ou l'automobile. En revanche même si la fabrication additive de pièces en aluminium est plus productive que celles des autres métaux, le coût limité de ce métal ne présente pas le même effet de levier pour le développement de cette technologie. Enfin la facilité d'usiner dans la masse les alliages d'aluminium fait que ce procédé conventionnel est bien implanté industriellement et qu'il reste nécessaire pour des phases de parachèvement des pièces. Comme pour les autres métaux, le premier levier pour l'adoption de la fabrication additive est la réalisation de pièces de formes non réalisables par les autres procédés, par exemple des pièces indéformables, en gardant à l'esprit que certaines formes bien spécifiques ne sont toutefois pas réalisables en fabrication additive.

Conclusion générale

Les récents développements concernant le jeu des principaux acteurs, Constellium pour l'élaboration du métal, Airbus Group pour les clients finaux, montrent que l'aéronautique est le secteur d'application qui tire le développement de la fabrication additive des alliages d'aluminium. Cependant, aujourd'hui, une meilleure utilisation des matériaux ou une amélioration du ratio « buy-to-fly », rapport entre la masse de matière mise en œuvre pour réaliser une pièce et la masse qui vole effectivement, ne sont pas des critères suffisants pour justifier l'intégration de la fabrication additive pour la mise en forme de l'aluminium où le coût de matériau et le coût machine sont relativement bas.

Ce secteur est demandeur de pièces de grandes dimensions pour les aérostructures. Des procédés productifs comme le procédé fil-arc semblent pouvoir se développer avantageusement par rapport aux procédés de fusion laser sur lit de poudre. Les nouveaux procédés vont demander de nouveaux alliages (microstructure, résistance mécanique) dans la mesure où les solutions actuelles sont conçues pour les étapes classiques de corroyage caractéristiques des procédés conventionnels de laminage, d'extrusion et de forgeage-matriçage.

Dans d'autres secteurs d'activité, comme la plasturgie, la fabrication additive pourrait être appliquée à la réalisation de moules à durée de vie courte en aluminium et à coût relativement bas, en permettant l'incorporation de canaux de refroidissement interne de type « conformal cooling » non réalisables par les procédés conventionnels. Cependant le bilan économique doit prendre en compte de nombreux paramètres : il n'est pas sûr que la meilleure productivité du moule mieux refroidi justifie le surcoût de sa fabrication additive, car on vise là à fabriquer un moule « jetable » dédié à une série de pièces moulées relativement courte. De plus, l'utilisation de moules en alliages d'aluminium réalisés par fabrication additive nécessite le développement d'une nuance à dureté importante, qui puisse se mettre en œuvre.

La construction automobile utilise de plus en plus l'aluminium pour des raisons d'allègement mais ce secteur est celui de la fabrication grande série tirée par les coûts. La fabrication additive n'y trouve actuellement sa place que pour le haut de gamme, le prototypage et les petites séries. Par ailleurs dans ce secteur, l'aluminium est concurrencé par les matériaux polymères ou composites à matrice polymère qui eux aussi sont l'objet de développement en fabrication additive, de manière sans doute plus avancée.

Description des scénarios prospectifs de développement de la fabrication additive aluminium

Sur la base de l'analyse développée dans ce volet, il existe un gros enjeu autour de la recherche de nouveaux alliages d'aluminium dans la mesure où il s'agit d'un matériau complexe à travailler en fabrication additive et qui demande d'importants développements sur les machines. Aujourd'hui, les caractéristiques données par les fournisseurs de poudres manquent de fiabilité et doivent être caractérisées à nouveau par l'utilisateur, ce qui représente des coûts importants (surtout dans le cas où ceux-ci ne sont pas mutualisés). L'optimisation topologique s'applique aux alliages d'aluminium pour maximiser sa contribution à l'allègement des pièces mais elle doit intégrer les contraintes de fabrication. La complexité des formes peut également rendre difficile la maintenance des pièces. Les technologies actuelles de fabrication additive ne permettent pas d'atteindre une précision dimensionnelle du niveau de celle de l'usinage conventionnel : 90 % des pièces sont reprises en usinage. Actuellement l'intérêt économique de la fabrication additive aluminium est faible sur de la grande série (au même titre que les autres matériaux métalliques, polymères ou céramiques) voire sur de la fabrication directe de pièces aluminium. En effet, il s'agit d'une mise en forme plus complexe en termes de paramètres de fabrication qui implique d'importants développements au niveau des machines, ce qui laisse entrevoir une pénétration de la fabrication additive aluminium par le segment des outillages plutôt que la production directe de pièces, au moins sur le court terme.

En reprenant la méthodologie de construction des scénarios prospectifs décrits dans le rapport principal, l'idée est ici de conduire une analyse selon les mêmes scénarios mais du point de vue de l'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, fournisseurs de matière) et validés lors d'un atelier de travail dédié aux enjeux de la fabrication additive aluminium. Pour illustrer enfin les différents cas d'utilisation identifiés ainsi que les enjeux et les verrous associés, des exemples concrets de pièces aluminium seront apportés.

Sécurité-environnement et recyclage

La fabrication additive aluminium avec source de matière sous forme de fil, rencontre des problématiques de recyclage, de qualité, de sécurité et d'environnement connues et peu critiques.

Les spécificités de la filière poudre en termes de recyclage de la matière, de qualité, de sécurité et d'environnement sont similaires à celles des autres matériaux métalliques pour la fabrication additive.

Il faut noter que de par leur faible densité, les poudres d'aluminium sont plus pulvérulentes que celles des autres métaux, mais les dispositions actuelles en termes de sécurité prennent en compte ce problème.

Scénario 1 – Prototypage et expérimentation

La diffusion de la fabrication additive est plus lente pour l'aluminium que pour les autres métaux car l'aluminium est peu coûteux à mettre en forme par les techniques conventionnelles et plus facile à usiner (il a été pionnier pour l'usinage à grande vitesse). En ce sens, les autres métaux ont pris de l'avance. Le prototypage et l'expérimentation se présentent ainsi comme le scénario naturel d'adoption et de progression de la filière en fabrication additive aluminium.

Le prototypage est essentiellement utilisé afin d'intégrer des pièces complexes, de tester les propriétés des matériaux et d'avoir une représentativité de la pièce désirée. L'aluminium sera intéressant pour réaliser des prototypes en fabrication rapide dans la mesure où cela permettra de s'approcher au mieux des caractéristiques de la pièce finale. Le scénario prototypage avec l'aluminium est caractérisé par les points suivants :

- en cas de besoin de validation rapide de formes géométriques (fonctionnalité, encombrement) pour réitérer et aller vers une forme finale, **l'aluminium n'est généralement pas nécessaire**. En effet, la plupart des maquettes sont aujourd'hui réalisées en polymères ;
- prototype de préindustrialisation qui doit être représentatif de la pièce finale car il faut que le matériau soit le plus proche possible de celui qui sera utilisé *in fine*. On distingue également deux sous-catégories d'usages ici qui présentent des impacts complètement différents :
 - la production rapide de moules et noyaux sable par fabrication additive grâce à des procédés spécifiques. Ce segment connaît aujourd'hui une bonne dynamique mais doit encore faire face à de nombreux développements : en effet l'impression avec un liant inorganique n'est pas encore au point. Il s'agit ici de prototypage indirect dans la mesure où il est possible de réaliser des très petites séries différentes selon le procédé de fonderie classique,
 - la fabrication additive aluminium directe de prototype de préindustrialisation.

Actuellement les prototypes en fabrication additive aluminium sont destinés à des bancs de test mais la fabrication additive ne rivalise pas avec l'injection pour des raisons économiques car cette dernière permet des cadences beaucoup plus élevées.

Le gain de performance apporté par la fabrication additive dans le prototypage est un gain sur les temps de développement et de mise au point qui accélère la mise sur le marché.

Pour la fabrication d'outillages pour la production en série, des prototypes en aluminium seraient moins coûteux en matière ce qui permettrait de faire de ce métal un alliage dédié au prototypage. Ce point est contrebalancé par certaines caractéristiques de l'aluminium défavorable à la fabrication additive : forte réflectivité, faible densité favorisant la dispersion de la poudre, etc. L'aluminium est moins coûteux en matière mais le coût du *process* augmente le coût de la pièce finale. L'aluminium convient pour la fabrication additive de pièces simples et à performances limitées (pas en termes de caractéristiques mécaniques, celles-ci sont plutôt bonnes, sauf si on les compare aux alliages de titane, aciers, superalliages) et une piste serait de développer de nouveaux alliages d'aluminium capables de résister à des températures plus importantes qu'actuellement. La température de fusion relativement basse de l'aluminium et la concurrence des matériaux composites en limite les perspectives. En revanche, le volume de l'offre poudre est relativement faible mais suffisant pour le scénario prototypage.

À moyen long terme, on peut envisager des pièces multimatériaux, l'ajout d'aluminium par fabrication additive sur des pièces de grandes dimensions. En fonderie, la fabrication de moules ou de noyaux sable en fabrication additive est une activité de prototypage qui permet d'améliorer le processus de fonderie aluminium traditionnel. Cela permet de concevoir des moules sans limite de taille et à des coûts très faibles. Les délais de fabrication sont fortement raccourcis. L'aluminium peut être mis en œuvre par fabrication additive par le procédé de stratoconception pour le prototypage : on usine des plaques d'aluminium pour reconstruire couche par couche un modèle, en y ajoutant des inserts de positionnement et des renforts. Pour les grandes pièces, la fabrication additive n'est pas compétitive pour les procédés utilisant des poudres d'aluminium en raison de la taille, du coût des machines, et du prix de fabrication de l'ordre de l'euro au gramme. Les procédés de dépôt de fil sont plus adaptés à l'aluminium car le dépôt de fil est extrêmement facile : un robot de soudage est moins cher qu'une machine poudre et simple à utiliser. En revanche les états de surface sont plus grossiers, la métallurgie différente et il faut effectuer un usinage. Les alliages d'aluminium actuellement utilisés sont principalement des nuances pour la fonderie : le prototypage pourrait se développer en mettant à profit la recherche de nouveaux alliages pas forcément issus de la fonderie pour satisfaire à un cahier des charges, une fonctionnalité ou une complexité plus grande. Le scénario du prototypage repose sur de nouveaux matériaux à tester : à court terme il faudrait consolider la *supply chain* sur des nuances bien connues. À plus long terme, de nouveaux matériaux présentant de nouvelles propriétés (aluminium-lithium). Il faudrait rechercher des alliages offrant des performances similaires aux alliages d'aluminium mis en forme par corroyage, en gardant à l'esprit qu'en fabrication additive on n'obtiendra pas exactement les mêmes propriétés. Actuellement le Scalmalloy est le seul adapté à la fabrication additive. On peut imaginer au moins entre trois et six alliages aluminium pour la fabrication additive appartenant aux catégories suivantes :

- alliages de base,
- alliages hautes caractéristiques mécaniques,
- alliages hautes caractéristiques thermiques.

Le scénario prototypage pourrait également englober divers développements :

- mise au point de standards sur la poudre pour remédier aux défauts intrinsèques, sous forme de plage de granulométrie, morphologie, humidité, etc.,
- mise au point de paramétrages de machines, voire développement de machines dédiées à l'aluminium (cf. travaux de Fives), mise à profit des nouveaux lasers de 1 000 W à faisceau en créneau au lieu d'un faisceau gaussien, générant moins de déperdition d'énergie et donc moins de porosités,
- mise au point de méthodes spécifiques de caractérisation ne concernant pas exclusivement les alliages de fonderie (AlSi7Mg0,6, AlSi10Mg),
- amélioration et adaptation des post-traitements à l'aluminium (reprise d'usinage, traitements thermiques, traitements de surface, compression isostatique à chaud HIP). Les producteurs d'aluminium ont établi des modèles métallurgiques pour prévoir les traitements thermiques nécessaires mais ces modèles destinés à la fonderie ne sont pas forcément valides pour la fabrication additive. Si un modèle automatique complet semble inaccessible, l'exploration des liens entre une vingtaine de caractéristiques et les propriétés de la poudre est en cours.

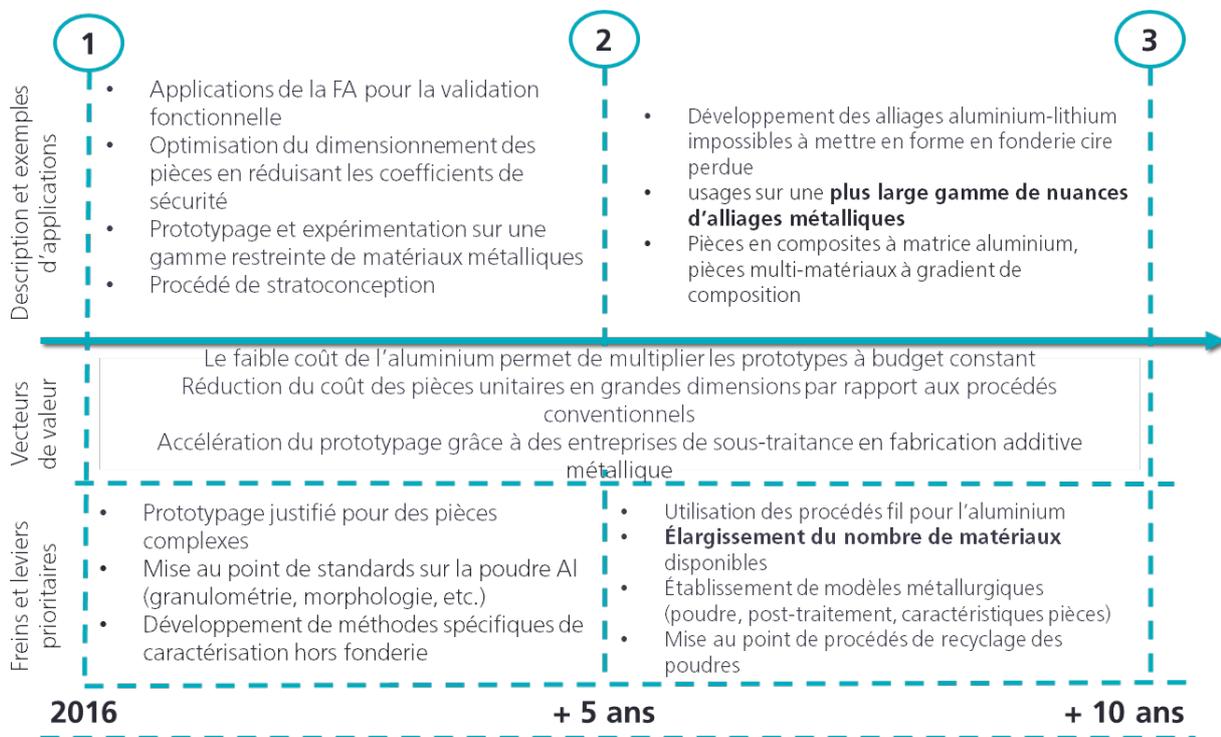


Figure 14 - Synthèse du scénario aluminium n°1 : Prototypage et expérimentation

Conclusions et enseignements :

- **l'aluminium étant moins avancé que les autres métaux, le scénario prototypage semble plus ouvert, sans avoir une position majeure,**
- ce scénario présente une véritable problématique matériau car l'aluminium n'est pertinent que sur le sous-segment préindustrialisation,
- l'aluminium n'est nécessaire que si la pièce doit présenter une représentativité matière/performance. Cela peut passer par des noyaux sable en fabrication additive ou de la fabrication directe aluminium pour obtenir une validation en préindustrialisation.

Scénario 2 – Industrialisation de la personnalisation

Le deuxième scénario est celui de la personnalisation des produits, Dans une dynamique dite de « personnalisation de masse », la fabrication additive permet de réaliser des pièces ou des objets uniques à des prix très inférieurs aux procédés conventionnels.

On distingue cependant deux cas principaux qui regroupent les vecteurs de valeur de ce scénario, à savoir le gain de confort, d'esthétique ou de précision dans les opérations : le premier concerne la personnalisation esthétique : pour l'aluminium, ce cas exclut la personnalisation dans le domaine biomédical et concerne plutôt l'aviation d'affaires, l'automobile, l'architecture et le bâtiment.

Dans la mesure où ce scénario intègre une dimension industrielle et qu'il a vocation à réaliser un produit fini, la montée en efficacité des procédés aura un impact certain pour l'amélioration de la qualité de surface, notamment sur les segments haut de gamme ou du luxe. Cependant, c'est avant tout l'évolution et la démocratisation de la demande qui seront le véritable moteur.

La personnalisation vise la production en séries de plusieurs milliers de pièces dans l'automobile ce qui limite le potentiel de diffusion de la fabrication additive. Ainsi Fives a été contacté par l'automobile pour de la personnalisation esthétique. Il y a aussi un intérêt pour refaire des pièces aluminium pour les vieilles voitures : ce marché peut entrer dans le cadre de ce scénario, cependant il semble également compatible avec le scénario 4 dans le cadre de la gestion des pièces en fin de vie. Pour le secteur du bâtiment, de grands distributeurs du bricolage souhaitent une personnalisation fonctionnelle (outillages à façon pour des plombiers, écrous et tubes introuvables, visseuses avec des têtes de vissage) en fabrication additive pour être adaptées aux moyens de fixations de formes et de géométries différentes. L'aluminium est le métal choisi car plus léger.

Comme pour les autres matériaux, la diffusion de ce scénario est surtout conditionnée par la consolidation de la demande de produits sur-mesure ou personnalisés, Actuellement un frein semble être le manque de capacité de production en fabrication additive aluminium ne permettant pas de réaliser les demandes avec une réactivité suffisante.

Un marché porteur pour la personnalisation en aluminium est celui du spatial notamment pour des pièces de satellites très légères.

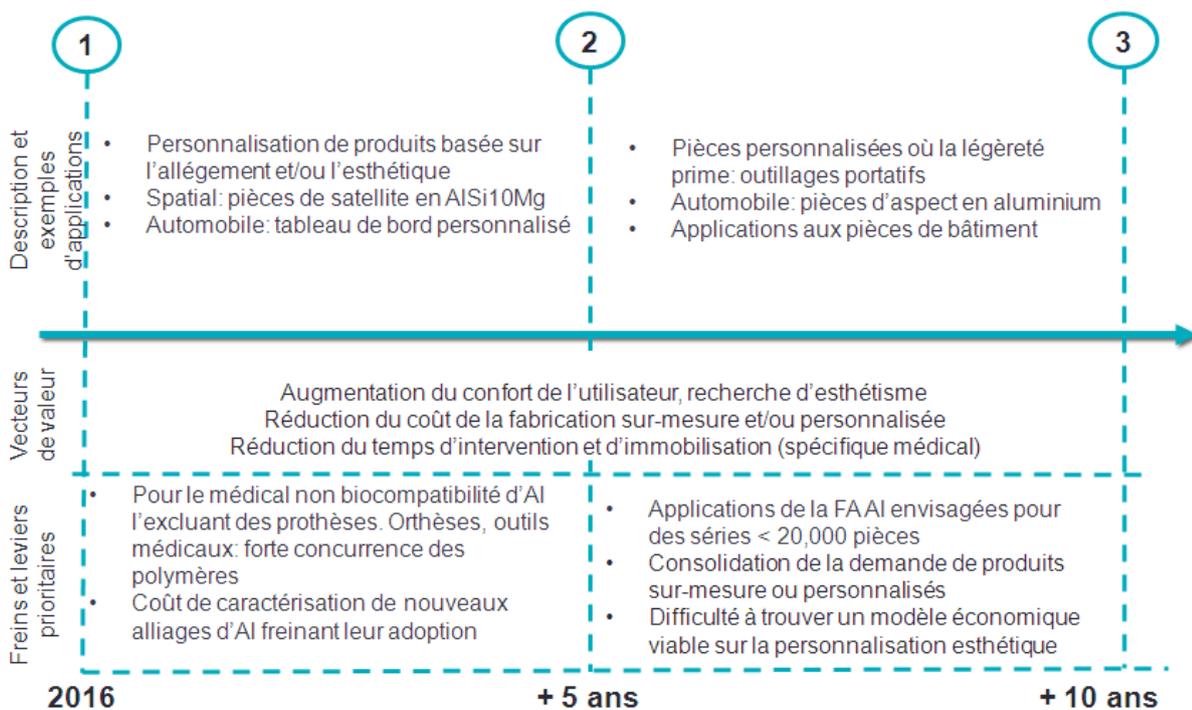


Figure 15 - Synthèse du scénario aluminium n°2 : Industrialisation de la personnalisation, de l'esthétique au fonctionnel.

Conclusions et enseignements :

- **un scénario industriel tiré par le spatial et l'aéronautique,**
- **un modèle économique difficile à trouver, car l'aluminium est peu présent sur le médical et le luxe.**

Scénario 3 – Production série et gain de performance

État et perspectives de marchés

Actuellement, le seuil économique pour la fabrication aluminium est de quelques centaines de pièces à l'horizon de cinq ans et puis atteindra quelques milliers avec les nouvelles machines.

Selon deux acteurs majeurs finaux du domaine des transports aérien et ferroviaire, 2 à 3 % des pièces devraient trouver un modèle économique pour passer en fabrication additive dans les cinq à dix ans.

Les deux marchés principaux de l'aluminium sont l'aéronautique pour les aérostructures, et le secteur spatial. Le scénario série se développera pour l'aluminium s'il apparaît un avantage de performance pour les grandes pièces. On peut également fabriquer de nombreuses petites pièces de quincaillerie aéronautique où l'on gagne en termes de *supply chain* mais il faut que le gain de poids soit un critère essentiel.

En termes de typologie de pièces à réaliser en aluminium, le segment applicatif des corps creux est porteur car ceux-ci sont très complexes à réaliser en usinage. Dans le domaine de l'énergie, sur certaines pièces rapportées dans les échangeurs, notamment pour les échangeurs de petite taille pour la génération d'hydrogène, il y a un vrai besoin pour améliorer le coût global de l'échangeur même si la pièce est plus chère à fabriquer. Dans l'électronique, une application à fort potentiel de l'aluminium est la réalisation de plaques froides.

Par ailleurs, pour les pièces en aluminium, la gestion de la fin de vie du produit pourrait être une opportunité de série : les procédés traditionnels sont utilisés pendant la phase de livraison et pendant les cinq années car les moules seront à disposition. Après cinq ans et la perte ou la détérioration du moule, la faible quantité ne justifie pas un nouveau moule et la fabrication additive prend tout son sens.

Principaux leviers de développement

Le levier de développement portera surtout sur les données matériaux et les données procédés pour établir de bonnes pratiques de fabrication.

Évolution des machines

En fabrication additive aluminium, l'amortissement des machines constitue le premier poste de coût. Toutes les nouvelles machines sont plus chères que les précédentes (multiplication des sources, stratégie de lasage). Pour une utilisation en série, les machines ont été conçues par des laséristes et pas par des fabricants de machines-outils : peu de machines sont capables de tenir au-delà de 4 000 heures de fonctionnement. L'intégration des post-traitements aux machines est un point-clé pour la série mais celle-ci ne semble pouvoir se réaliser à court terme.

Optimisation des processus

On constate actuellement une tendance à la réduction du coût des matières premières (moins de 25 € du kg). Si les fabricants de machines arrivaient à élargir le spectre de poudre, ce serait bénéfique pour le prix de la poudre. Il est nécessaire d'adapter les poudres en définissant des standards, les machines en fixant des plages paramétriques et le post-traitement pour obtenir un procédé industriel fiable.

Opportunité de nouveaux matériaux

L'alliage aluminium-lithium est impossible à mettre en œuvre par fonderie cire perdue : un producteur d'aluminium a fabriqué des prototypes matière qui ont la légèreté et la robustesse requises et sont compatibles avec la fabrication additive.

En ce qui concerne les alliages, pour fabriquer une pièce à gradient de matière, l'aluminium peut être intéressant à cœur pour l'allègement mais on peut avoir besoin de mettre de l'acier pour avoir des performances mécaniques, or cette solution est difficile à réaliser avec des procédés conventionnels.

De nouvelles nuances métalliques, composite à matrice aluminium ou intermétallique (aluminure de titane) ont l'avantage d'avoir une faible densité et haute tenue à la température, cependant celles-ci sont plus à considérer comme les autres métaux (cf. volet 8 autres métaux).

Le schéma d'adoption de la fabrication additive aluminium série pourrait être le suivant :

- pièce unitaire : dans le cas de l'outillage, la fabrication additive aluminium permet de simplifier le *process*,
- 1-2 pièces en fabrication additive directe sauf si on doit prouver que la pièce va tenir en fatigue on peut privilégier l'outillage rapide à la fabrication directe car on n'a aucune garantie,
- 15-20 pièces avec fabrication de moule en cire perdue en SLA puis fonderie mais certaines formes ne sont pas toujours réalisables en cire perdue,
- 1 000 pièces : fabrication d'outillages. on peut inclure dans ce scénario la production récurrente de moules avec refroidissement conforme permettant une productivité accrue en plasturgie.

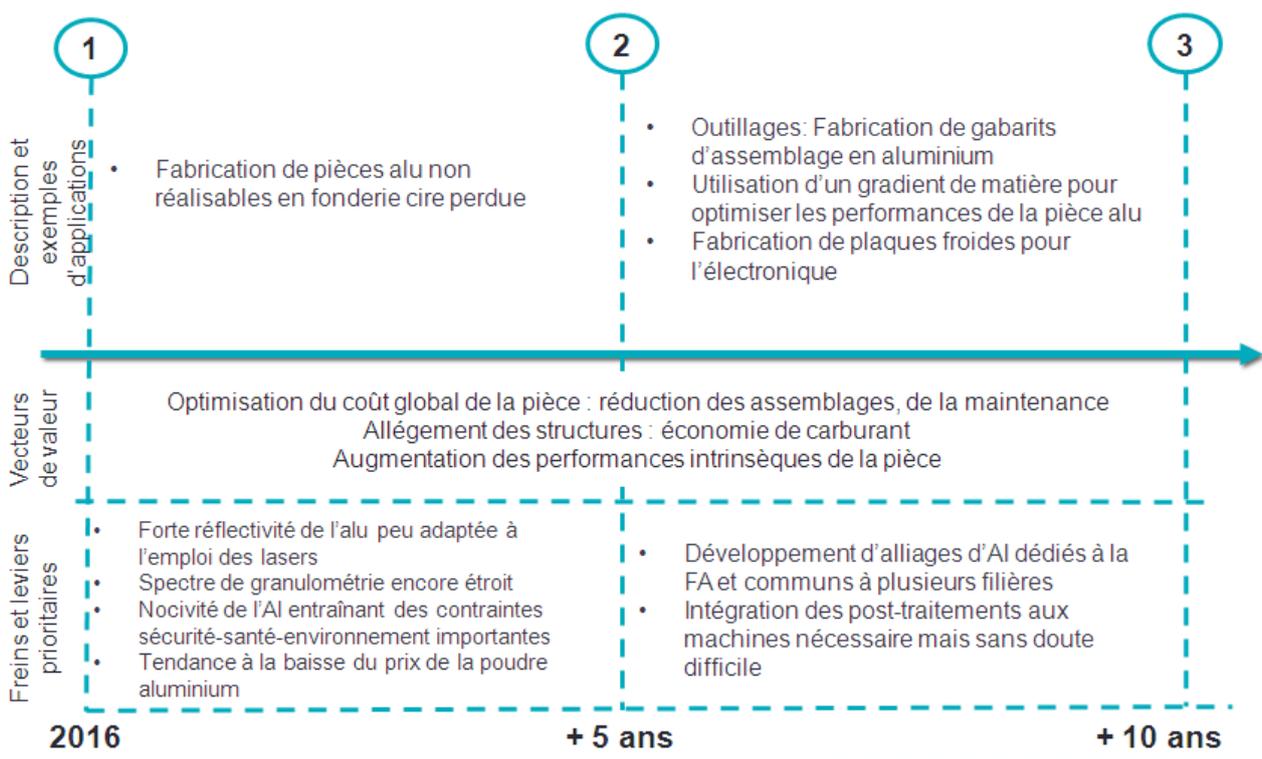


Figure 16 - Synthèse du scénario aluminium n°3 : production série et gain de performances.

Conclusions et enseignements :

- **l'aéronautique et le spatial sont les principaux marchés où ce scénario peut se déployer,**
- **la fabrication additive aluminium peut remédier aux limites de la fonderie en cire perdue,**
- **des marchés potentiels existent : échangeurs, électronique,**
- **freins : il est nécessaire d'optimiser les processus, de la poudre aux post-traitements.**

Exemple de la fabrication de culasses en aluminium²⁸

- Illustration du scénario 1 : prototypage indirect via la fabrication rapide de moules et de noyaux en sable.
- Illustration du scénario 3 : une production industrielle mais limitée aujourd'hui à la course automobile.

Introduction

L'analyse est ici menée sur le cas des culasses en aluminium, qui sont des pièces utilisées dans l'industrie automobile, de dimension 400 x 150 x 250 mm en moyenne et qui présentent un poids de 15 kg environ. La fabrication additive de culasses en aluminium peut être envisagée à travers deux technologies : la fabrication directe métal par un procédé de fusion laser, ou la fabrication du moule (et noyaux internes) ou de partie de moule en sable.

La réalisation de moules ou de noyaux en sable avec un procédé d'impression est déjà utilisée en France (en phase de développement pour les très petites séries notamment). C'est une technologie qui va très probablement se démocratiser dans les années à venir. En effet, la géométrie interne des culasses devenant de plus en plus complexe, les industriels sont confrontés à de nombreux verrous techniques (réalisation des noyaux, positionnement dans le moule) que la fabrication additive peut lever.



Comparaison avec les procédés conventionnels

Les culasses en aluminium sont traditionnellement fabriquées par le procédé de moulage basse pression ou coquille gravité. Les volumes de série dépendent du niveau de gamme du modèle automobile final : en effet, cela représente plusieurs millions d'unités par an pour un véhicule standard de série contre une production unitaire (jusqu'à une dizaine par an) pour les voitures de luxe ou de course.

Motivations à l'adoption de la fabrication additive

- Procédé par fusion de métal : la fabrication additive directe par fusion métal semble judicieuse sur des pièces unitaires ou de faible série, généralement caractéristique de moteurs de course (Formule 1) ou de moteurs de voitures de luxe car le développement de ce type de moteur est long et onéreux. Au vu des faibles séries de pièces, les outillages représentent une part importante du prix de la pièce (>50 %). De plus, la technologie de fabrication additive métal permettrait l'intégration de fonctions à géométries complexes (non réalisable avec un autre procédé) afin d'améliorer les performances du moteur.
- Procédé sable : les fabricants de culasses travaillent sur la fabrication de noyaux avec un liant inorganique (à très faibles émissions). Avec les méthodes de fabrication traditionnelles, il est difficile de réaliser des noyaux rigides avec ce nouveau liant. De plus, la multiplication des noyaux dans un moule (environ cinq) complexifie grandement la réalisation des culasses et génère du rebut. La fabrication additive permettrait de complexifier la géométrie des noyaux et d'en diminuer le nombre par moule tout en utilisant un liant inorganique. Sur une vision à long terme, on peut donc s'attendre à ce que des parties de moules ou de noyaux complexes (non réalisables autrement) soient réalisés par fabrication additive. Cependant, au vu de la taille des séries automobiles et des faibles cadences des machines de prototypage, il est peu probable de voir un basculement de la production vers des noyaux ou des parties de moule en fabrication additive avant 2030.

Les cadences et les coûts liés au secteur de l'automobile demandent une adaptation des machines existantes pour répondre à ces besoins spécifiques. Actuellement, la *supply chain* n'est pas structurée (peu ou pas de prestataires de service spécialisés sur ce type de technologie comme on peut en trouver sur le plastique ou le métal).

²⁸ Synthèse de l'analyse réalisée par l'IPC, partenaire du consortium. Analyse complète disponible en annexe.

Identification des verrous et freins au développement de la fabrication additive

Concernant les procédés CLAD ou SLM en aluminium, les freins majeurs au développement sont les temps de fabrication et les coûts (environ 100 fois supérieur à la fabrication actuelle). Les technologies vont évoluer dans les dix prochaines années pour atteindre des coûts et des temps de fabrication divisés par trois mais cela ne sera pas suffisant pour rendre la technologie concurrentielle pour des pièces en grande série. De plus, la fabrication additive directe en aluminium n'est aujourd'hui pas au point, du fait d'un manque de maîtrise de la qualité des pièces (oxydation, manque d'alliages, qualification).

Par ailleurs, la technologie d'impression 3D sable doit également évoluer car aujourd'hui, ni la production en ligne ni l'impression avec un liant inorganique ne sont au point. Une adaptation de ce procédé de fabrication doit être réalisée.

Pour les freins liés à la fabrication additive directe de l'aluminium, une réduction des coûts et des temps de fabrication permettra de réaliser des pièces unitaires ou de très petites séries en fabrication additive directe pour des pièces personnalisées et complexes. Dans les années à venir, la qualité sera maîtrisée et ne sera plus un frein au déploiement de la technologie.

Impacts sur la chaîne de valeur

Aujourd'hui, en fabrication additive métallique ou sable, la chaîne de valeur est impactée lors du développement de nouveaux produits, de la production de pièce unitaire ou en faible série (réduction des délais et des coûts de fabrication des outillages ou directement des pièces).

En ce qui concerne la production de noyaux sable, l'impact de la réduction des temps de fabrication additive sera faible car elle est inhérente au procédé de fonderie qui limite lui-même les cadences.

Les machines d'impression 3D sable sont principalement implantées dans des fonderies ce qui va faire évoluer les compétences des fondeurs pour accompagner leurs développements et proposer de nouvelles solutions.

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

Pour l'aluminium, ce scénario est basé sur la production à la demande sans forcément avoir d'impacts sur les flux logistiques dans un premier temps et sur la production sur site d'utilisation ensuite qui impliquerait une transformation du métier de réparateur par exemple. Cependant le besoin de parachèvement rend la production distribuée et atomisée irréalizable dans les dix ans à venir et serait envisageable d'ici vingt ans si on arrive à des précisions sans reprise mécanique. Cela devrait passer d'abord à de la production distribuée mais centralisée en mini-usine qui regroupe les équipements. Pour les procédés en lit de poudre, il faudrait automatiser la suppression des supports qui reste une opération manuelle. L'enjeu est d'arriver à concevoir avec le minimum de support possible (il reste toujours des supports pour l'accroche pièce/plateau) sinon le scénario 4 n'est pas jouable.

À court terme, beaucoup d'autres procédés de mise en forme par fabrication additive de l'aluminium sont bien plus accessibles que le lit de poudre. L'acceptabilité des états de surface de l'additif, différents de ceux des pièces conventionnelles, pour de la pièce de rechange nécessite d'accompagner le client ou les opérateurs de montage pour expliquer en quoi l'aspect est différent. Par exemple Spartacus envisage avec un fabricant de véhicules utilitaires des applications de production à la demande de pièces détachées en acceptant l'état de surface fabrication additive limité car on est dans des gammes où même le client final pourrait l'accepter.

Pour la gestion de la fin de vie des pièces, le scénario concerné rejoint beaucoup celui centré sur la production unitaire (scénario 1). Toutefois pour l'aluminium, fabriquer en fabrication additive de pièces en fin de vie impliquerait de qualifier plusieurs procédés : un procédé de série et un procédé de fin de vie. Le coût de qualification est très élevé en aéronautique qui constitue le premier des marchés de l'aluminium visé par la fabrication additive. En revanche un point favorable aux pièces en aluminium serait leur meilleure réparabilité que les pièces en matériaux composites.

Un développement intéressant par Michelin est celui d'un atelier clé en main miniaturisé et centralisé sur une machine centrée sur une typologie de matière. Un tel outil de production pourrait être favorable au développement de la fabrication additive d'un matériau bien précis comme l'aluminium.

L'opportunité de ce scénario dépend fortement du volume de production attendu par les marchés. Outre l'aéronautique et le spatial, les autres modes de transports (ferroviaire, automobile et naval) consommateurs d'aluminium pourraient être moteur dans l'évolution de la chaîne de valeur. Actuellement le volume de poudre d'aluminium reste très faible mais pourrait augmenter rapidement.

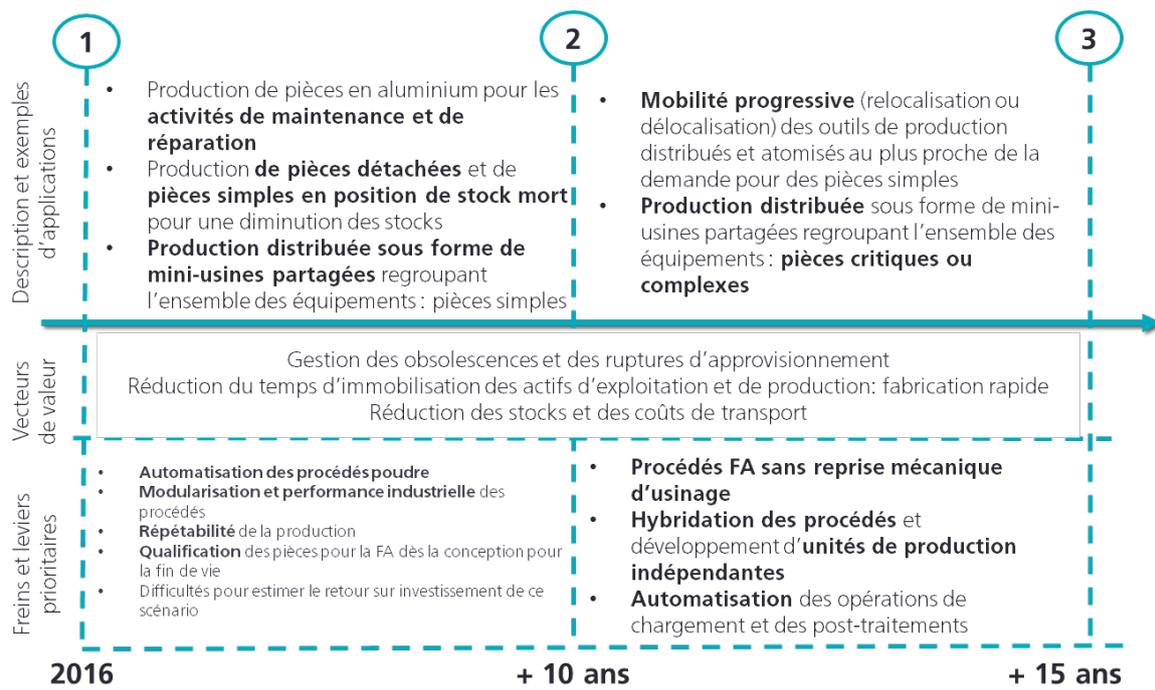


Figure 17- Synthèse du scénario aluminium n°4 : évolution de la chaîne de valeur, flexibilité et production à la demande.

Conclusions et enseignements :

- un scénario tiré par la capacité à produire rapidement une pièce,
- frein économique des coûts de qualification en aéronautique,
- freins technologiques majeurs : procédés lit de poudre opérations de post-traitement, répétabilité du procédé,
- forte dépendance de ce scénario de l'ampleur de la demande globale.

Conclusion générale aux scénarios aluminium

Le scénario 1 combine présérie et recherche de performances. Il constitue une première étape vers le scénario 3, orienté vers la recherche de nouvelles conceptions de pièces qui donnerait un poids industriel à la fabrication additive de l'aluminium. Cependant la fabrication additive en aluminium sera peut-être limitée à des volumes très faibles à court terme et une estimation prudente permet d'évaluer le marché mondial à quelques centaines de tonnes en 2020 seulement. La fabrication d'outillages industriels tels que des gabarits d'assemblage ou les fixations pourrait être envisagée dans la mesure où ces alliages légers pourraient concurrencer les matériaux polymères pour ce genre d'applications. Le scénario 4, plus orienté fabrication unitaire, est moins probable car il dépend fortement du *business model* qui se mettra en place. Enfin, le scénario 2 est globalement tiré par le marché biomédical où l'aluminium est peu présent.

À court-moyen terme, la capacité à pouvoir livrer dans un temps réduit semble avoir plus d'importance pour développer la fabrication additive que la capacité à développer de nouvelles formes. Les procédés lit de poudre en aluminium ne semblent pas être une réalité industrielle dans les cinq ans à venir. La fabrication additive peut permettre de développer des alliages d'aluminium permettant de concurrencer les composites, titanes et superalliages mais sur des niches (meilleure réparabilité que les composites par exemple). Il n'est pas sûr que la fabrication additive permette de développer des ruptures en termes de propriétés capables de concurrencer les autres métaux, au moins à court terme.

La fabrication additive de l'aluminium pourrait donc évoluer selon une combinaison de plusieurs scénarios, marquée par le prototypage et la présérie dans un premier temps et s'ouvrir à moyen terme vers les autres scénarios, avec une rupture envisageable à l'horizon de cinq ans.

Le tableau de synthèse suivant cherche à établir une vue d'ensemble des principales tendances dégagées concernant les perspectives de la fabrication additive de l'aluminium sans prétendre à la validation définitive du potentiel des différents scénarios sur les segments de marché analysés. Le positionnement faible/moyen/fort est relatif dans un marché donné. Un même niveau de positionnement peut être quantitativement très différent d'un marché à un autre.

Scénario Marché	Prototypage et expérimentation	Personnalisation	Production série et gain de performance	Évolution de la chaîne de valeur : flexibilité et production à la demande
Aérospatial	Moyen (nouveaux matériaux, pièces de grande taille)	Faible (niche sur l'aviation de luxe, intérieurs, le spatial)	Fort (allègement, intégration de fonction) (Scalmalloy)	Moyen (frein du coût de qualification d'un nouveau procédé)
Médical	Faible	Faible	Faible	Faible
Outillage	Moyen (segment porteur à court terme)	Moyen	Fort	Faible (le procédé conventionnel est toujours utilisé)
Automobile	Faible	Moyen	Moyen	Moyen (segment de la pièce détachée non critique)
Bien de consommation et grand public	Faible	Moyen (articles de sport personnalisés)	Faible	Faible (la fabrication personnelle pas envisagée avant 2030)
BTP	Faible	Faible (personnalisation de bâtiments)	Faible	Faible
Énergie	Faible	Faible	Faible	Faible
Ferroviaire	Faible	Faible (régionalisation des matériels ferroviaires)	Faible	Moyen (gestion des obsolescences, réduction du temps d'immobilisation)

Tableau 8 - Évaluation de l'impact des scénarios prospectifs aluminium sur les différents marchés cibles de l'étude

Propositions de recommandations spécifiques à la fabrication additive aluminium

Les axes de recommandations spécifiques à la fabrication additive aluminium devraient contribuer au scénario majeur, en l'occurrence le scénario 3 « Production série et gain de performance » :

- optimiser globalement les processus poudre, de la matière première au contrôle en passant par les machines et les post-traitements,
- rechercher des adaptations des traitements thermiques au type de métallurgie obtenu par fabrication additive,
- développer la recherche métallurgique pour mettre au point de nouvelles nuances d'aluminium compatibles avec la fabrication additive : une phase de présélection pourrait être réalisée en commun par les acteurs concernés, sans préjuger des développements menés de manière confidentielle. L'intérêt serait de mettre au point des alliages d'aluminium améliorant le compromis entre la réduction de la densité spécifique, meilleures caractéristiques mécaniques dont la résistance à la fatigue, et la meilleure tenue à des températures plus élevées.

Bibliographie

- [1] K. Kempen, L. Thijs, J. Humbeeck et J.-P. Kruth, «Mechanical properties of AlSi10Mg produced by Selective Laser Melting,» *Physics Procedia*, pp. 439-446, 2012.
- [2] A. Mauduit, S. Pillot et F. Frascati, «Application study of AlSi10Mg alloy by selective laser melting, physical and mechanical properties, microstructure, heat treatments and manufacturing of aluminium metallic matrix composite (MMC),» *Metallurgical Research & Technology*, pp. 1-23, September 2015.
- [3] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk et C. Emmelmann, «Additive manufacturing of metals,» *Acta Materialia*, pp. 371-192, July 2016.
- [4] D. Buchbinder et K. Wissenbach, «Additive manufacturing of high-strength aluminium components,» *Fraunhofer Institute for Laser Technology ILT*, June 2011.
- [5] P. Calves et CETIM, «Matériaux disponibles en fabrication additive,» Senlis, 2016.
- [6] E. Herderick, «Additive Manufacturing of Metals: A Review,» *Materials Science and Technology*, pp. 1413-1425, October 2011.
- [7] T. Mahale, D. Cormier, O. Harrysson et K. Ervin, «Advances in electron beam melting of aluminum alloys,» 2007.
- [8] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri et H. Li, «Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 465-481, May 2015.
- [9] J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, P. Ma et Y. Zhai, «The effect of inter-layer cold working and post deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys,» *Journal of material processing technology*, n° %1230, pp. 26-34, 2015.
- [10] B. Delebecque, «Intégration de fonctions avancées à l'inter-strate de pièces réalisées par le procédé de Stratoconception,» Université Henri Poincaré, Nancy, 2007.
- [11] F. C. Inc, «TheFabricator,» 2016. [En ligne]. Available: <http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/understanding-ultrasonic-welding>. [Accès le 05 24 2016].
- [12] G. S. Kelly, S. M. Just, S. G. Advani et G. W. Gillespie, «Energy and bond strength development during ultrasonic consolidation,» *Journal of materials processing technology*, n° %1214, pp. 1665-1672, 2014.
- [13] K. Taminger et R. Hafley, «Electron Beam Freeform Fabrication for Cost Effective Near-Net Shape Manufacturing,» Metals & Thermal Structures Branch, NASA Langley Research Center, Hampton, 2006.
- [14] S. Inc, «Sciaky Inc, Industrial metal 3D Printing, Arc + EB welding,» 2016. [En ligne]. Available: <http://www.sciaky.com/>. [Accès le 25 05 2016].
- [15] N. Aboulkhair, N. Everitt, I. Ashcroft et C. Tuck, «Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting,» *Additive Manufacturing*, pp. 77-86, August 2014.
- [16] E. Olakanmi, R. Cochrane et D. K.W., «A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties,» *Progress in Materials Science*, March 2015.
- [17] D. Buchbinder, H. Schleifenbaum, S. Heidrich, W. Meiners et J. Bültmann, «High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts,» *Physics Procedia*, pp. 271-278, 2011.
- [18] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E. Ambrosio et E. Atzeni, «From Powders to Dense Metal Parts: Characterization of a Commercial AlSiMg Alloy Processed through Direct Metal Laser Sintering,» *Materials*, pp. 856-869, March 2013.
- [19] J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, J. Bai, Y. Zhai et P. Ma, «The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy,» *Materials Science & Engineering A*, n° %1651, pp. 18-26, 2015.
- [20] A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina et J. Ding, «Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications,» *Procedia CIRP*, n° %137, pp. 48-53, 2015.
- [21] M. Cabrini, S. Lorenzi, T. Pastore, S. Pellegrini, D. Manfredi, P. Fino, S. Biamino et C. Badini, «Evaluation of corrosion resistance of Al-10Si-Mg alloy obtained by mean of Direct Metal Laser Sintering,» *Journal of Material Processing Technology*, pp. 326-335, December 2015.
- [22] T. Wohlers, «Wohlers Report 2013,» Wohlers Associates, Fort Collins, 2013.
- [23] S. Pillot, «Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques,» *Techniques de l'ingénieur*, pp. 1-37, février 2016.
- [24] T. Kimura et T. Nakamoto, «Microstructures and mechanical properties of A356 (AlSi7Mg0.3) aluminum

- alloy fabricated by selective laser melting,» *Material and Design*, pp. 1294-1301, October 2015.
- [25] H. Rao, S. Giet, K. Yang, X. Wu et C. Davies, «The influence of processing parameters on aluminium alloy A357 manufactured by selective laser melting,» *Materials and Design*, pp. 334-346, July 2016.
- [26] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk et C. Emmelmann, «Additive manufacturing of metals,» *Acta Materiala*, pp. 371-392, July 2016.
- [27] H. Zhang, H. Zhu, T. Qi, Z. Hu et X. Zeng, «Selective laser melting of high strength Al–Cu–Mg alloys : Processing, microstructure and mechanical properties,» *Materials Science & Engineering A*, pp. 47-54, December 2015.
- [28] A. B. Spierings, K. Dawson, M. Voegtlin, F. Palm et P. J. Uggowitzer, «Microstructure and mechanical properties of as-processed scandium modified aluminium using selective laser melting,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2016.

Annexes

Fiche référence de la poudre Scalmalloy®

APWORKS

by Airbus Group

Design. Materials. Serial Production.

Material Data Sheet - Scalmalloy®

Material Description

Scalmalloy® material is designed to be processed using Laser Powder Bed Additive Layer Manufacturing (ALM) processes. Due to the high cooling rates and rapid solidification, a unique microstructure is achieved which rivals the performance of the highest grade aluminium foundry products. Coupling these material properties with the design freedom provided by ALM processes can enable high performance parts with a level of functionality previously impossible to achieve.

General Properties

Properties	Values
Density (g/cm ³)	2.70
Typical tolerance (µm)	± 100
Smallest wall thickness (mm)	1.0
Surface roughness, as built (µm) *	Ra 10 / Rz 80 *

Mechanical Properties

Properties	Values
Young's Modulus (GPa)	65
Yield Strength (MPa)	450
Ultimate Tensile Strength (MPa)	490
Elongation at Break (%)	8
Vickers Hardness (HV0,3)	177

Values stated in the datasheet refer to the minimum properties that are reached using Additive Layer Manufacturing in the least strong direction of the material.

The values of the mechanical properties are generated from tests according to DIN EN 2002-001 standards from specimens that have been heat treated and machined.

* The surface roughness values depend on the measurement method used and the orientation of the surface. The values quoted here give an indication of what can be achieved for certain surfaces.

Scalmalloy® is a protected trade mark, and unauthorised or unlawful copying of the material concept is strictly prohibited.

Airbus APWorks GmbH | Willy Messerschmitt Str. 1 | 82024 Taufkirchen | Germany

Tel.: +49 (0) 89 607 28237 | info@apworks.de

REV 0005 – 20160401

Glossaire

- DED, *Direct Energy Deposition* : dépôt de matière sous flux dirigé
DMD, dépôt direct de métal
EBAM, *Electron Beam Additive Manufacturing* : fabrication additive par fusion par faisceau d'électrons
Matriçag : forgeage des alliages non ferreux, dont les alliages d'aluminium
SLM, *Selective Laser Melting* : fusion sélective par laser
WAAM, *Wire Arc Additive Manufacturing* : fabrication additive fil-arc

Index des figures

Figure 1 - Principaux constructeurs de machines de fabrication additive par procédé.....	11
Figure 2 - Enveloppe de transmission mécanique en aluminium AlSi10Mg : réductions de poids, de coût, de temps de fabrication et liberté de conception (source Concept Laser).....	15
Figure 3 - Exosquelette bionique de moto en Scalmalloy® par fabrication additive.....	17
Figure 4 - Roue de pompe à eau pour moteur de sport automobile.....	17
Figure 5 - Courbe de sensibilité à la fissuration pour l'aluminium en fonction du taux d'élément d'alliage.....	19
Figure 6 - Propriétés mécaniques obtenues pour de l'AlSi10Mg brut de fabrication, avec un laser de 200 W. ...	23
Figure 7 - Pièce non prévue pour de la fabrication additive (à gauche) et pièce prévue pour de la fabrication additive.	25
Figure 8 - Exemple de l'optimisation topologique d'une pièce	25
Figure 9 - Représentation schématique des domaines d'intérêt des technologies de fabrication additive par rapport aux procédés conventionnels de fabrication.....	28
Figure 10 - Première pièce de fabrication additive en aluminium qualifiée pour le spatial d'Airbus Defence and Space UK.	29
Figure 11 - Séparateur d'huile pour automobiles de compétition.....	30
Figure 12 - Carter de pompe à huile - alliage d'aluminium AlSi10Mg : réduction du temps de fabrication, conception optimale en termes de propriétés d'écoulement car il n'y a pas d'arêtes vives dues à des trous de perçage (source Concept Laser).....	30
Figure 13 - Prix de fabrication au gramme en fonction de la surface moyenne lasée sur l'ensemble des couches, pour une machine de fabrication sur lit de poudre SLM 280 HL du constructeur SLM SOLUTIONS.	34
Figure 14 - Synthèse du scénario aluminium n°1 : Prototypage et expérimentation	39
Figure 15 - Synthèse du scénario aluminium n°2 : Industrialisation de la personnalisation, de l'esthétique au fonctionnel.	40
Figure 16 - Synthèse du scénario aluminium n°3 : production série et gain de performances.	42
Figure 17- Synthèse du scénario aluminium n°4 : évolution de la chaîne de valeur, flexibilité et production à la demande.	45

Index des tableaux

Tableau 1 - Principaux constructeurs de machines permettant la fabrication additive en aluminium (d'après Wohlers 2016)	11
Tableau 2 - Avantages et inconvénients des différents procédés de fabrication additive.	14
Tableau 3 - Liste non exhaustive de fournisseurs des nuances AlSi10Mg, AlSi12, AlSiMg0.6 et AlSi9Cu3	15
Tableau 4 - Synthèse de la faisabilité par nuance et par procédé	18
Tableau 5 - Synthèse des principaux freins technologiques de la fabrication additive aluminium	21
Tableau 6 - Comparaison des caractéristiques mécaniques de divers alliages d'aluminium mis en œuvre par fabrication additive	23
Tableau 7 - Vitesse maximale de fabrication (cm ³ /h) de différents matériaux métalliques selon les données du constructeur EOS, pour une machine EOSINT M280 contenant un laser de 400 W.....	33
Tableau 8 - Évaluation de l'impact des scénarios prospectifs aluminium sur les différents marchés cibles de l'étude..	46

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.