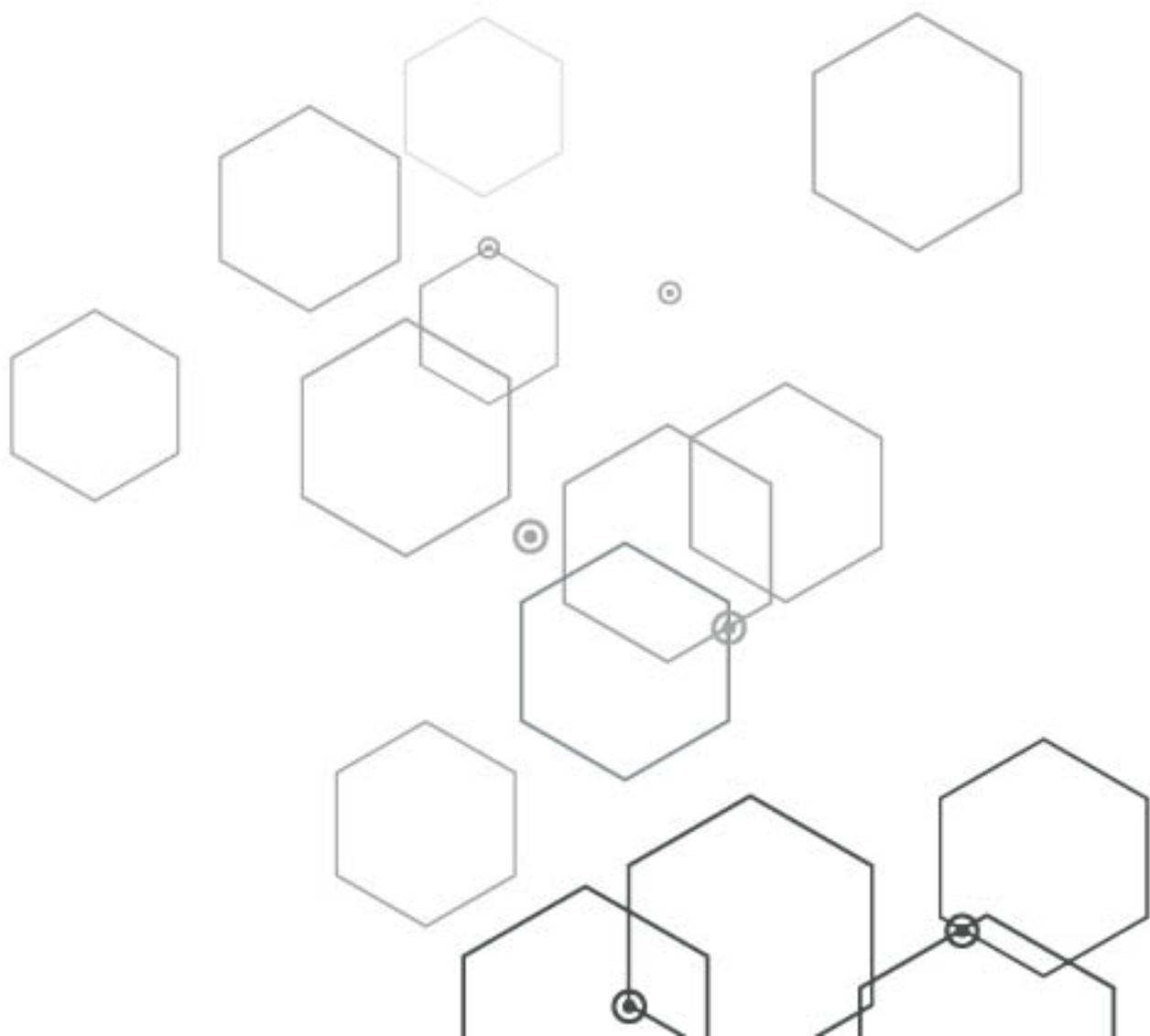


**DIAGNOSTIC ET ÉTUDE
D'OPPORTUNITÉS SUR LA
FABRICATION ADDITIVE
MÉTALLIQUE DANS LE SECTEUR
AÉROSPATIAL DU SUDOE**

ÉTAT DE L'ART DES TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE : TECHNOLOGIES, TENDANCES, OPPORTUNITÉS, CHALLENGES ET APPLICATIONS AU SECTEUR AÉROSPATIAL.



INDEX

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | PORTÉE | 7 |
| 2 | TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE : ÉTAT DE L'ART | 7 |
| 2.1 | <i>Introduction</i> | 7 |
| | Avantages et contraintes | 11 |
| | Classification des technologies de fabrication additive | 14 |
| | Chaîne des approvisionnements de la fabrication additive..... | 18 |
| 2.2 | <i>Technologies de fusion sur lit de poudre</i> | 20 |
| | Fusion sélective par laser (SLM) | 20 |
| | Fusion par faisceau d'électrons (EBM)..... | 24 |
| 2.3 | <i>Dépôt de matière sous flux dirigé pour la fabrication additive métallique</i> | 27 |
| | Fabrication directe (EBAM™ ou Electron Beam Freeform Fabrication (EBF ³))..... | 27 |
| | Dépôt de métal par laser (LMD)..... | 28 |
| | Fabrication additive arc-fil (Wire and Arc Additive Manufacturing - WAAM)..... | 29 |
| 2.4 | <i>Comparaison entre les technologies de fusion sur lit de poudre et de dépôt de matière sous flux dirigé</i> | 32 |
| 2.5 | <i>Maturité des technologies de Fabrication additive</i> | 33 |
| | Technologies de fusion sur lit de poudre | 33 |
| | <i>Fusion sélective par laser (SLM)</i> | 33 |
| | <i>Fusion par faisceau d'électrons (EBM)</i> | 34 |
| | Technologies de dépôt de matière sous flux dirigé | 35 |
| | <i>Dépôt de métal par laser (LMD)</i> | 35 |
| | <i>Fabrication additive avec faisceau à électrons (EBAM®)</i> | 36 |
| | <i>Fabrication additive arc-fil (Wire and Arc Additive Manufacturing - WAAM)</i> | 36 |
| 2.6 | <i>Simulation numérique de fabrication additive</i> | 37 |
| | Introduction | 37 |
| | Modélisation avec des éléments finis..... | 39 |
| | Logiciel commun utilisé | 40 |
| 2.7 | <i>Optimisation topologique</i> | 41 |
| | Introduction | 41 |
| | Techniques d'optimisation continue..... | 42 |
| | Principales difficultés liées à l'optimisation topologique pour la fabrication additive | 43 |
| | Logiciel..... | 44 |
| 2.8 | <i>Stratégie de numérisation</i> | 45 |
| 3 | FABRICATION ADDITIVE – OFFRE TECHNOLOGIQUE | 45 |
| 3.1 | <i>Motivation et potentiel</i> | 45 |
| 3.2 | <i>Prévisions</i> | 48 |
| 3.3 | <i>L'opportunité du marché</i> | 51 |
| | Europe..... | 51 |

| | |
|--|------------|
| États-Unis | 54 |
| Asie | 54 |
| Afrique du sud | 54 |
| Australie | 55 |
| 3.4 <i>Contexte industriel</i> | 55 |
| Matériaux métalliques actuellement disponibles pour la production additive | 60 |
| 3.5 <i>Tendances dans le secteur aérospatial</i> | 61 |
| Introduction | 61 |
| Défis de l'utilisation de la fabrication additive dans le secteur aérospatial | 64 |
| Tendances du secteur aérospatial en matière de Fabrication additive..... | 66 |
| Exemples de composants aérospatiaux réalisés par Fabrication additive. | 68 |
| 3.6 <i>Principaux intervenants du secteur de la FA dans l'espace SUDOË</i> | 73 |
| 3.7 <i>CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE - FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE POUR LE SECTEUR AÉROSPATIAL</i> | 88 |
| Introduction | 88 |
| Résultats..... | 88 |
| Méthodologie | 90 |
| 4 POLITIQUE RÉGIONALE RIS3 DE SUPPORT DE LA MAM | 91 |
| 4.1 <i>Introduction</i> | 91 |
| 4.2 <i>Couverture de la région SUDOË</i> | 92 |
| 4.3 <i>Axe et priorités du RIS3 dans la zone SUDOË en matière de Fabrication additive métallique MAM</i> | 92 |
| 5 GLOSSAIRE | 98 |
| 6 RÉFÉRENCES..... | 101 |

Index des illustrations

| | |
|--|----|
| Figure 2-1. Prévisions du secteur de l'impression 3D au niveau mondial pour la vente de produits et services de FA (en milliards et en millions de dollars respectivement) : Prévisions de 2013 et 2014 (à gauche) et 2016 (à droite) [1]..... | 8 |
| Figure 2-2. Hype Cycle de Gartner. Évolution de la fabrication additive entre 2013 et 2015. [5]. | 10 |
| Figure 2-3. Répartition du pourcentage de secteurs industriels qui utilisent la FA [1]. | 10 |
| Figure 2-4. Impact de la taille de la série sur les coûts de production (exprimé en nombre d'unités ou en volume de production) (à gauche), et impact de la personnalisation sur les coûts de production (à droite). | 13 |
| Figure 2-5. Classification des procédés de FA, des fournisseurs et des fabricants associés, type de matières appliquées et secteurs de marché [4]. | 16 |
| Figure 2-6. Procédés de fabrication additive, ASTM F2792/ ISO17296-2 [8]. | 16 |
| Figure 2-7. Classification des procédés de fabrication additive métallique. | 17 |
| Figure 2-8. Description de technologies de FA métallique [10]. | 18 |
| Figure 2-9. Procédé complet de fabrication additif d'une pièce métallique incluant différentes étapes [8] [11]. | 20 |
| Figure 2-10. Schéma représentant le procédé de fusion laser sélective (SLM) [14]. | 21 |
| Figure 2-11. Paramètres de numérisation représentés de manière schématique | 21 |
| Figure 2-12. Pièce industrielle fabriquée par le biais de la technologie SLM par le centre de recherche IK4-LORTEK. | 22 |
| Figure 2-13. Vue schématique de l'équipement de fusion de faisceau d'électrons [15]. | 24 |
| Figure 2-14. Vue schématique du procédé EBAM™ [18]. | 28 |
| Figure 2-15. Schéma du procédé de dépôt métallique par laser. | 28 |
| Figure 2-16. Diagramme schématique de procédés a) GMAW, b) GTAW et c) PAW [57]. | 30 |
| Figure 2-17. Pièce en titane (systèmes spar BAE) fabriqué par WAAM [58], [59]. | 31 |
| Figure 2-18. L'illustration du procédé d'optimisation topologique continu. | 42 |
| Figure 2-19. Illustration du procédé d'optimisation topologique discret. | 42 |
| Figure 3-1. Tous les procédés de FA. [39] | 46 |
| Figure 3-2. Flux de travail FA. [40] | 47 |
| Figure 3-3. Vente d'équipement FA Source : Rapport Wohlers 2013 [41, 42]. | 47 |
| Figure 3-4. FA appliquée aux secteurs industriels majeurs [1] | 61 |
| Figure 3-5. Analyse de prix composants par rapport à la vitesse de dépôt de poudre métallique en FA, avec un point « mort » comparé à la fabrication par usinage traditionnel aux ratios buy-to-fly traditionnels [27]. | 64 |
| Figure 3-6. Application pour l'espace développée par CATEC et AIRGUS D&S (A) Assemblage de l'adaptateur de charge utile (ACU) du lanceur VEGA, (b) Support de connecteur original, (c) Support optimisé : i. fabrication ponctuelle (assemblage intégré), ii. Optimisation conventionnelle et iii. conception bionique | 66 |
| Figure 3-7. Application spatiale développée par CATEC et AIRBUS D&S (a) support d'origine d'Hipparcos, (b) Support de topologie optimisé produit par SLM. | 67 |
| Figure 3-8. Aileron d'avion bionique développé par Airbus. L'aspect est inspiré de celui du nénuphar [30]. | 67 |
| Figure 3-9. La « cloison bionique » d'Airbus a été présentée à l'Université Autodesk [30]. | 68 |

| | |
|--|----|
| Figure 3-10. (a) Modèle de concept d'hélicoptère, (b) pièce de « maquette » d'évacuation de gaz [36]. | 69 |
| Figure 3-11. Prototype fabriqué par SICNOVA. | 69 |
| Figure 3-12. Quelques exemples de pièces industrielles pour le moulage ou l'outillage de l'aéronautique fournies par AERNNOVA. | 70 |
| Figure 3-13. (A) Buse de mélange pour échappement de turbine à gaz produite par DED-LENS par Optomec, (b) boîtier de support de compresseur produit par PBF-EBM par Arcam, (c) pale de turbine produite par PBF-SLM par Concept Laser, (d) pales de turbine fabriquées par PBF-SLM par Morris Technologies | 71 |
| Figure 3-14. Support de télémètre en aluminium, application spatiale développée par AIRBUS D&S : (A) version originale ; (b) vue du composant optimisé. | 72 |
| Figure 3-15. Développement de structure principale d'ARIANE5, par CATEC et AIRBUS D&S : (a) Vu du LPSS et du lanceur d'ARIANE5 (la bande est assemblée par le biais de l'adaptateur de charge utile (ACU)), (b) Composants FA fabriqués par SLM, (c) Assemblage système, test fonctionnel (up | 73 |
| Figure 3-16. Estimation de l'évolution du développement et de la maturité de la fabrication additive métallique | 89 |
| Figure 4-1. Carte régionale SUDOE 1 | 92 |
| Table Index | |
| Tableau 2-1. Avantages des technologies de fabrication additive | 13 |
| Tableau 2-2. Limites des technologies de Fabrication additive. | 14 |
| Tableau 2-3. Avantages et inconvénients de la technologie SLM. | 22 |
| Tableau 2-4. Description des matières traitées par SLM. | 23 |
| Tableau 2-5. Comparaison entre les procédés EBM et SLM. | 25 |
| Tableau 2-6. Description des propriétés mécaniques et physiques des matières métalliques disponibles pour les différents procédés de FA : faisceaux laser PBF et faisceaux à électrons PB et différentes sociétés. | 25 |
| Tableau 2-7. Avantages et inconvénients de la technologie de dépôt de métal par laser. | 29 |
| Tableau 2-8. Avantages et inconvénients des procédés WAAM. | 31 |
| Tableau 2-9. Comparaison de procédés FA : fusion sur lit de poudre laser par rapport au dépôt de matière sous flux dirigé [2], [22], [23] | 32 |
| Tableau 2-10. Maturité de SLM. | 33 |
| Tableau 2-11. Maturité d'EBM. | 34 |
| Tableau 2-12. Maturité de LMD | 35 |
| Tableau 2-13. Maturité du procédé EBAM | 36 |
| Tableau 2-14. Maturité du procédé WAAM | 36 |
| Tableau 3-1. Applications générales de technologie de fabrication additive dans l'industrie automobile, l'aéronautique, le secteur de l'espace et des moules [44] | 55 |
| Tableau 3-2. Liste des principaux acteurs de fabrication additive métallique | 74 |

1 PORTÉE

Ce rapport est une contribution au Module de travail 1 du projet ADDISPACE « Diagnosis and study of the opportunities of Additive Manufacturing technologies in the aerospace industry at SUDOE region » (Diagnostic et étude des opportunités des technologies de Fabrication additive dans le secteur aérospatial dans l'espace SUDOE) et contient les livrables « **E.1.1.1 Étude de diagnostic** », « **E.1.2.1 Étude des obstacles à l'adoption** », « **E.1.3.1 Étude consolidée des opportunités** ».

Ce rapport décrit l'état de l'art des technologies de Fabrication additive (FA), en se concentrant plus particulièrement sur les toutes dernières technologies de Fabrication Additive Métallique (Metal Additive Manufacturing - MAM), par exemple, les technologies de *fusion sur lit de poudre* (Powder Bed Fusion - PBF) et de dépôt de matière sous flux dirigé (*Directed Energy Deposition* - DED).

Il décrit également les technologies et les tendances qui existent dans l'emploi des technologies de Fabrication additive dans le secteur aérospatial, et étudie les obstacles à l'adoption de cette technologie.

Enfin, ce rapport identifie les opportunités d'utilisation des Fonds structurels européens pour le financement des activités de Recherche et Développement de la Fabrication Additive Métallique et de son cadre d'application dans le RIS3 (Research and Innovation Strategy for a Smart Specialization - Stratégie de recherche et d'innovation pour une spécialisation intelligente).

2 TECHNOLOGIES DE FABRICATION ADDITIVE : ÉTAT DE L'ART

2.1 Introduction

La fabrication additive (FA) désigne un groupe de technologies servant à fabriquer des pièces en trois dimensions directement à partir de données issues d'une conception assistée par ordinateur 3D (CAO 3D) par le biais d'une méthode additive consistant à déposer, puis faire fusionner un matériau de base (poudres) déposé en couches successives. La FA est décrite dans le présent document comme l'opposé des procédés dits de « fabrication par enlèvement de matière » qui font appel à des opérations d'usinage (tournage, fraisage, meulage) ou de formage (pressage, fonte, moulage par injection).

Les termes impression 3D, prototypage rapide, fabrication numérique directe, fabrication rapide et fabrication de formes libres solides sont souvent utilisés pour décrire les procédés de FA.

Bien que cette dernière ne remplace aucun des procédés de fabrication traditionnels, il s'agit d'un catalyseur essentiel pour la création et l'innovation et elle peut représenter un bon complément pour les procédés traditionnels. Donc, la FA reçoit de plus en plus d'attention et d'efforts partout dans le monde, et l'évaluation du potentiel de la FA en tant

que technologie utile, voire révolutionnaire, suscite un énorme intérêt au niveau international. En fait, l'enthousiasme suscité par la FA concerne de nombreux domaines, de l'informatique et la conception de produit aux nouveaux matériaux et au lean engineering. Cette tendance se reflète dans certains indicateurs, comme les prévisions de croissance du secteur de l'impression 3D au niveau international, pour lequel on observe une tendance à l'augmentation exponentielle de 2014 à 2020 (les prévisions de 2013, 2014 et 2016 figurent dans la Figure 2-1) [1].

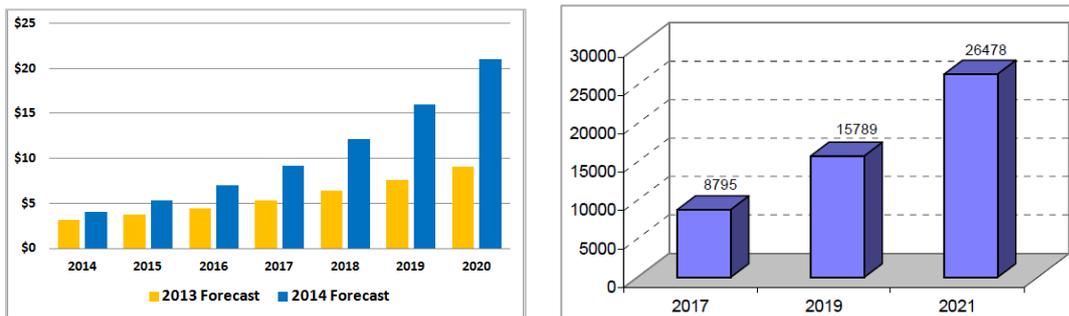


Figure 2-1. Prévisions du secteur de l'impression 3D au niveau mondial pour la vente de produits et services de FA (en milliards et en millions de dollars respectivement) : Prévisions de 2013 et 2014 (à gauche) et 2016 (à droite) [1].

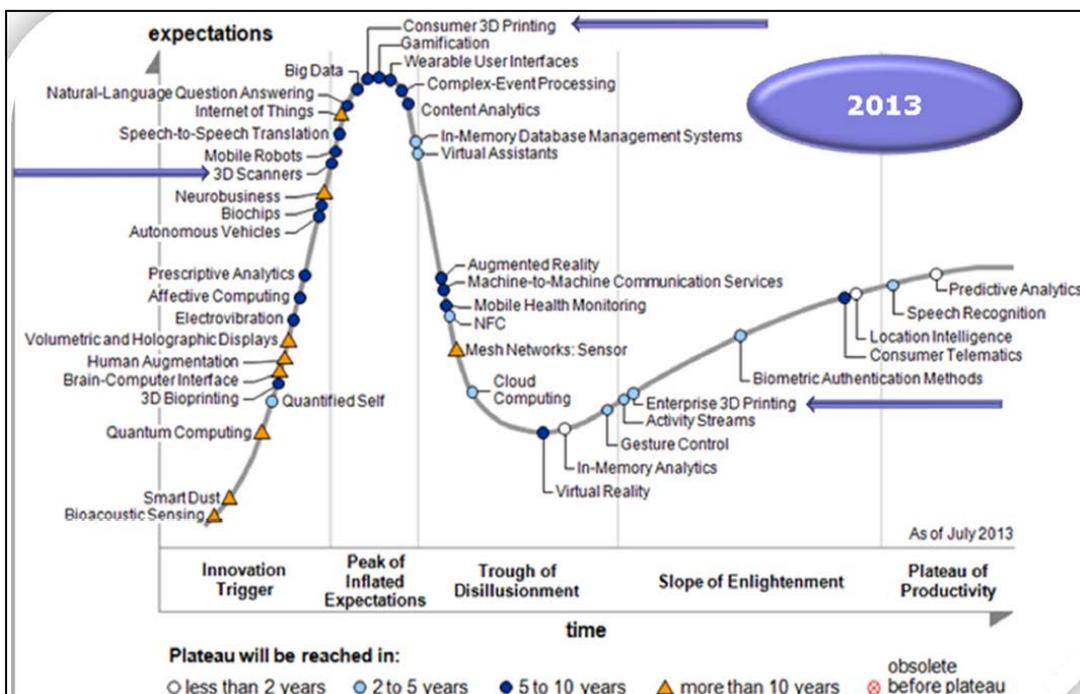
En fait, de nombreux pays différents approfondissent leur connaissance de cette technologie depuis déjà plusieurs années. L'adoption de la FA évolue rapidement, et elle se trouve désormais au cœur même de compétences nationales de différents pays. Aux États-Unis d'Amérique (USA), la fabrication en 3D constitue une priorité nationale, et des investissements massifs sont attendus dans le domaine de la FA. En fait, l'administration des États-Unis a lancé le National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII - Institut de l'innovation de la fabrication additive national) (2012-13), qui est spécialement chargé de coordonner et financer des projets de recherche dans le domaine des technologies de Fabrication additive. Les pays d'Asie jouent également un rôle significatif dans le développement de la FA. Environ 30 % des systèmes industriels de FA sont installés dans la région Asie Pacifique. D'autre part, en Europe, l'utilisation de la FA avec des poudres métalliques constitue un secteur industriel nouveau, en plein développement [2]. Les récents projets européens ayant bénéficié du programme-cadre de financement européen montrent que l'Europe a atteint un haut niveau de recherche dans le domaine de la fabrication additive, en particulier pour ce qui concerne les techniques et les applications de FA spécifiques concentrées dans les domaines médical et aérospatial. En outre, des efforts conséquents ont été déployés pour la normalisation de cette technologie et le développement de la production de pièces de FA de plus grande taille [3].

Le Hype Cycle de Gartner est un outil d'analyse graphique servant principalement à l'étude de la maturité et/ou du niveau d'adoption et d'application sociale de technologies spécifiques. Concernant les technologies de FA, ces procédés ont débuté il y a plus de vingt ans sur le marché du prototypage rapide de pièces pour « maquettes » en plastique pour la conception de produit [4]. Cependant, ils n'ont attiré l'attention du public que ces dernières années, au moment où des opportunités de production directe d'outillage et de pièces se sont présentées dans les secteurs du plastique, des métaux et de la céramique. En fait, jusqu'en 2009, la fabrication additive (FA) n'était même pas référencée dans le Hype

Cycle de Gartner. En 2010, la FA y figurait pour la première fois et la généralisation (la maturité) de la technologie était prévue pour 5 à 10 ans. Entre 2013 et 2015, les technologies de FA apparaissent progressivement plus proches du niveau de production réelle dans certains secteurs (par exemple, en phase « slope of enlightenment » (pente de l'illumination) (voir les détails dans Figure 2-2 [5]).

À ce stade, il faut mentionner que le Cycle Hype de Gartner représente principalement les tendances à l'adoption de différentes technologies, mais dans les faits, les technologies de FA se sont déjà établies au niveau de la production réelle dans certains secteurs.

Comme le montre la Figure 2-3, une étude menée sur 100 fabricants et prestataires de service de systèmes de FA clés (qui représentent plus de 100 000 utilisateurs et clients), et qui demandait à chaque société d'indiquer les secteurs qu'elle fournissait et le montant des recettes qu'elle en retirait a montré qu'en 2014, c'est le secteur des machines industrielles/commerciales (et notamment des équipements bureautiques [imprimantes, ordinateurs, routeurs] et des équipements d'automatisation industrielle [machines à commande numérique et robots]) qui utilise le plus la technologie de FA, Suivi de près par les secteurs des produits/de l'électronique grand public et des véhicules à moteur. Les secteurs de la médecine/du dentaire/de l'aérospatiale sont eux aussi des utilisateurs assidus des technologies de FA [1]



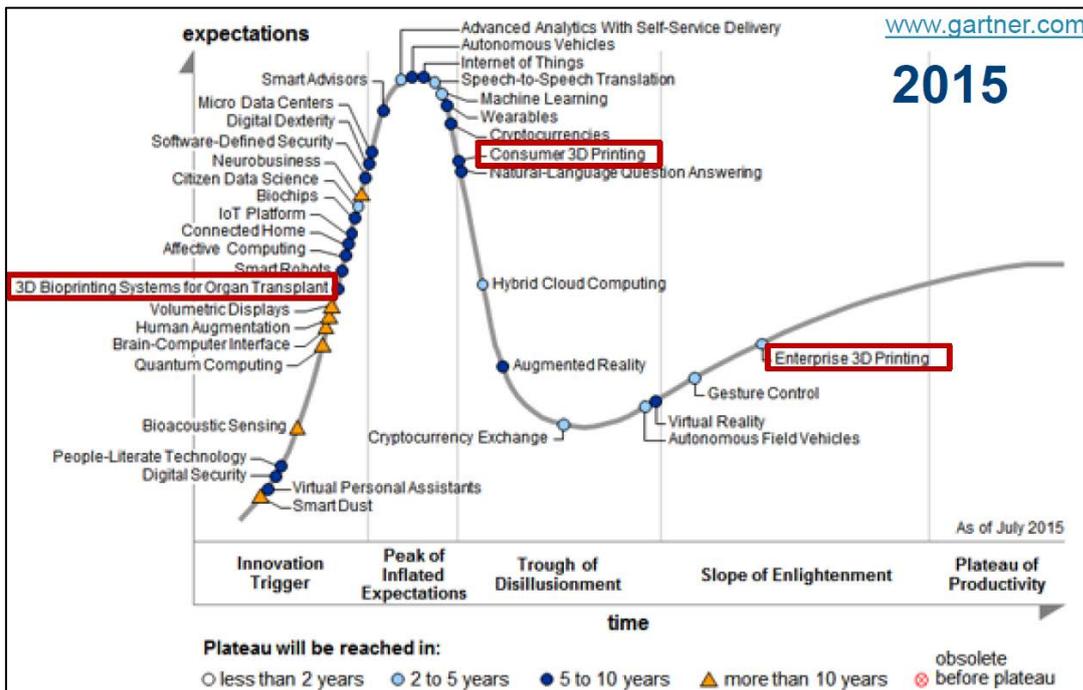


Figure 2-2. Hype Cycle de Gartner. Évolution de la fabrication additive entre 2013 et 2015. [5].

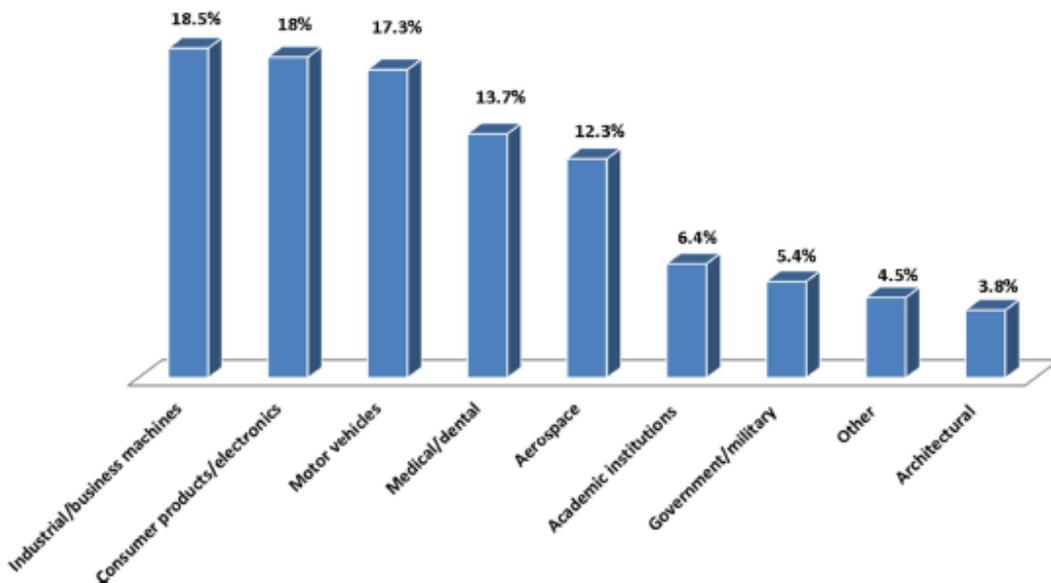


Figure 2-3. Répartition du pourcentage de secteurs industriels qui utilisent la FA [1].

Bien que la Fabrication additive soit largement utilisée dans certains secteurs particuliers, le potentiel d'amélioration de l'utilisation et de la pénétration de nouveaux marchés reste énorme.

Cependant, l'un des problèmes actuels de la FA est que de nombreux secteurs de fabrication traditionnels ne la connaissent pas, ou ne comprennent pas vraiment comment ils peuvent l'utiliser. La FA remplacera certaines méthodes de fabrication (sans les remplacer toutes) et aura en outre la possibilité de compléter celles qu'elle ne peut pas remplacer.

Avantages et contraintes

Aujourd'hui, la Fabrication additive de pièces métalliques est reconnue comme une alternative intéressante aux autres procédés conventionnels en raison de sa capacité à produire des pièces de forme complexe nettes, avec une haute polyvalence des conceptions qui rendent possible la réalisation de structures légères et de nouvelles fonctionnalités, notamment des circuits internes complexes. En outre, des procédés de mise en forme de précision complexe ont besoin de moins de matière première (parfois jusqu'à 25 fois moins) que les procédés d'usinage, ce qui peut être important lorsqu'il s'agit d'usiner des alliages chers ou difficiles à manipuler et peut présenter des avantages significatifs du point de vue de l'environnement [2], [4], [6].

Comme mentionné plus haut, la FA peut offrir des avantages non négligeables à une large gamme d'applications, ce qui peut avoir un impact positif sur les aspects sociétaux, économiques et environnementaux du développement durable. Vous trouverez les principaux avantages des technologies de FA dans le

Tableau 2-1.

Tableau 2-1. Avantages des technologies de fabrication additive

Avantages des technologies de FA

- Des délais de mise sur le marché réduits et une adaptation rapide aux exigences en constante évolution du marché.
- Personnalisation du produit, avec une flexibilité totale de conception et de construction.
- Économie maximale de matériau, le matériau étant ajouté et non enlevé. La production avec mise en forme de précision réduit au maximum le gaspillage de matériaux et le nombre d'opérations post traitement à exécuter.
- Recours minimum à des procédés supplémentaires (par exemple, l'usinage). Réduction des délais et des frais au minimum.
- La pièce est obtenue directement à partir du modèle CAO 3D et donc, aucun poinçon, moule ou outil n'est nécessaire.
- Potentiel de conception décuplé (libéré des contraintes de conception de fabrication conventionnelle). Conception pour personnalisation, Conception pour fonctionnalité, Conception pour plus de légèreté.
- Densité totale des pièces finales (sans porosité résiduelle).
- Possibilité de fabriquer des canaux de forme libre, des cavités internes, des parois étroites, ainsi que différentes formes de structures réticulaires (légères).
- Des techniques de fabrication rationalisées et polyvalentes.

Compte tenu des caractéristiques générales des technologies de FA, elles sont recommandées pour la production de pièces personnalisées en séries limitées.

L'impact sur les coûts de production de la taille de la série et de la personnalisation des pièces est analysé plus en détail dans la Figure 2-4. D'une part, si vous utilisez la FA, la taille de la série a peu d'impact sur le coût. D'autre part, la FA permet de fonctionnaliser et de personnaliser des pièces complexes, avec un impact sur les coûts inférieur à celui de la fabrication traditionnelle. Donc, **plus la forme finale est complexe, plus la FA est avantageuse.**

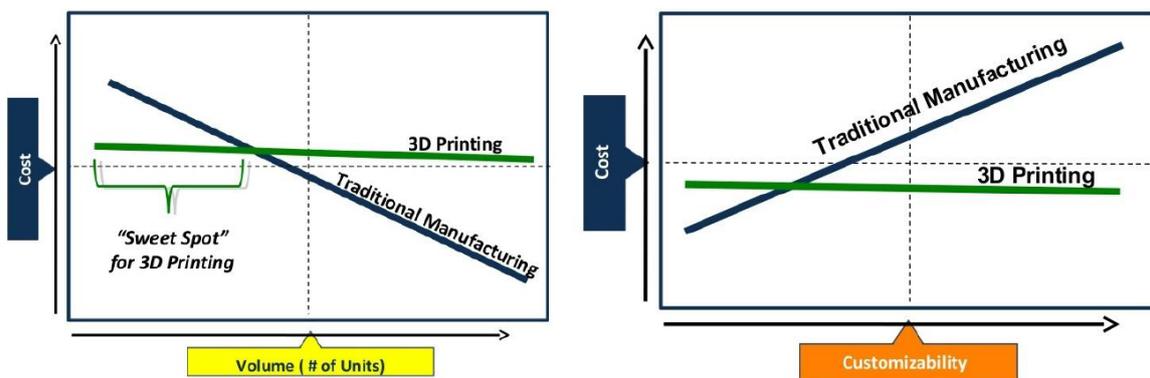


Figure 2-4. Impact de la taille de la série sur les coûts de production (exprimé en nombre d'unités ou en volume de production) (à gauche), et impact de la personnalisation sur les coûts de production (à droite).

Pour tirer pleinement avantage des technologies de FA, après en avoir vu les avantages, il est important d'en connaître les **limites** (

Tableau 2-2).

Tableau 2-2. Limites des technologies de Fabrication additive.

| ➤ Limites des technologies de Fabrication additive |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">➤ Taille de la pièce : Technologies avec lit de poudre : les dimensions de la pièce limitées en fonction de la taille du lit de poudre (systèmes avec lit de poudre : 250x250x250 mm). Lorsqu'on utilise la technique du dépôt de matière sous flux dirigé (ou le dépôt de métal par laser), la taille des pièces est limitée par des délais de production et les coûts excessifs en raison de la faible épaisseur des couches de poudre.➤ Production de petites séries. Le moulage et la fonte sont toujours privilégiés pour la production de gros volumes.➤ Aspects de la conception. Dans le cas des technologies sur lit de poudre, les structures de support amovibles sont nécessaires lorsque l'angle du surplomb est inférieur à 45°. L'orientation de la pièce a une incidence sur la qualité de la surface, le délai de fabrication et le coût de la pièce.➤ Traitement de différents matériaux. Bien qu'il existe de nombreux alliages, les métaux non soudables ne peuvent pas être traités par fabrication additive et les alliages difficiles à souder exigent des approches spécifiques.➤ Propriétés du matériau : les pièces réalisées par fabrication additive tendent à afficher une anisotropie sur l'axe des Z (sens de construction). Il existe également une variabilité des procédés : les propriétés de la pièce finale dépendent d'un grand nombre de paramètres, notamment de la vitesse de construction ou de l'orientation de cette dernière.➤ Post traitement : un traitement est généralement nécessaire pour retirer le support des matériaux après la fabrication. Dans certains cas, un usinage est nécessaire pour obtenir une meilleure finition de la surface ou une précision des dimensions.➤ Manque de normalisation spécifique. |

Classification des technologies de fabrication additive

Parmi les technologies de FA, il est possible d'identifier différents procédés faisant appel à différents matériaux (notamment le plastique, les métaux, la céramique ou les composites), différentes techniques de dépôt et différents modes de fusion et solidification des matériaux. Les technologies de FA sont généralement basées sur l'un des sept **procédés de fabrication primaire** (qui permettent plus de 30 variantes sur des thèmes de base). Le comité F42 de l'institut américain de tests des matériaux (American Society of Testing Materials - ASTM) a classé les procédés de FA comme suit [7] :

1. Polymérisation en cuve : un polymère liquide est durci de façon sélective par photopolymérisation (polymérisation activée par la lumière).

2. Projection de matériau : des gouttelettes de matériau de base (photopolymère) et de matériaux secondaires (par exemple, de la cire) sont déposées sur la zone de construction. Un rayon UV solidifie les photopolymères pour former des pièces solides. Le matériau support est retiré après la construction.

3. Extrusion de matériau : de la matière thermoplastique passe au travers d'une buse chauffée et est déposée sur une plateforme de construction. La buse fait fondre le matériau, puis l'extrude pour former chaque couche de l'objet.

4. Stratification de matériau en feuille : de fines couches de matière (du plastique ou du métal) sont liées entre elles selon plusieurs méthodes (par exemple, par de la colle ou au moyen d'une soudure par ultrasons) afin de former un objet. Un laser ou une lame est ensuite utilisé pour découper le bord autour de la pièce souhaitée, et la matière inutile est retirée.

5. Fusion sur lit de poudre : une source d'énergie thermique (par exemple un laser) fait fondre des particules de matière sélective. Une fois que la couche à fondu, on en crée une nouvelle en étalant de la poudre sur le dessus de l'objet. Le matériau non fusionné sert de support à l'objet en cours de production.

6. Projection de liant : les particules de matière sont liées entre elles de manière sélective grâce à un agent de liaison liquide. Une fois qu'une couche est formée, une autre couche est créée par l'étalement de poudre sur le dessus de l'objet et l'opération est répétée. Le matériau non lié sert de support à l'objet en cours de production.

7. Dépôt de matière sous flux dirigé : de l'énergie thermique concentrée est utilisée pour faire fusionner la matière au fur et à mesure qu'elle est déposée. Les systèmes de dépôt de matière de matériau et fusion utilisent soit l'approche avec fil fondu, soit celle avec de la poudre.

Certaines autres données importantes, notamment le type de matière, le marché principal et certains exemples de sociétés utilisant chacun des sept procédés sont inclus à la Figure 2-5. Les technologies de *Fusion sur lit de poudre (Powder Bed Fusion-PBF)* et de *Dépôt de matière sous flux dirigé (Direct Energy Deposition-DED)* sont celles qui sont utilisées le plus souvent pour la fabrication additive métallique. Les polymères sont généralement traités par projection de matière, extrusion de matériau et photopolymérisation en cuve. Les céramiques hautes performances se voient généralement appliquer des technologies de photopolymérisation.

| Process | Example Companies | Materials | Market |
|----------------------------|--|-----------------------------------|---|
| Vat Photopolymerization | 3D Systems (US), Envisiontec (Germany) | Photopolymers | Prototyping |
| Material Jetting | Objet (Israel), 3D Systems (US), SolidScape (US) | Polymers, Waxes | Prototyping, Casting Patterns |
| Binder Jetting | 3D Systems (US), ExOne (US), Voxeljet (Germany) | Polymers, Metals, Foundry Sand | Prototyping, Casting Molds, Direct Part |
| Material Extrusion | Stratasys (US), Bits from Bytes, RepRap | Polymers | Prototyping |
| Powder Bed Fusion | EOS (Germany), 3D Systems (US), Arcam (Sweden) | Polymers, Metals | Prototyping, Direct Part |
| Sheet Lamination | Fabrisonic (US), Mcor (Ireland) | Paper, Metals | Prototyping, Direct Part |
| Directed Energy Deposition | Optomec (US), POM (US) | Metals | Repair, Direct Part |

Figure 2-5. Classification des procédés de FA, des fournisseurs et des fabricants associés, type de matières appliquées et secteurs de marché [4].

En outre, à la Figure 2-6, les procédés de FA sont classés en fonction du type de matière utilisé (liquide, solide ou poudre) et des procédés primaires décrits au préalable.[8]. Les technologies PBF et DED sont réparties en deux catégories, en fonction du format du métal de remplissage (fil ou poudre) et de la source thermique qui sert à l'application (laser, faisceau d'électrons, soudure à l'arc).

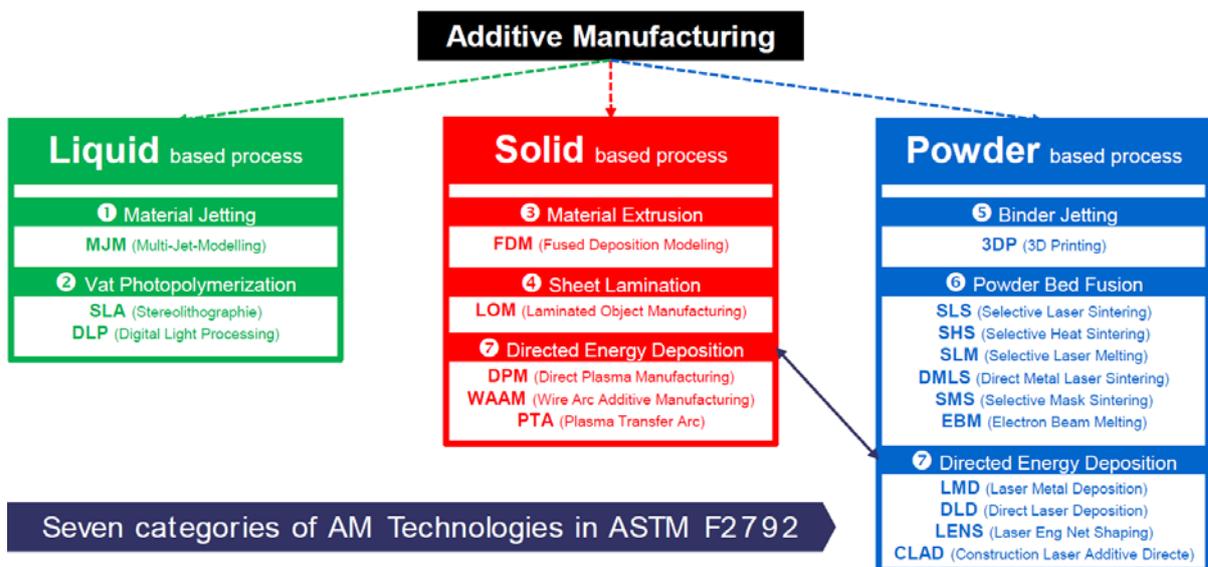


Figure 2-6. Procédés de fabrication additive, ASTM F2792/ ISO17296-2 [8]

Dans le cas particulier des technologies de FA pour pièces métalliques, la Figure 2-7 représente une classification, et notamment le nom du procédé adopté par chaque machine [9].

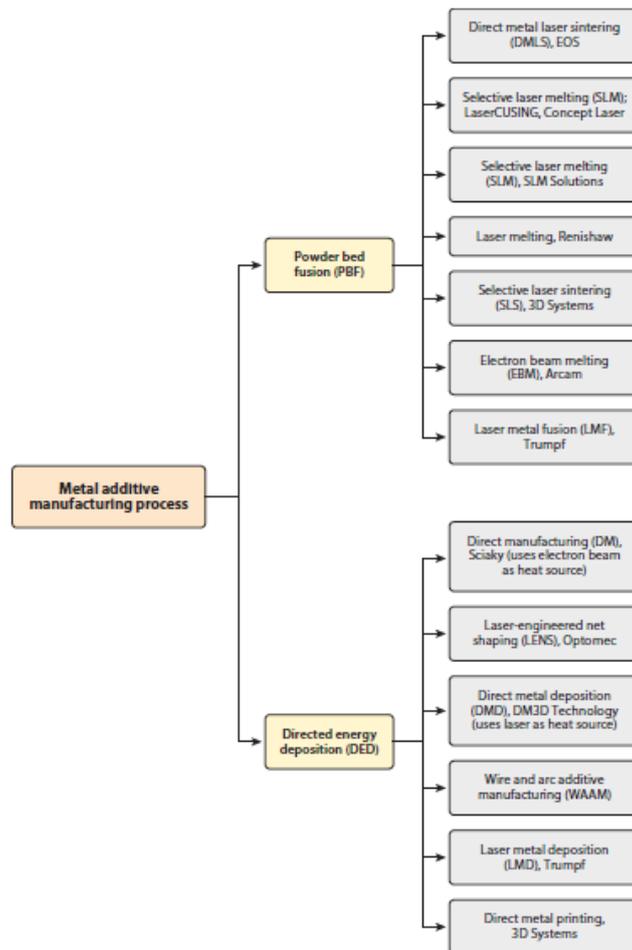


Figure 2-7. Classification des procédés de fabrication additive métallique

La Figure 2-8 affiche une description de certaines de ces technologies en incluant des applications représentatives [10].

| | DEPOSITION | | | POWDER BED | |
|-----------------|--|--|---|--|--|
| | LARGE SCALE DEPOSITION | FINE SCALE DEPOSITION | | POWDER BED | |
| DESIGNATED ICON | | | | | |
| PICTURE | | | | | |
| DESCRIPTION | Deposition of wire fused using laser beam or plasma in a chamber to produce part | Deposition of wire fused using laser beam in a chamber to produce part | Deposition of powder fused using laser and local shielding to produce part | Laser beam selectively fuses powder on a bed in a chamber to produce part | Electron beam selectively fuses powder on a bed in a chamber to produce part |
| APPLICATIONS | <ul style="list-style-type: none"> • High material throughput deposition systems • Focus on Ti Large-scale pre-forms • Initial cost-driven introduction • Applications including large aero structure components | <ul style="list-style-type: none"> • Lower material throughput deposition systems • Focus on Ti and Ni alloys • Add-ons and features • High value component repair and modification • Broad range of medium-size components; fabrications | <ul style="list-style-type: none"> • Lowest material thru-put • Ti, Ni and steel alloys • Nearest-net • Intricate complex hi-value components | <ul style="list-style-type: none"> • Low material thru-put • Ti6-4 • Highly net-shape • Small – medium prismatic | |

Figure 2-8. Description de technologies de FA métallique [10].

Chaîne des approvisionnements de la fabrication additive

La FA peut être considérée comme une composante d'un procédé intégré. La Figure 2-9 contient une représentation schématique de l'ensemble du procédé de fabrication. La fabrication d'une pièce métallique avec des technologies de fabrication additive commence avec la modélisation 3D : la modélisation CAO 3D, la numérisation 3D (rétro ingénierie) et la création de données STL (triangulation). La préparation des données doit être ensuite organisée et contient les paramètres d'orientation de la pièce, de positionnement des structures de support et le découpage en tranches du modèle. Une fois les données de contrôle générées, les pièces peuvent être produites. Après la fabrication des pièces, certaines opérations post traitement sont nécessaires : retrait de la poudre et des structures de support, traitements thermiques, opérations post-usinage et finition des surfaces, tests non destructifs, etc.[11].

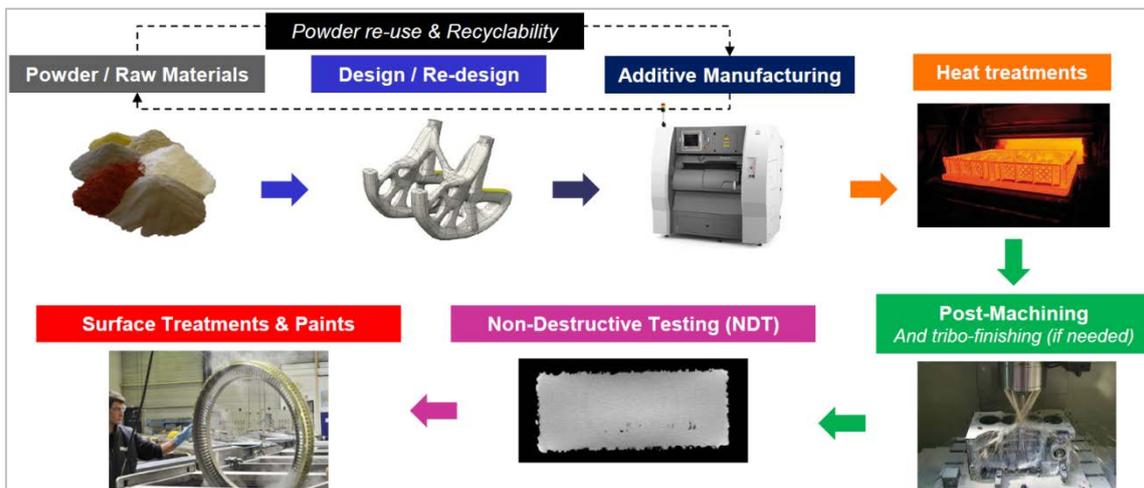
Différentes étapes peuvent être prises en compte dans la chaîne de valeur de la Fabrication additive :

- Matière première. L'étape de production des poudres métalliques doit être prise en compte, car un haut niveau de pureté et une distribution très étroite de taille granulaire sont requis pour les procédés de Fabrication additive. La qualité de la poudre est essentielle pour les propriétés finales de la pièce et donc, des spécifications de poudre strictes sont obligatoires pour assurer une bonne reproductibilité. Ces conditions prérequis sont difficiles à respecter, en particulier pour les commandes réduites (elles ne sont pas très intéressantes pour les fournisseurs

importants). Actuellement, les matières premières sont vendues par des fournisseurs de systèmes FA.

- Système. Il faut noter que les fournisseurs du système offrent de faibles niveaux d'intégration verticale. Les composants standards sont souvent réalisés par des fabricants contractuels.
- Logiciel. Il est très important de faire la différence entre le contrôle du procédé et le logiciel d'amélioration. Le contrôle du procédé est généralement assuré par les fournisseurs du système. Les logiciels complémentaires tels que la génération automatique de support ou l'optimisation de la conception sont généralement fournis par des sociétés spécialisées.
- Conception d'application. Concernant la conception d'une application destinée à assister les utilisateurs finaux, il faut noter qu'elle peut s'avérer complexe et exigeante. Il s'agit d'une problématique complexe qui se pose généralement aux fournisseurs du système, aux développeurs de logiciels et/ou aux prestataires de services. Tous les prestataires de services ne sont toutefois pas en mesure de concevoir des applications.
- Production. Différents scénarios de production se distinguent sur le marché : des équipementiers importants, les fabricants contractuels/prestataires de service ou les fabricants de pièces spécialisés.

En règle générale, il faut souligner que le marché de la FA est fragmenté en un nombre élevé de petits intervenants issus de tous les domaines. La taille modeste des intervenants limite les investissements dans la recherche et le développement (aucun intervenant ne peut être actif dans tous les domaines). En conséquence, ce sont les fournisseurs de système de FA qui ont les activités les plus étendues.



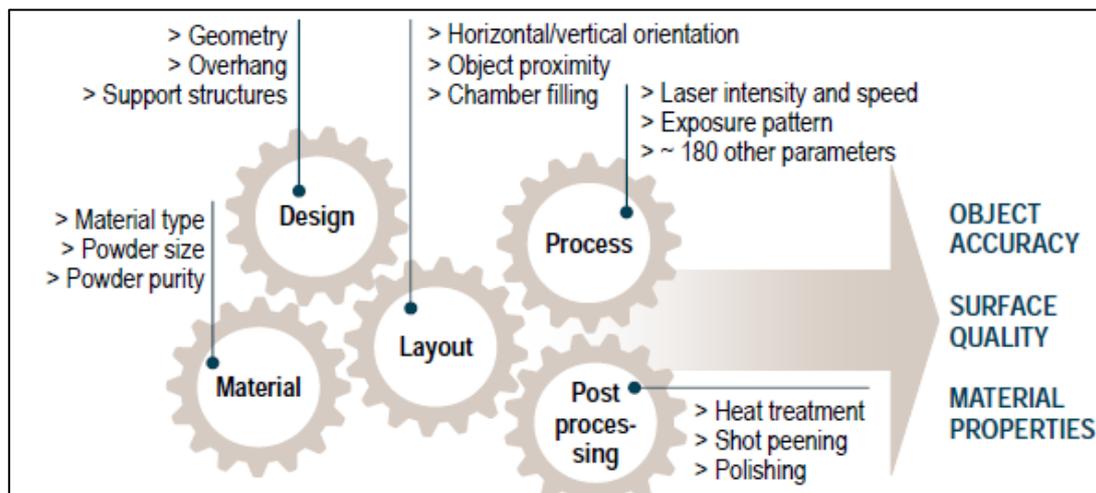


Figure 2-9. Procédé complet de fabrication additif d'une pièce métallique incluant différentes étapes [8] [11].

2.2 Technologies de fusion sur lit de poudre

La technologie de fusion sur lit de poudre (Powder Bed Fusion - PBF) est le terme ASTM agréé pour désigner un procédé de fabrication additif dans lequel une source de chaleur fait fondre et fusionner une certaine zone d'un lit de poudre.

La fusion sur lit de poudre est la technique utilisée le plus fréquemment pour l'impression d'objets métalliques. Les systèmes PBF utilisent soit un faisceau laser (très fréquemment), soit un faisceau d'électrons (rarement) pour faire fondre certaines zones d'un lit de poudre. Le PBF par faisceau d'électrons permet des vitesses de construction supérieures, mais la qualité des surfaces et le choix des matières sont plus limités.

Fusion sélective par laser (SLM)

La fusion sélective par laser (SLM) est une technologie de fabrication additive à partir d'un lit de poudre dans lequel un produit est fabriqué couche par couche, grâce au mélange d'une fine couche de particules métalliques avec un laser haute puissance comme source d'énergie thermique. Elle permet la production de pièces en 3D complexes à partir des informations fournies par un fichier de CAO, avec une haute précision ($\pm 0,1$ mm à 25 mm) et une finition de surface de haute qualité (5 à 15 μm). Cette fabrication par couche optimise la conception de structure de la pièce SLM [12], [13].

Côté fabrication SLM, une couche de poudre est d'abord répartie sur un support (un plateau) avec un dispositif de revêtement (lame ou rouleau) et un faisceau laser fait fondre de manière sélective la couche de poudre. Le plateau est ensuite abaissé de 20 à 100 μm (en fonction des exigences de fabrication de la pièce et de l'aspect de la finition souhaité) et une nouvelle couche de poudre est déposée. L'opération de fusion laser est alors répétée. Après quelques milliers de cycles, en fonction de la hauteur de la pièce, la pièce fabriquée est retirée du lit de poudre. Une représentation schématique du procédé est incluse à la Figure 2-10. Schéma représentant le procédé de fusion laser sélective (SLM) [14].

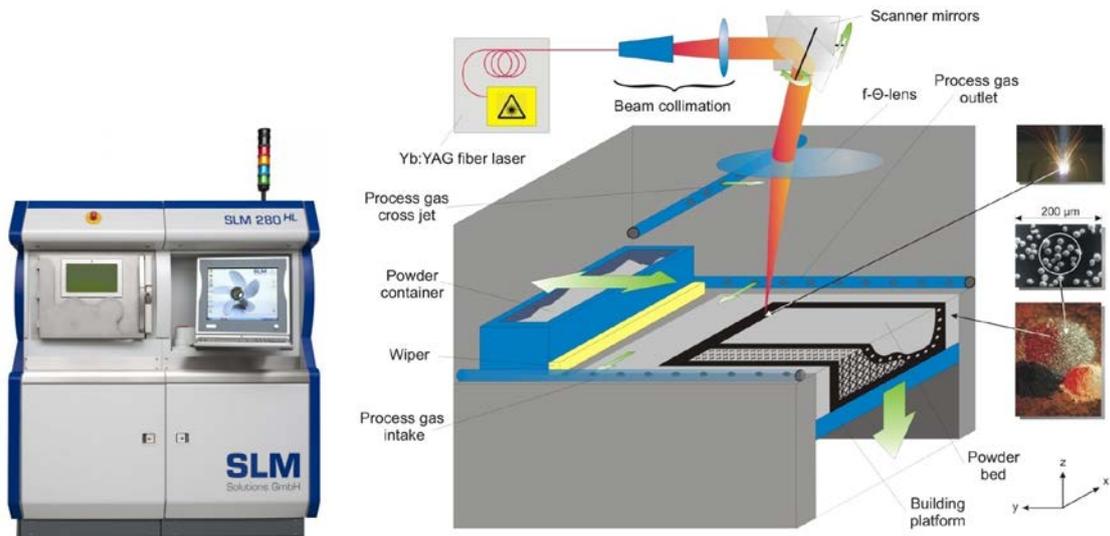


Figure 2-10. Schéma représentant le procédé de fusion laser sélective (SLM) [14].

La fusion laser sélective propose plusieurs stratégies de numérisation différentes. Les schémas de numérisation laser ont une incidence sur le niveau de porosité, la microstructure de la pièce et la rugosité de la surface. Le motif à bandes est une bande définie par la largeur du vecteur de numérisation, par exemple, la largeur de la bande, l'espace restant entre des bandes adjacentes et le sens de numérisation, ainsi que les éventuels chevauchements entre les bandes voisines. Sur chaque couche, plusieurs configurations de numérisation laser (ou motifs de hachures) sont possibles. Les paramètres de numérisation sont schématiquement représentés à la Figure 2-11.

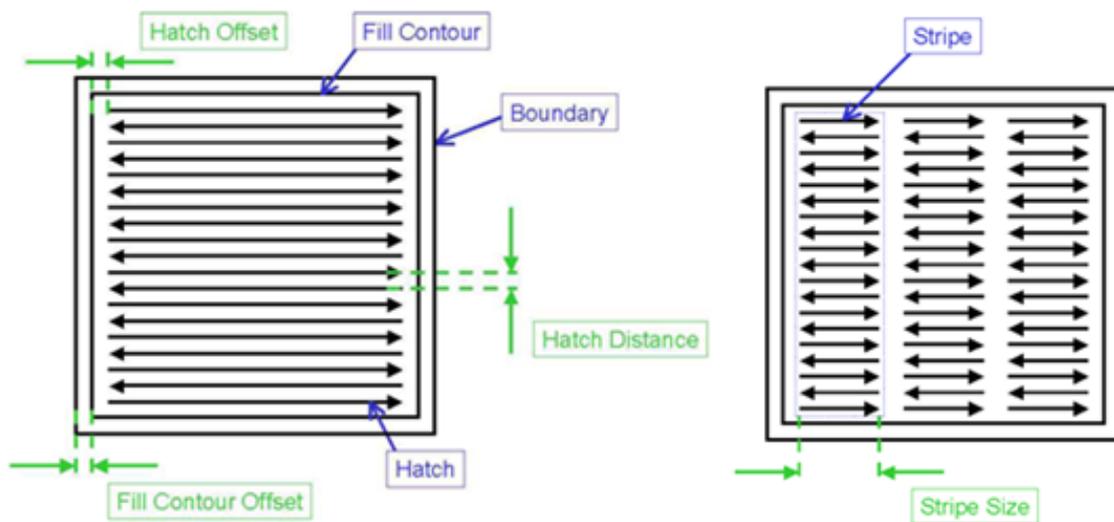


Figure 2-11. Paramètres de numérisation représentés de manière schématique

La Figure 2-12. Pièce industrielle fabriquée par le biais de la technologie SLM par le centre de recherche IK4-LORTEK.12 contient un exemple de pièce industrielle fabriquée grâce à la technologie PBF- SLM dans le centre de recherche IK4-LORTEK.



Figure 2-12. Pièce industrielle fabriquée par le biais de la technologie SLM par le centre de recherche IK4-LORTEK.

Concernant les avantages et les contraintes, les caractéristiques les plus importantes du procédé SLM sont figurées dans le Tableau 2-3. Avantages et inconvénients de la technologie SLM..

Tableau 2-3. Avantages et inconvénients de la technologie SLM.

| Avantages de la technologie SLM | Inconvénients de la technologie SLM |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Pièces fonctionnelles et outils avec des formes complexes uniques à partir de poudres métalliques ou céramiques. ➤ Propriétés de la surface fonctionnelle. ➤ Structuration de surface, notamment micro et nanostructuration. ➤ Structures légères et à composition graduelle (potentielle). ➤ Pièces multimatières (en développement) ➤ Matière première en poudre hautement recyclable. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Forte rugosité de la surface. ➤ Propriétés anisotropiques. ➤ Apport thermique très localisé : haute contrainte résiduelle. ➤ Précision de fabrication au détriment de la durée. ➤ Absence de contrôle de qualité en ligne. ➤ Difficultés d'évacuation de la poudre des canaux de petite taille. ➤ Coût élevé des machines SLM. |

Concernant la disponibilité des matières, actuellement, sont traitées par fabrication SLM. Vous trouverez un récapitulatif dans les Tableau 2-4. Description des matières traitées par SLM.

Tableau 2-4. Description des matières traitées par SLM.

| Matière | Propriétés | Secteurs industriels | Alliages |
|---|---|---|--|
| Acier inoxydable | Résistance à la corrosion Bonnes propriétés mécaniques | Automobile Construction Secteur de la chimie Médicaments Biens de consommation | 1.4404. 1.4410. |
| Acier pour outil | Dureté élevée Haute résistance à l'usure Dureté à chaud Bonne usinabilité | Production de moules à injection Implants biomédicaux Pour la découpe, l'emboutissage, l'extrusion et la frappe de métaux ou d'autres matières. | 1.2344. 1.4542. 1.7228. 1.4541. 1.4313. |
| Alliages Co-Cr (cobalt-chrome) | Dureté élevée Haute résistance à l'usure Bonne résistance à la corrosion Propriétés mécaniques adéquates Biocompatibles | Implants biomédicaux Dentisterie Applications à haute température | CoCr (ASTM F75:Co212f) |
| Super alliages à base de Ni (nickel) (Inconel) | Haute résistance à la corrosion Haute résistance mécanique à haute température Bonne aptitude au soudage | Secteur aérospatial (moteurs de turbine) Production d'électricité Traitements pétrochimique et chimique | Inconel 625 Inconel 718 Inconel HX |
| Alliages Ti (titane) | Résistance à la corrosion Bonnes propriétés mécaniques Biocompatibles Usinabilité adéquate | Biomédecine Secteur aérospatial Off shore Design et bijouterie | Ti6Al4V TiAl6Nb7 Ti (Grade 1) |
| Alliages Al (aluminium) | Propriétés mécaniques attrayantes Alliages légers | Automobile Secteur aérospatial Biens de consommation | AlSi12 AlSi10Mg AlSi7Mg AlSi9Cu3 AlMg4 5Mn0.4 |

Concernant les constructeurs de machines de fusion sélective par laser (SLM), il existe une large offre de fabricants de fusion laser sur lit de poudre avec des métaux : Systèmes 3D (USA), Concept Laser (Ge), EOS (Ge), Matsuura (Jp), Realizer (Ge), Renishaw (UK) ou SLM Solutions (Ge).

Fusion par faisceau d'électrons (EBM)

Le procédé de fusion par faisceau d'électrons (EBM), représenté de façon schématique à la Figure 2-13. Vue schématique de l'équipement de fusion de faisceau d'électrons [15]. est similaire au procédé de Fusion laser sélective (SLM). Dans ce cas, la source d'énergie est un faisceau d'électrons, et non un faisceau laser.

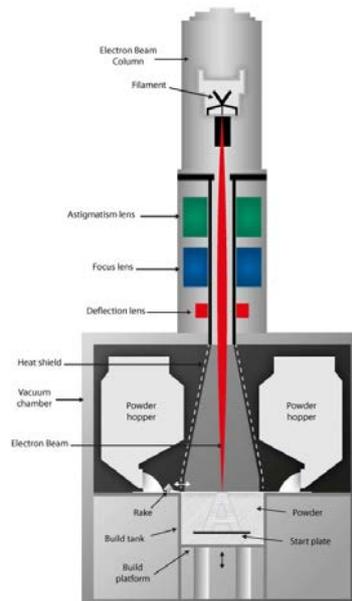


Figure 2-13. Vue schématique de l'équipement de fusion de faisceau d'électrons [15].

Pendant le procédé de Fusion par faisceau d'électrons (EBM), les électrons sont émis par un filament de tungstène situé à l'intérieur de la colonne et sont concentrés de façon précise et réfléchis par des bobines électromagnétiques. Lorsque les électrons à pleine vitesse frappent la poudre métallique, l'énergie cinétique est instantanément convertie en énergie thermique, ce qui porte la température des particules de poudre au-dessus de point de fusion. Les pièces EBM sont construites dans une atmosphère vide, pour éviter la déperdition d'énergie causée par la collision entre des électrons se déplaçant rapidement et des molécules d'air ou de gaz. Le vide présente deux avantages : ce procédé présente une efficacité énergétique de 95 %, soit cinq à dix fois supérieure à celle de la technologie laser, et le vide supporte le traitement des alliages de métal réactif tels que le titane ou l'aluminium, en d'autres termes, il conserve la composition chimique de la matière et fournit un excellent environnement pour la construction de pièces. Une des caractéristiques intéressantes de cette méthode de fabrication réside dans les conditions du procédé. Par exemple, lors de la fabrication de pièces en titane qui subissent généralement des contraintes individuelles élevées, le lit de poudre est préchauffé jusqu'à 600 700 °C, ce qui permet d'obtenir un gradient thermique moins élevé pendant la solidification, et éviter des contraintes très élevées [13], [16], [17].

Lorsqu'on compare la fusion du faisceau d'électrons (EBM) à d'autres procédés sur lit de poudre tel que la SLM (voir Tableau 2-5), EBM affiche des vitesses de construction supérieures (jusqu'à 60 cm³/h), conséquence de l'efficacité du faisceau d'électrons à haute puissance. Un nombre inférieur de structures de support est requis au moment de

construire la pièce. Autre limite des systèmes à lit de poudre : la taille des composants fabriqués est limitée par les dimensions du lit, ce qui restreint son application à des composants relativement petits, dont les dimensions ne dépassent généralement pas 400x400x400 mm de longueur, d'épaisseur et de hauteur. D'autre part, les pièces EBM se caractérisent par une finition de surface très médiocre (ce qui est dû principalement à l'épaisseur de la couche supérieure employée pendant le procédé de fabrication) avec les déviations géométriques supérieures, un nombre limité de matières disponibles comparé aux processus PBF faisant appel au laser (Seuls le Titane Ti6Al4V, le Titane Ti6Al4V ELI, le Titane de Grade 2 et le Cobalt-Chrome ASTM F75 sont accessibles pour le procédé EBM).

Tableau 2-5. Comparaison entre les procédés EBM et SLM.

| Characteristic | Electron beam melting | Selective laser melting |
|--------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Thermal source | Electron beam | Laser |
| Atmosphere | Vacuum | Inert gas |
| Scanning | Deflection coils | Galvanometers |
| Energy absorption | Conductivity-limited | Absorptivity-limited |
| Powder pre-heating | Use electron beam | Use infrared heaters |
| Scan speeds | Very fast, magnetically-driven | Limited by galvanometer inertia |
| Energy costs | Moderate | High |
| Surface finish | Moderate to poor | Excellent to moderate |
| Feature resolution | Moderate | Excellent |
| Materials | Metals (conductors) | Polymers, metals and ceramics |

Il convient également de mentionner qu'EBM est particulièrement efficace dans le secteur médical, pour la création d'implants.

La Tableau 2-6 contient une description des propriétés des différentes matières métalliques disponibles pour un traitement SLM ou EBM. Un large éventail de matières premières est potentiellement intéressant pour l'industrie aérospatiale.

Tableau 2-6. Description des propriétés mécaniques et physiques des matières métalliques disponibles pour les différents procédés de FA : faisceaux laser PBF et faisceaux à électrons PB et différentes sociétés.

| Nom commercial | Technologie FA | Société | Densité [g/cm ³] | Résistance à la traction [MPa] | | Dilatation thermique [K ⁻¹] | Thermal Exp. [K ⁻¹] x 10 ⁻⁶ | | Conduct. Thermique [W/m·K] |
|----------------|----------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|------|---|--|-----|----------------------------|
| | | | | Min | Max | | Min | Max | |
| Titane pur | SLM | Solutions SLM | 4.5. | 290 | s/o | 200 H V | s/o | s/o | 22.6. |
| | | RENISHAW | 4.5. | 290. | - | s/o | s/o | s/o | 22.6. |
| Titane Ti6Al4V | SLM | Solutions SLM | 4.43. | 972 | n/a | 366 H V | s/o | s/o | 7,1 |
| | | EOS | 4,41 | 1180 | 1280 | 320 H V | s/o | s/o | s/o |
| | | RENISHAW | 4,43 | 1061 | 1121 | 366 H V | s/o | s/o | 7,1 |
| | | ARCAM | 4,43 | 1020 | 1020 | 327 H V | s/o | s/o | s/o |
| Titane | SLM | Solutions SLM | 4,52 | 1020 | s/o | 386 H | s/o | s/o | 7 |

| Nom commercial | Technologie FA | Société | Densité [g/cm ³] | Résistance à la traction [MPa] | | Dilatation thermique [K ⁻¹] | Thermal Exp. [K ⁻¹] x 10 ⁻⁶ | | Conduct. Thermique [W/m·K] |
|--|----------------|---------------|------------------------------|--------------------------------|------|---|--|------|----------------------------|
| | | | | Min | Max | | Min | Max | |
| Ti6Al7Nb | | | | | | V | | | |
| | | RENISHAW | 4,52 | 1155 | 1215 | 386 H V | s/o | s/o | 7 |
| Titane Ti6Al4V ELI (Intersticiel ultraléger) | EBM | ARCAM | 4,43 | 970 | 970 | 318 H V | s/o | s/o | s/o |
| Titane de grade 2 | EBM | ARCAM | 4,5 | 570 | 570 | s/o | s/o | s/o | s/o |
| Acier 1.4404(316L) | SLM | Solutions SLM | 8 | 595 | 655 | 237 H V | s/o | s/o | 15 |
| | | RENISHAW | 8 | 595 | 655 | 237 H V | s/o | s/o | 15 |
| Acier 1.2344 (H13) | SLM | Solutions SLM | 7,8 | 1700 | 1760 | 578 H V | s/o | s/o | 25,6 |
| | | RENISHAW | 7,8 | 1700 | 1760 | 578 H V | s/o | s/o | 25,6 |
| Acier 1.2709 | SLM | Solutions SLM | 8 | 1080 | 1140 | 528 H V | s/o | s/o | 15 |
| Acier 1.4410 | SLM | RENISHAW | 8 | 730 | 770 | 237 H V | s/o | s/o | 15 |
| Acier inoxydable GP1 | SLM | EOS | 7,8 | 800 | 900 | 230 H V | 14 | 14 | 13 |
| Aluminium AlSi12 | SLM | Solutions SLM | 2,7 | 389 | 429 | s/o | s/o | s/o | s/o |
| | | RENISHAW | 2,7 | 310 | 350 | 110 H V | s/o | s/o | s/o |
| Aluminium AlSi10Mg | SLM | EOS | 2,67 | 410 | 465 | 126 H V | s/o | s/o | 103 |
| Cobalt-Chrome CoCr ASTM F75 | SLM | Solutions SLM | 8.25 | 1030 | 1070 | 346 H V | s/o | s/o | 12.5 |
| | | RENISHAW | 8,25 | 1030 | 1070 | 346 H V | s/o | s/o | 12,5 |
| | EBM | ARCAM | 8,25 | 960 | 960 | 471 H V | s/o | s/o | s/o |
| Cobalt-Chrome MP1 | SLM | EOS | 8,3 | 1250 | 1450 | 392 H V | 13,6 | 15,1 | 13 |
| Inconel HX(2.4665) | SLM | Solutions SLM | 8,22 | 910 | 910 | 95 HV | s/o | s/o | 11,6 |
| | | Solutions SLM | 8,44 | 680 | 680 | s/o | s/o | s/o | 11,4 |
| Inconel 625 | SLM | RENISHAW | 8,44 | 680 | 680 | s/o | s/o | s/o | 11,4 |
| | | EOS | 8,4 | 940 | 1040 | 302 H V | s/o | s/o | s/o |
| | | Solutions SLM | 8,19 | 1200 | 1200 | s/o | s/o | s/o | 11,5 |
| Inconel 718 | SLM | RENISHAW | 8,19 | 1200 | 1200 | s/o | s/o | s/o | 11,5 |
| | | EOS | 8,15 | 1010 | 1110 | 310 H V | 12,5 | 17,2 | n/a |

2.3 Dépôt de matière sous flux dirigé pour la fabrication additive métallique

Le Dépôt de matière sous flux dirigé (DED) pour la Fabrication Additive Métallique est moins répandu que les autres techniques de FA, principalement en raison de sa précision inférieure et le traitement ultérieur qu'il nécessite.

Une machine DED classique se compose d'une buse montée sur un bras à axes multiples qui dépose du matériau fondu sur des surfaces indiquées où elles se solidifient par la suite. Le procédé DED utilise donc de l'énergie concentrée pour faire fusionner la matière au fur et à mesure que le matériau est déposé. Le principe est le même que celui de l'extrusion de matériau, mais la buse peut se déplacer dans plusieurs directions et n'est pas fixée sur un axe spécifique. Les procédés DED utilisent le matériau sous forme de fil ou de poudre. Le fil étant préformé, son application est moins précise, mais il est plus efficace que la poudre, car seule la matière nécessaire est utilisée. La fusion du matériau s'effectue par laser, par faisceau d'électrons ou par arc électrique (procédés de soudure à l'arc plasma, au tungstène-gaz inerte ou au métal à gaz inerte).

La plupart des systèmes motorisés utilisent un système motorisé à 4 ou 5 axes ou un bras robotisé à positionner sur la tête de dépôt, de sorte que le procédé n'est pas limité à des couches horizontales successives. Normalement, c'est le bras qui se déplace et l'objet reste statique. Cependant les opérations peuvent être inversées et dans ce cas, c'est la plateforme qui se déplace tandis que le bras reste dans une position fixe. Le choix dépend de l'application exacte et de l'objet en cours d'impression. Cependant, ce procédé laisse moins de latitude en matière de conception que les procédés PBF. Les traitements thermiques post dépôt et un usinage final sont normalement requis si l'on veut obtenir des propriétés mécaniques et des tolérances géométriques correctes.

Les applications classiques incluent la réparation et l'entretien des pièces de structure. Les procédés DED sont utilisés en premier lieu pour ajouter des fonctionnalités à une structure existante ou pour réparer des dommages ou des pièces usées.

Fabrication directe (EBAM™ ou Electron Beam Freeform Fabrication (EBF³)).

SCIAKY, société située à Chicago, Illinois, est un important fournisseur de systèmes de fabrication basés sur la technologie de soudage par faisceau à électrons [18]. Le procédé Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM™) de SCIAKY et une technologie d'impression 3D exploitant les avantages principaux déjà mentionnés dans les procédés de FA (les pièces sont fabriquées plus rapidement, le gaspillage de matériau est moindre, la durée d'usinage est réduite et le délai de mise sur le marché inférieur). En outre, le procédé EBAM™ excelle dans la production de structures métalliques de grande taille fabriquées avec des éléments métalliques à forte valeur ajoutée. Des alliages de titane, de tantale et de nickel sont utilisés pour produire des pièces en quelques jours, avec une perte de matière minimale. Le procédé EBAM™ peut également être utilisé lors de

n'importe quelle phase du cycle de vie du produit, pour le prototypage rapide et les pièces de production ou les applications de réparation et de remise à neuf.

En partant d'un modèle 3D issu d'un programme de CAO, un canon à électrons dépose du métal (sous forme de fil), couche après couche, jusqu'à ce que la pièce atteigne une forme quasi définitive et soit prête pour une éventuelle finition (traitement thermique et usinage). Les vitesses brutes de dépôt sont comprises entre 3 et 9 kg de métal par heure, et dépendent du matériau et des caractéristiques de la pièce sélectionnés. La Figure 2-14. Vue schématique du procédé EBAM™ [18]. représente un schéma du procédé EBAM™.

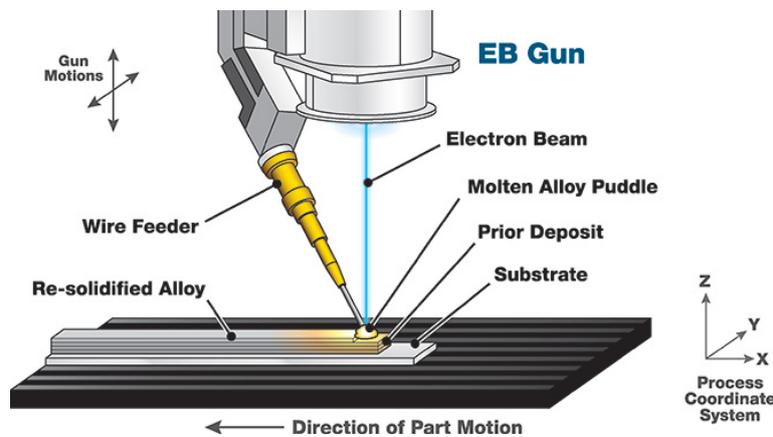


Figure 2-14. Vue schématique du procédé EBAM™ [18].

Dépôt de métal par laser (LMD)

Pendant le traitement de dépôt de métal par laser (LMD) une buse montée sur un bras à axes multiples dépose du matériau fondu sur des surfaces spécifiées, où il se solidifie. Les systèmes utilisant des poudres soufflent ces dernières via une buse, et elles sont fusionnées par un faisceau laser sur la surface de la pièce. Ce procédé est basé sur le dépôt automatique d'une couche de matériau avec une épaisseur qui varie entre 0,1 mm et quelques millimètres. La liaison métallurgique entre le matériau de revêtement et le matériau de base et l'absence de découpe caractérisent ce procédé. La Figure 2-15. Schéma du procédé de dépôt métallique par laser. représente un schéma de ce procédé.

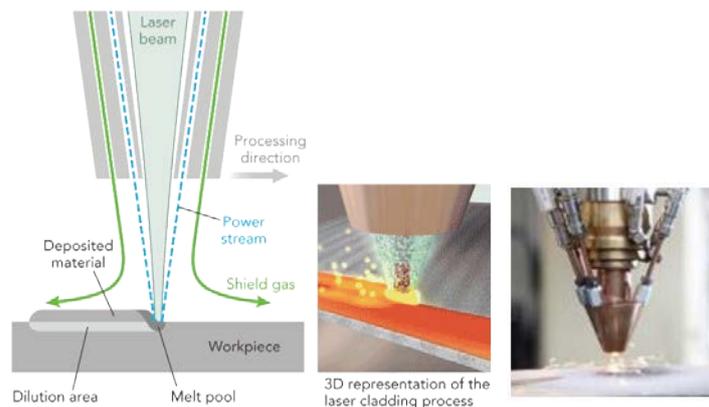


Figure 2-15. Schéma du procédé de dépôt métallique par laser.

D'autre part, les systèmes laser avec dépôt de fil, notamment le Laser Metal Deposition-wire (LMD-w) dépose un fil métallique via une buse. Cette matière est ensuite fusionnée par un laser, qui incorpore un gaz inerte de protection soit dans un environnement ouvert (gaz autour du laser), soit dans une enceinte ou une chambre scellée. Ce procédé offre une vitesse de dépôt supérieure à celle des procédés de dépôt et fusion de poudre (DED) et de lit de poudre (SLM).

En général, la technologie LMD permet d'obtenir une productivité plus élevée que la technologie SLM et permet également de réaliser des pièces plus grandes, mais la liberté de conception est bien plus limitée, par exemple, les structures réticulaires et les canaux internes sont impossibles à fabriquer. Vous trouverez dans le Tableau 2-7 un récapitulatif des avantages et des contraintes des procédés LMD.

Tableau 2-7. Avantages et inconvénients de la technologie de dépôt de métal par laser.

| Avantages de la technologie LMD | Inconvénients de la technologie LMD |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Bonne adhésion entre le substrat et le matériau déposé : liaison métallurgique. ➤ Grande variété d'alliages. ➤ Faible niveau de dilution. ➤ Vitesse de dépôt relativement élevée. ➤ Haute reproductibilité du traitement. ➤ Impact limité sur les propriétés du substrat. ➤ Haute flexibilité côté pièce (hauteur quasiment <i>illimitée</i>). ➤ Peut être utilisé comme support pour le laser pour améliorer les propriétés de la surface. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Coût de l'équipement élevé. ➤ Coût de la matière première en poudre élevé. ➤ Liberté de conception limitée par rapport aux procédés de fusion sur lit de poudre. ➤ Étapes post traitement nécessaire à l'obtention d'une bonne planéité de surface. |

Fabrication additive arc-fil (Wire and Arc Additive Manufacturing - WAAM)

Les technologies de fabrication additive arc-fil (WAAM) combinent un arc électrique, qui sert de source thermique et des matières premières déposées sous forme de filament et font l'objet de recherches pour les besoins de la FA depuis les années 90, bien que les premiers brevets aient été déposés en 1925. La WAAM utilise un équipement de soudage : une source d'alimentation de soudage, un chalumeau et un système de dévidage du fil. Les mouvements peuvent être exécutés soit par des systèmes robotiques, soit par des portiques contrôlés par commande numérique. À chaque fois que c'est possible, on utilise le procédé de soudage sous protection de gaz inerte (MIG) : le fil électrode est dévidé et sa coaxialité avec le chalumeau facilite la trajectoire d'outil. Par ailleurs, le transfert de métal à froid (CMT), variante modifiée du GMAW (soudage à l'arc avec protection gazeuse) basée sur le mécanisme du mode de transfert par court-circuit, est largement employé dans les

procédés de FA en raison de la vitesse de dépôt élevée, avec une faible admission de chaleur. Dans d'autres cas, on utilise les procédés le gaz inerte de tungstène (TIG) ou de soudage par arc au plasma. Des schémas expliquant les procédés GMAW, GTAW et PAW sont affichés à la Figure 2-16 [57].

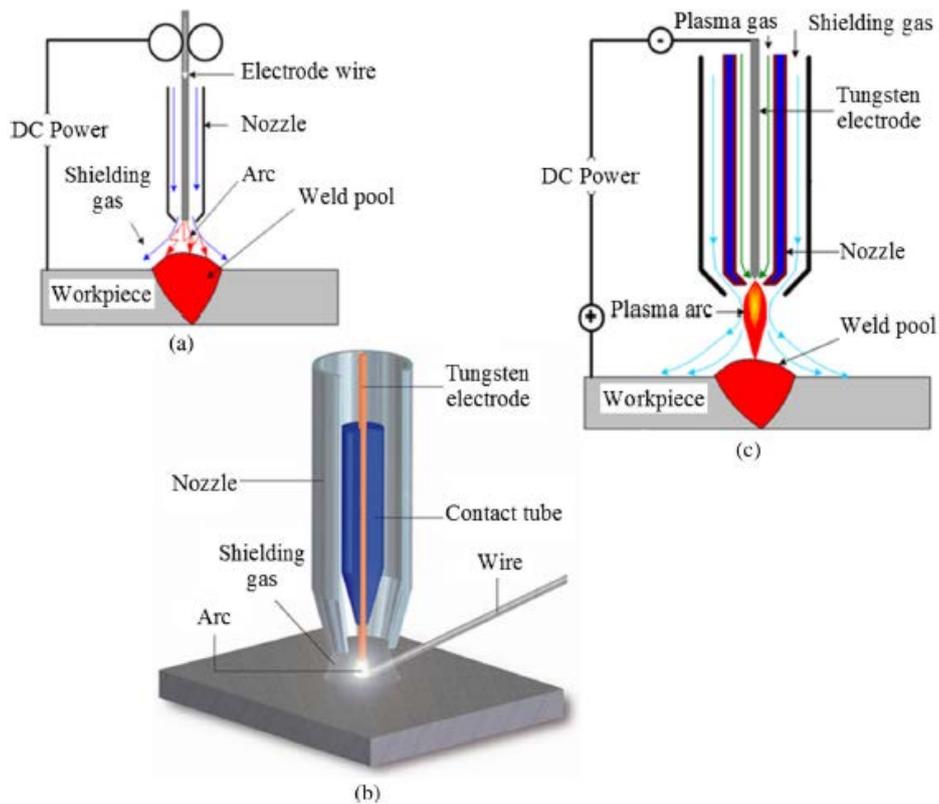


Figure 2-16. Diagramme schématique de procédés a) GMAW, b) GTAW et c) PAW [57].

Des vitesses de dépôt élevées, des coûts de matière première et d'équipement peu élevés et une intégrité de structure correcte font de la Fabrication additive arc-fil une alternative convenable au remplacement de la méthode actuelle de fabrication avec des billettes solides ou des pièces forgées de grande taille, en particulier pour ce qui concerne les pièces de complexité moyenne ou faible. Un large éventail de matériaux est disponible pour cette méthode de FA, et notamment des alliages d'acier, de nickel et de titane. La technologie WAAM est particulièrement prometteuse dans la fabrication de pièces de grande taille (voir Figure 2-17), et présente un faible coût en capital comparé aux autres procédés FA [58].

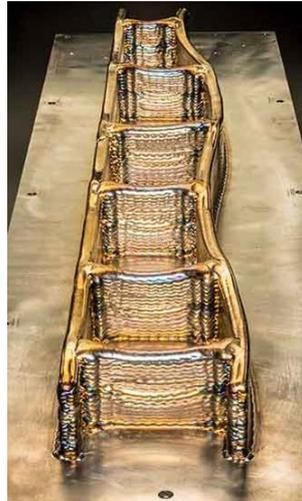


Figure 2-17. Pièce en titane (systèmes spar BAE) fabriqué par WAAM [58], [59].

Les principaux avantages et inconvénients de la technologie sont répertoriés dans la Tableau 2-8.

Tableau 2-8. Avantages et inconvénients des procédés WAAM.

| Avantages de la technologie WAAM | Inconvénients de la technologie WAAM |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Coût en capital plus faible que celui des autres technologies de FA. ➤ Coût et utilisation du matériel. Le fil de soudage est une forme de matière première moins chère que la poudre. ➤ Architecture ouverte. L'utilisateur final peut associer n'importe quelle marque de source d'alimentation électrique et le manipulateur. Contrôle total sur le matériel. Le logiciel peut être adapté à l'équipement disponible spécifique. ➤ Taille de la pièce. La taille de pièce maximale est déterminée uniquement par la capacité d'intervention du manipulateur ou la taille de l'enveloppe interne de la chambre en cas de matériaux réactifs. ➤ Vitesse de dépôt élevée allant de 1 kg/h à 4 kg/h pour l'aluminium et l'acier. Des valeurs de 10 kg/h peuvent être atteintes. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Les contraintes résiduelles et les distorsions sont un problème majeur en cas de WAAM à grande échelle. La tolérance des pièces peut être affectée. La défaillance prématurée est également un problème. ➤ Précision. La méthode de tranchage a une incidence sur la précision. Des effets de <i>non-correspondance</i> et d'<i>escalier</i> ont été signalés. La précision est 10 fois inférieure à la technologie avec cordon de poudre. ➤ Finition de surface. La rugosité de la surface est associée à la géométrie du cordon de soudure. |

Néanmoins, les inconvénients sont associés à la production de composants à géométrie complexe plus petits, car les pics de haute température provoquent des distorsions importantes et également des contraintes résiduelles. Les distorsions entraînent de faibles tolérances, et les contraintes résiduelles affectent le comportement mécanique du

composant. En outre, des opérations de post-traitement sont nécessaires, en raison de la finition de surface imparfaite qu'on obtient en cas d'utilisation du procédé WAAM.

2.4 Comparaison entre les technologies de fusion sur lit de poudre et de dépôt de matière sous flux dirigé

La fusion sur lit de poudre est la technologie dominante pour la FA métallique, en raison de sa précision, de la qualité de surface obtenue et de la liberté de conception qu'elle procure. Dans la technologie PBF, l'épaisseur de couche classique est comprise entre 20 et 100 μm , et la précision dimensionnelle des composants complets peut atteindre $\pm 0,05$ mm, et la rugosité de surface, 9 à 16 μm . En outre, il est possible de produire des pièces avec des matériaux à gradient fonctionnel (FGM). Cependant, la vitesse de dépôt de la technologie PBF est extrêmement faible, en général autour de 10g/min, ce qui limite ses applications à la fabrication de composants de taille moyenne à grande.

Dans la FA avec fil, un fil de métal est utilisé comme matière première et remplace la poudre métallique. Trois sources d'énergie différentes sont utilisées pour le dépôt de métaux : la FA avec laser, avec soudure à l'arc et à fil avec faisceau à électrons. La FA avec alimentation en fil présente une efficacité d'utilisation de matériau plus élevée, avec jusqu'à 100 % de matière déposée dans le composant, et est donc plus écologique. En outre, les fils de métaux sont moins coûteux et plus disponibles que les poudres métalliques présentant des caractéristiques adaptées à la fabrication additive. La vitesse de dépôt avec les procédés DED utilisant du fil comme matière première est supérieure à celle des procédés utilisant de la poudre. Il faut toutefois mentionner qu'il existe un compromis entre vitesse de dépôt élevée et haute résolution au moment de sélectionner le type de procédé FA à utiliser pour certains composants.

La Tableau 2-9 contient une comparaison entre procédé de fusion sur lit de poudre et procédé de dépôt et fusion.

Tableau 2-9. Comparaison de procédés FA : fusion sur lit de poudre laser par rapport au dépôt de matière sous flux dirigé [2], [22], [23]

| | PBF - SLM | DED LMD | DED WAAM | DED - EBF3 |
|----------------------------|--|-----------------------------------|--|---|
| MATÉRIAUX | Expérience limitée et moins approfondie par rapport au procédé DED | Diversité de matériaux importante | | Éléments métalliques à forte valeur ajoutée |
| TAILLE DE LA PIÈCE | Limité par la chambre de traitement, (500x280x325 mm). | | Limité par le système de manipulation, (2000x1500x750 mm). | |
| COMPLEXITÉ DE PIÈCE | Quasiment illimité | | Limité | |

| | | | | |
|---|--|--|----------|----------|
| PRÉCISION DES DIMENSIONS | ±0,04 mm | ≥0,1 mm | ±0,2 mm | Faible |
| VITESSE DE CONSTRUCTION | 1-3 mm ³ /s | 3-10 mm ³ /s | 1-4 kg/h | 3-9 kg/h |
| QUALITÉ DE SURFACE (RUGOSITÉ, R_Z) | 5 - 15 µm | 30 - 200 µm | 200 µm | Élevé |
| ZONE DE CONCENTRATION | -Prototypage rapide -Fabrication directe des pièces | -Réparation des composants usés -Modification de l'outillage pour réutilisation -Fabrication directe de pièces | | |

2.5 Maturité des technologies de Fabrication additive

La fabrication additive est désormais considérée comme une méthode de Fabrication révolutionnaire à différents niveaux d'exigences (applications, matériaux) et pour cela, différentes technologies ont été développées. Cette section a pour objectif de vous offrir des informations sur les données concernées en fonction de la maturité de chaque technologie de FA.

Technologies de fusion sur lit de poudre

Les technologies analysées en termes de maturité de fusion de lit de poudre sont : SLM et EBM.

Tableau 2-10. Maturité de SLM

| |
|---|
| Fusion sélective par laser (SLM) |
| Ancienneté de la technologie : |
| 18 ans |
| Du plus ancien au plus récent |
| Fockele & Schwarze |
| Année de mise sur le marché : |
| 1999 |
| Nombre de fournisseurs |
| |

Utilisation la plus répandue

Le secteur médical et de l'outillage sont les secteurs dans lesquels la SLM est la plus répandue. Dans le secteur aérospatial, les injecteurs de carburant, les éléments structurels et les lames sont les applications les plus courantes.

Informations importantes

La fabrication SLM a été utilisée d'abord pour le prototypage de plastique. La maturité de la fabrication SLM dépend des matériaux et de l'application. Dans le cas du SLM pour le secteur aérospatial, le niveau de maturité technologique est compris entre 5 et 7 et peut être observé dans la Figure 1. Cela dépend du matériau et du type d'application.

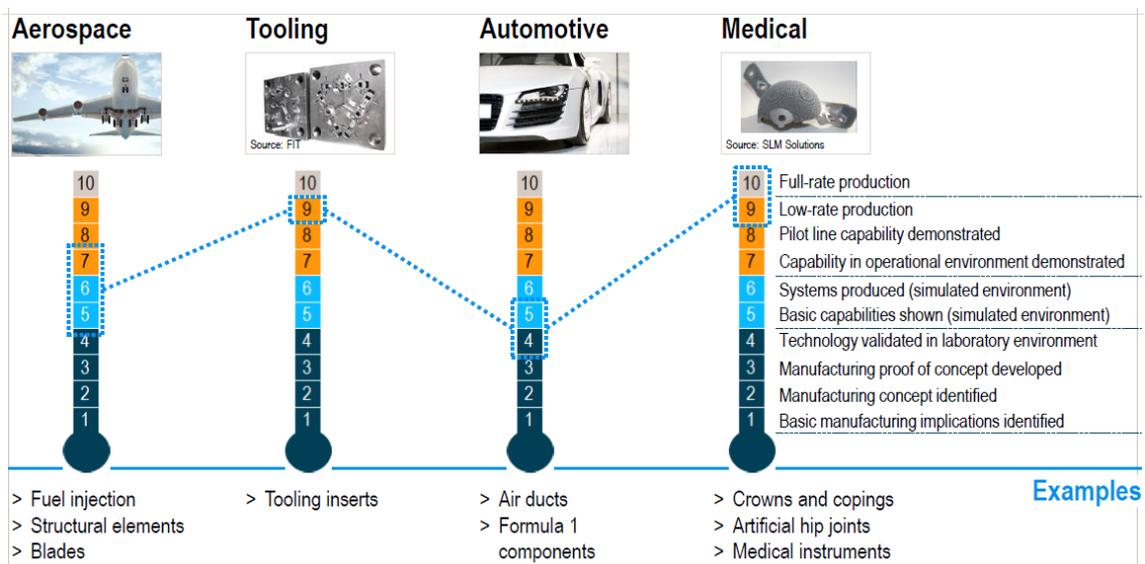


Figure 1. Niveau de maturité du technologique SLM de différents secteurs [88].

Tableau 2-11. Maturité d'EBM

| Fusion par faisceau d'électrons (EBM) | |
|---|--|
| Ancienneté de la technologie : | |
| 19 ans | |
| Du plus ancien au plus récent | |
| « EBM S12 » d'ARCAM et les plus récents sont Arcam Q10 et Q20 | |
| Année de mise sur le marché : | |
| 1998 | |

| |
|--|
| Nombre de fournisseurs |
| 1 |
| Utilisation la plus répandue |
| Pales de turbines pour moteurs d'avion et implants. |
| Informations importantes |
| L'état de l'utilisation de l'espace de FA dans le cas d'un EBM pour le titane est en TRL 9. Dans le cas de la SLM, le niveau de maturité d'EBM dépend du matériau et de l'application. |

Technologies de dépôt de matière sous flux dirigé

Les technologies analysées en termes de maturité de fusion de lit de poudre sont : LMD, EBAM® et WAAM.

Tableau 2-12. Maturité de LMD

| |
|--|
| Dépôt de métal par laser (LMD) |
| Ancienneté de la technologie : |
| 19 ans |
| Du plus ancien au plus récent |
| LENS Optomec |
| Année de mise sur le marché : |
| 1998 |
| Nombre de fournisseurs |
| 8 |
| La technologie la plus populaire |
| Poudre à souffler et fil métallique |
| Utilisation la plus répandue |
| Commence par des applications de gainage et de réparation. |
| Informations importantes |
| |

Tableau 2-13. Maturité du procédé EBAM

| Fabrication additive avec faisceau à électrons (EBAM®) | |
|---|--|
| Ancienneté de la technologie : | |
| 8 ans | |
| Du plus ancien au plus récent | |
| EBAM de Sciaky | |
| Année de mise sur le marché : | |
| 2009 | |
| Nombre de fournisseurs | |
| 1 | |
| Utilisation la plus répandue | |
| Composants de structure en titane pour avions | |
| Informations importantes | |
| Excellent choix pour les alliages réfractaires et les matériaux hétérogènes | |

Tableau 2-14. Maturité du procédé WAAM

| Fabrication additive arc-fil (Wire and Arc Additive Manufacturing - WAAM) | |
|---|--|
| Ancienneté de la technologie : | |
| <p>Cette fabrication utilise différentes techniques de soudage à l'arc : GTAW (soudage à l'électrode de tungstène), GMAW (soudage à l'arc sous protection gazeuse) et PAW (Soudage à l'arc au plasma). Ces technologies ont été largement développées pour les procédés de jonction. L'utilisation de ces technologies de fabrication additive a été brevetée dans les années 1920 par Baker, qui produit des pièces métalliques en 3D en superposant des cordons de soudure utilisant le soudage à l'arc manuel. Des pièces plus précises et automatisées peuvent être développées avec l'insertion d'un bras robotisé. Dans les années 1990, la technologie WAAM a été impulsée par la Welding Engineering Research Centre of Cranfield University.</p> | |
| Du plus ancien au plus récent | |
| Méthodes TIG 1940, méthodes MIG 1950. | |
| Année de mise sur le marché : | |
| | |

Cette technologie de soudage est sur le marché depuis très longtemps. Dans ce domaine, l'innovation est issue du développement de technologies en termes de stabilité d'arc pour des vitesses de dépôt différentes et des matériaux divers. La Recherche et l'innovation se développent à différents endroits (universités, centres technologiques en étroite collaboration avec des constructeurs importants), mais ne sont pas encore mises en œuvre à l'échelle industrielle.

Nombre de fournisseurs

Période de développement de machines industrielles

La technologie la plus populaire

GTAW, GMAW et PAW

Utilisation la plus répandue

L'objectif de ces technologies de fabrication additive consiste à construire des pièces de grande taille de complexité basse à moyenne plus vite, et des ratios buy-to-fly permettant l'utilisation de matériaux onéreux.

Informations importantes

Norsk Titanium a commencé par fabriquer les pièces métalliques par PAW pour Boeing afin d'obtenir des certifications.

2.6 Simulation numérique de fabrication additive

Introduction

La fabrication additive (FA) révolutionne actuellement la façon de fabriquer les éléments grâce aux quatre avantages principaux [70] :

- La fabrication additive offre davantage de liberté pour la conception d'éléments par rapport aux procédés classiques (fonderie, etc.) ;
- la FA est bénéfique pour l'environnement, car seul le matériau nécessaire à la construction de l'article est utilisé (ce qui est partiellement vrai, car une partie de la poudre est toujours perdue) ;
- les machines de FA sont adaptables : elles peuvent produire n'importe quel article (elles ne sont pas cantonnées à la fabrication d'un seul type de fabrication/élément). Seules les dimensions de l'élément peuvent être soumises à restriction.
- L'article peut être personnalisé et parfaitement adapté aux besoins de l'utilisateur.

Malgré tous ses avantages, la fabrication additive est face à certains problèmes et notamment, une approche de capacité inconnue du procédé de FA. Cela génère une différence entre la géométrie attendue (en théorie) et la pièce réelle produite [1]. Pour résoudre le problème, il convient de réaliser certaines opérations de finition supplémentaires ou de modifier en conséquence la conception théorique pour produire la

technologie attendue. De toute façon, cela implique des frais de production supplémentaires.

La différence entre les deux conceptions est principalement due à [71] :

- Manque de connaissance des phénomènes physiques se produisant pendant le procédé de fabrication. Ces phénomènes ne sont pas complètement maîtrisés pendant le procédé et il est très difficile d'anticiper la qualité finale du produit ;
- Les phénomènes physiques induits se posent sur le procédé de fabrication et le plan de procédé utilisé. Tous les paramètres doivent être intégrés dès que possible dans le procédé de conception.

Pour le LMD-P, les principaux paramètres liés au procédé de fabrication sont le matériau, la puissance du laser, le débit de poudre, le jet de gaz et la vitesse d'avance. [72].

L'orientation de l'élément pendant la fabrication et la stratégie de balayage sélectionnée peut avoir un impact sur les caractéristiques finales du produit. Concernant le procédé dit « sur lit de poudre » et l'utilisation des mêmes paramètres de fabrications, Bo [73] compare deux types de stratégies numériques, les numérisations par « balayage » et par « spirale », pour fabriquer une pièce de turbine. La comparaison entre les deux numérisations est incontestable : la pièce ne peut être fabriquée à l'aide d'une numérisation par balayage ! La pièce s'est effondrée pendant la fabrication à cause de contraintes thermiques élevées. La différence d'intensité et de localisation des contraintes thermiques induites par chaque stratégie de balayage dépend également du procédé de fabrication. Foroozmehr [74] est parvenu à la même conclusion concernant l'influence de la stratégie de balayage lors de l'étude du procédé de projection de poudre.

Enfin, la fabrication additive a également un impact sur certains paramètres de l'élément produit : la finition de sa surface (rugosité, courbure non lisse présentant une forme d'« escalier », etc.), la résistance aux contraintes mécaniques thermiques, les contraintes inhérentes (Bikas [75]) à la modélisation de la procédure de fabrication sont nécessaires à ce type de fabrication. Cependant, les résultats numériques sont exploitables uniquement si le modèle numérique est proche du comportement réel.

Dans la fabrication additive, nombreux sont les paramètres qui ont un impact sur le procédé : ils caractérisent le procédé de fabrication (notamment la vitesse du laser, le flux de poudre, la puissance du laser...), l'élément final produit (contraintes résiduelles), la position de la pièce pendant le soudage. Si la simulation numérique semble nécessaire, il est actuellement impossible de modéliser une pièce complète en utilisant la fabrication additive, en tenant compte de tous les paramètres en jeu [70]. Même si cela a fait l'objet de recherches au cours des années passées, il n'existe pas de méthode ou d'outil permettant de simuler la fabrication d'une pièce complexe dans un délai raisonnable. Par « complexe », on entend que la pièce n'est pas un cordon de soudure droit (avec une ou plusieurs couches droites). Cette absence d'outil numérique est due à la jeunesse relative de ces procédés de fabrication, mais également à une connaissance imparfaite des nombreux phénomènes physiques impliqués. En outre, la complexité de ces phénomènes

rend l'établissement et la solution des modèles numériques plus compliqués, ce qui contribue à augmenter le temps nécessaire à la résolution des équations ((Kumar [76])).

Modélisation avec des éléments finis

Au cours de ces dix dernières années, de nombreuses études au sujet de la modélisation directe des phénomènes physiques intervenant dans la fabrication additive ont été publiées. Ces phénomènes sont liés et sont interdépendants. Pour la projection de poudre, la géométrie finale des pièces dépend principalement de deux facteurs :

- l'évolution de la géométrie locale de soudage pendant la fabrication ;
- les déplacements et les contraintes inhérentes induites par la fabrication.

L'évolution de la géométrie locale de soudage dépend directement des dimensions du bain de fusion créé par le laser sur le substrat. Elle est également influencée par le débit de poudre en termes de quantité et de répartition. Concernant les contraintes résiduelles et les déplacements, elles dépendent du gradient de température et des propriétés mécaniques d'isolation des matériaux utilisés.

Donc, Toyserkani [77] a développé un modèle 3D pour étudier l'impact des principaux paramètres du procédé des caractéristiques sur les caractéristiques de la zone de fusion. Cho [78] a complété le modèle en ajoutant l'impact de température latente sur un domaine semi-infini. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux montre une correspondance entre eux dans le cas d'une couche de cordon de soudage.

Au sujet des déplacements et contraintes inhérents aux champs de température, certaines études ont déjà été menées. Ghosh [79] a développé un modèle incluant le changement de phase d'un matériau afin de déterminer les contraintes inhérentes à la fabrication d'un cordon de soudage sur une couche. Foroozmehr [74] a pris en compte l'alimentation continue en matière activant progressivement les éléments de maillage de la pièce. Toutes les contraintes résiduelles appliquent la même modélisation à la couche complète de cordon de soudure.

Dans la plupart des études sur la fabrication additive, la déformation de la pièce est calculée selon l'équation suivante :

$$\epsilon_{i,j} = \epsilon_{i,j}^P + \epsilon_{i,j}^T \quad (1)$$

Avec $\epsilon_{i,j}$, $\epsilon_{i,j}^P$ et $\epsilon_{i,j}^T$ les déformations dues respectivement à la contrainte mécanique, à la plasticité du matériel et au gradient de température. Le rapport contrainte/déformation est généralement considéré comme linéaire :

$$\sigma_p = D_{p,,,} \epsilon_{i,j} \quad (2)$$

σ_p , correspondant à la contrainte élastique et $D_{p,,,}$, le tenseur de rigidité du matériau utilisé.

Les études sont axées sur le lien qui existe entre les contraintes et les déformations de la pièce et intègrent généralement des résultats expérimentaux validant le modèle thermique. Cependant, la plupart d'entre elles sont conduites sur des géométries simples telles que des cordons de soudure droits sur une ou plusieurs couches.

Pour définir la géométrie locale de la soudure, il existe déjà plusieurs approches. Dans l'étude de Morville [80], un modèle 2D détermine la géométrie locale de la soudure en déformant le maillage conformément aux contraintes thermocapillaires induites par le champ de température (l'effet « Marangoni »). D'autres, comme Toyserkani [77], modélisent eux aussi la soudure, mais en 3D. Pour ce faire, ils définissent une limite de bain de fusion à chaque intervalle de temps et modélisent l'alimentation en matériau dans cette zone en utilisant l'équation suivante :

$$\delta h(x,y) = \delta t \cdot m_p / \rho \cdot S_{powder} \quad (3)$$

δt correspondant à l'intervalle de temps de la simulation, m_p étant le débit de masse, ρ la densité de la poudre et la surface du jet de poudre sur la pièce.

Ce modèle a été réutilisé dans certaines études qui ont confirmé sa validité pour un cordon de soudage sur une couche, mais également pour plusieurs cordons de soudage sur plusieurs couches (Alimardani [81], Fallah [82]). Cependant, la simulation des pièces complexes est occasionnelle, car la résolution des modèles prend du temps. Actuellement, pour simuler un cordon de soudure droit d'une longueur de quelques dizaines de millimètres, la durée nécessaire varie de quelques heures à quelques jours, selon l'ordinateur et les modèles utilisés.

Logiciel commun utilisé

Il existe différentes façons de modéliser la fabrication additive d'une pièce à l'aide de différents logiciels de simulation. Dans la documentation, on en trouve certains, et notamment :

- Toyserkani [77] qui a déterminé les équations analytiques des différents phénomènes impliqués. Il a ensuite utilisé MATLAB et FEMLAB pour les résoudre. Un maillage en forme de tétraèdre a été utilisé avec un réglage pas à pas.
- Cho [78] a utilisé le logiciel ABAQUS. Il s'est concentré sur la chaleur latente et son effet sur la fabrication additive. Il a développé un modèle complet de fabrication additive.
- Comme Foroozmehr [74], Fallah [83] a utilisé Ansys APDL pour résoudre son modèle numérique. Le principe « additif » de la fabrication est représenté grâce à l'ajout/la suppression d'éléments de grille. Les comportements thermomécaniques sont également pris en compte.
- Alimardani [81] a utilisé COMSOL Multiphysics 3.2a pour développer ses propres modèles numériques grâce à l'association possible avec les codes MATLAB.

Les logiciels servant habituellement aux simulations mécaniques n'ont pas été développés pour les simulations de fabrication additives (Ansys, Abaqus, Matlab, CodeAser) ce qui les rend moins intéressants. Certains nouveaux logiciels ont été développés pour répondre aux spécifications correspondant aux simulations de fabrication additive :

- Virfac par GeonX. En se fondant sur les simulations de cordon de soudure, ce logiciel est adapté au procédé sur lit de poudre et un nouveau modèle de projection de poudre y sera bientôt intégré ;
- Simufact Additive Manufacturing semble très complet lorsqu'il s'agit de simuler l'ensemble du procédé additif pour déterminer les contraintes inhérentes au produit final ;
- SolidThinking Inspire,
- 3DSIM : avec ExaSIM, il est dédié au frittage laser.
- Project Pan : il est concentré sur les procédés sur lit de poudre, l'alimentation en fil et l'alimentation électrique. Mais il intègre un module fournissant les paramètres de fabrication afin de limiter les contraintes inhérentes au produit final.

2.7 Optimisation topologique

Introduction

L'optimisation topologique est une technique qui définit la répartition de matière permettant d'obtenir une conception optimale. Pour ce faire, l'utilisation de l'élément et les différentes contraintes appliquées sont prises en compte. Les caractéristiques de conception sont modélisées, et notamment le nombre, l'emplacement et la forme des trous, etc. (Driessen [83]).

L'optimisation topologique est utilisée pour redéfinir la topologie de la pièce en gardant uniquement la matière nécessaire (limites, nombre de trous, etc.) et accroît le potentiel d'optimisation. Pour Takezawa [84], parmi tous les types d'optimisation mécanique qui existent, l'optimisation topologique est celle qui offre le meilleur moyen de trouver une conception fonctionnelle optimale pour une pièce. Deux modes sont pris en compte : les approches continues et discrètes.

L'approche continue ou méthode d'homogénéisation (études de Bendsoe et Sigmund [85]) est une méthode courante, développée à partir d'une méthode de densité. La pièce est divisée en un nombre infini de variables infinitésimales. L'espace de conception (en bleu dans la Figure 2-18) est divisé en volumes infinitésimaux. Une variable est associée à la densité de chaque volume. Les variables peuvent avoir deux valeurs : 1 si la densité est positive (le volume est conservé, en rouge sur la figure 18) ou 0 si la densité est nulle (le volume est retiré, en blanc à la Figure 2-18). Ainsi, la géométrie de la pièce après le procédé d'optimisation est celle qui est formée par les volumes infinitésimaux avec une densité positive. Le principal avantage de cette méthode est que la conception optimale ne dépend pas de la géométrie initiale. L'approche n'est pas influencée par un biais négatif ou positif. Cette méthode donne des géométries très différentes des conceptions habituelles auxquelles nous pensons en premier lieu.

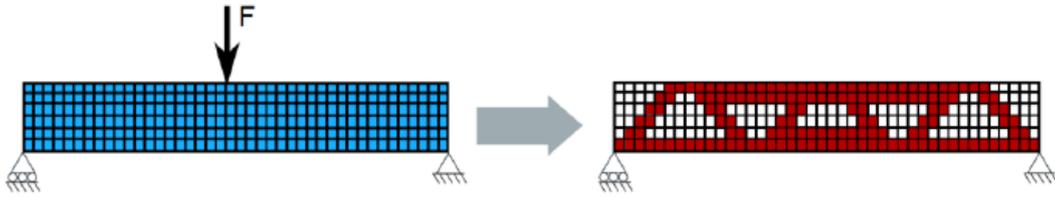


Figure 2-18. L'illustration du procédé d'optimisation topologique continue.

La seconde approche est celle des éléments discrets. Elle est fondée sur des éléments de base de mécanique structurale (poudre, coque...). Cette méthode est davantage une combinaison de plusieurs types d'optimisation (échelle, forme et topologie) qu'une technique d'optimisation topologique elle-même. La modification de structure est effectuée par l'ajout ou la suppression de certains éléments. Ainsi, le concepteur traite les éléments qu'il utilise pour travailler et il est plus simple pour lui de prévoir l'impact des modifications sur le comportement général de la structure. D'autre part, le résultat final dépend clairement de la géométrie initiale. Pour illustrer la méthode, on utilise le même exemple que pour la figure 2.19. La poutre initiale est modélisée par l'assemblage de plusieurs petites poutres. Le concepteur peut choisir de garder ou non les petites poutres. Le résultat final de la Figure 19 est fermé au procédé continu, mais il dépend de la géométrie initiale et de la position initiale des poutres de petite taille.

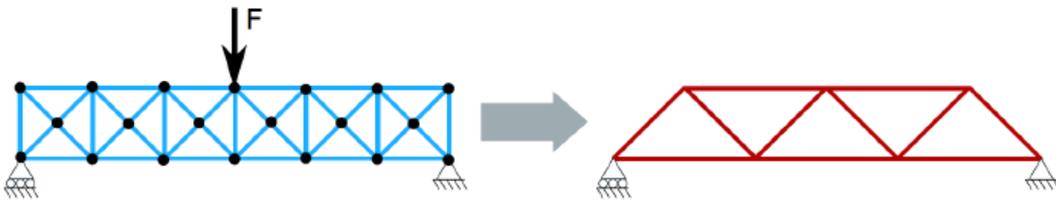


Figure 2-19. Illustration du procédé d'optimisation topologique discret.

Parmi les différents types de problèmes d'optimisation, l'optimisation topologique continue semble le meilleur moyen de mettre à profit les opportunités de la fabrication additive (Ponche [70]). Cette méthode est donc la meilleure si l'on considère que l'espace de conception initial n'a pas d'impact sur le résultat final. C'est pour cette raison que nous nous concentrons sur ce type d'optimisation.

Techniques d'optimisation continue

L'une des méthodes les plus couramment utilisées est la pénalisation (SIMP - Matière isotrope solide avec pénalisation) présentée par Bendsoe [85]. Cette méthode utilise un modèle de rigidité avec pénalisation pour interpoler le module élastique du matériau :

$$(x) = x_e^p E_0 \quad (4)$$

(x) étant le module élastique de l'élément e , x_e^i la conception ou la variable de densité des éléments, E_0 le module élastique d'un élément solide et p le paramètre de pénalisation.

Dans l'approche SIMP, le paramètre de pénalisation est généralement choisi comme supérieur à 1 (souvent $p=3$). Cette méthode d'interpolation mène à des densités

intermédiaires qui ne conviennent pas en raison de leur faible rigidité comparée à leur densité (Driessen [83]). Certains auteurs tels que Zegard [86] utilisent une version différente du modèle afin d'éviter certaines difficultés.

La technique « vide-plein » est également couramment utilisée avec l'algorithme BESO pour une optimisation de fabrication additive, car il fournit des résultats très intéressants. D'autres méthodes existent, notamment les algorithmes génétiques ou la méthode de définition de niveau, mais leur capacité à résoudre de manière adéquate les problèmes n'a pas encore fait ses preuves (Brackett [87]).

Le logiciel d'optimisation topologique est actuellement développé afin de prendre en compte les principales contraintes imposées par les procédés de fabrication communs. Un des plus importants intérêts de la fabrication additive est précisément que la plupart des contraintes de fabrication ne sont pas applicables au procédé additif. La fabrication « couche par couche » permet toutes les géométries, en particulier celles qui sont impossibles à obtenir avec des techniques de fabrication communes : le procédé de fabrication n'impose pratiquement aucune contrainte aux conceptions de pièce. Elles sont soumises uniquement aux seuls besoins de l'utilisateur (solidité des matières, des formes, etc.). Grâce au procédé d'impression, l'augmentation de la complexité des pièces n'augmente pas forcément un produit plus cher. Le coût de fabrication est quasiment le même que celui des procédés communs, ou ils peuvent être moins chers si aucun support n'est utilisé.

Principales difficultés liées à l'optimisation topologique pour la fabrication additive

Taille du maillage

La première restriction de l'optimisation topologique du procédé de fabrication additive est la taille maximale des éléments de maillage qui contribue à obtenir une optimisation topologique significative. Enfin, la fabrication additive permet d'obtenir des épaisseurs de paroi très fines. Cependant, l'optimisation topologique exige au minimum 2 ou 3 éléments pour chaque épaisseur. Cela permet d'obtenir des éléments de très petite taille et un très grand nombre d'éléments pour effectuer un maillage sur la totalité de la pièce, et le temps nécessaire à l'optimisation de la topologie de pièce augmente de façon significative.

Contraintes de fabrication

Certaines conceptions ont besoin de supports en raison de leurs angles de pente (par rapport au plan horizontal) et de la méthode fabrication utilisée (gradient de température plus ou moins important). En fonction de l'angle d'inclinaison, il existe une valeur de distance maximale sur laquelle il est possible de pratiquer la fabrication additive. Par exemple, l'étude de Brackett [87] montre qu'avec un angle de 25°, la distance maximale est de 15 mm. Avec un angle de 30°, la distance maximale est de 20 mm. Si l'angle est supérieur à 45°, il n'existe pas de limite. Dans les autres cas, l'utilisation de supports est nécessaire.

En général, la finition des surfaces produites n'est pas satisfaisante. Une opération de finition doit être exécutée si l'on veut obtenir un produit fonctionnel. Cela signifie qu'il faut pouvoir accéder à toutes les surfaces, ce qui n'est pas toujours faisable.

L'optimisation topologique est basée sur une forme discrète de la pièce de laquelle certains éléments sont retirés. Un lissage des surfaces est nécessaire après l'optimisation topologique. Certains logiciels tels que Materialise Magics, Netfabb Studio et Marcam Autofab effectuent l'exportation de la géométrie lissée, autrement, le concepteur doit le faire lui-même avec un logiciel CAO. Le module OSSmooth d'Optistruct le fait. Ce module permet la modification directe de la géométrie, ou un mélange de deux conceptions optimisées et de dessins de CAO locaux (importé dans « .stl »).

Enfin, il est important de souligner que chaque nouvelle conception doit faire l'objet de deux simulations : la première pour simuler la fabrication et la définition des contraintes inhérentes, la seconde pour vérifier la résistance du matériau.

Un ou plusieurs matériaux pour la fabrication ?

Certains procédés de fabrication sont mieux adaptés à la fabrication avec plusieurs matières que d'autres. Les procédés de fabrication par jet (impression 3D) ou par extrusion conviennent particulièrement bien à une production impliquant plusieurs matériaux, alors que les techniques à lit de poudre, SLM/SLS et de stéréolithographie sont les procédés à utiliser avec un seul matériau (Brackett [87]).

Logiciel

Parmi les logiciels possibles, TOSCA (Conception FE) a été testée par Brackett [78]. Ce logiciel commercial n'est pas adapté à l'optimisation topologique pour la fabrication additive de pièces, parce que chaque épaisseur ne contient que deux couches de raffinement. En outre, le niveau de remaillage nécessaire pour la fabrication de pièces est insuffisant.

Actuellement, l'épaisseur du cordon de soudure est la seule contrainte qui doit être prise en compte dans une optimisation topologique. On peut trouver la même contrainte dans Optistruct (et 3-MaticSTL dans le cas d'un post traitement de la géométrie avant la fabrication) d'Altair et Nastran (MSC).

Parmi les logiciels du commerce, ceux qui sont utilisés le plus fréquemment sont :

- Materialise Magics,
- Netfabb Studio,
- Marcam Autofab,
- NX Hybrid Additive Manufacturing (qui permet le prototypage, la fabrication et la réparation de produits),
- MI:Additive Manufacturing,
- GENESIS Topology (Ansys),
- 3DSIM (qui inclut un module de simulation de fabrication).

2.8 Stratégie de numérisation

Comme nous l'avons déjà dit dans le présent document, certaines études ont déjà souligné que la stratégie de balayage choisie dans la fabrication additive a un impact sur la géométrie finale du produit (Bo [73]). Plusieurs logiciels ont été développés pour obtenir les trajectoires optimales telles que :

- PowerCLAD,
- Le module Grasshopper de Rhino (Duballet [19]) ; qui peut également être utilisé pour l'optimisation topologique (Ren [20]) ;

PowerCLAD a été développé à partir de PowerSHAPE et PowerMILL qui sont des modules développés à partir d'Autodesk (d'abord nommé Delcam) et IREPA LASER. Dans le module PowerMILL, les trajectoires d'usinage ont été inversées et la collision entre l'outil et la pièce matière première a été étudiée afin de définir les stratégies de balayage. Cette façon d'inverser la stratégie par rapport aux processus de fabrication classiques peut également être appliquée à un autre logiciel de FAO tel que CATIA. Mais Dassault Systems a choisi de développer son propre module, «Delmia», pour déterminer les trajectoires. De même, Siemens a ajouté un nouveau module à son logiciel CAD NX (dédié à la fabrication additive) nommé « Nx Hybrid Additive Manufacturing ».

Enfin, chaque constructeur de machine dédié à la fabrication additive doit fournir une solution (généralement un logiciel maison) pour générer les stratégies de numérisation. Les plus connues sont Cura 3D et MakerBot Print.

3 FABRICATION ADDITIVE – OFFRE TECHNOLOGIQUE

3.1 Motivation et potentiel

La popularité de la fabrication additive (FA), connue dans le public sous le nom d'impression 3D, promet de transformer fondamentalement le cycle de développement des nouveaux produits, du concept au produit. Cette technologie est devenue populaire avec le prototypage rapide des composants polymères et la capacité technologique de produire des composants métalliques par FA a vraiment le potentiel de « changer les choses ». La FA n'est plus un simple raccourci qui permet aux concepteurs et aux ingénieurs de concrétiser rapidement des concepts en les faisant passer de l'état de modèle numérique à celui de prototype physique. Le procédé de FA offre la possibilité de créer de A à Z de nouveaux produits qui ne pouvaient pas être fabriqués à l'aide de méthodes de production conventionnelles.

Les technologies de FA peuvent révolutionner de nombreux secteurs de la fabrication en réduisant les délais de mise sur le marché, les frais, le gaspillage de matériau, la consommation d'énergie et les émissions de carbone. De plus, la FA offre de nouvelles méthodes et de nouvelles capacités de production qui jusqu'ici, étaient limitées par l'utilisation de procédés de fabrication par enlèvement de matière, s'ouvrent à de nouvelles limites pour le cycle de vie de l'équipement et des composants, ce qui vous

permet de prolonger la durée d'utilisation des pièces, et ce, grâce à des méthodes de réparation innovantes ou via la production des pièces de remplacement sans recourir à des outils. À titre d'exemple, nous pouvons citer le cas du secteur aérospatial, où l'utilisation de ces fonctionnalités de FA peut mener à une réduction de la quantité de nouveau matériau brut requis pour fabriquer un composant déjà en service, connu sous le nom de « buy-to-fly ».

La possibilité d'étudier l'utilisation potentielle de la FA peut également mener à l'émergence d'innovations dans les structures légères pouvant être utilisées dans des véhicules aériens sans pilote dans un premier temps, pour être par la suite utilisé dans le secteur de l'aviation en général, tout d'abord dans la première phase de production d'éléments non structurels, puis dans les composants primaires. La Figure 3-1 ci-dessous présente ce qui devrait devenir un cycle classique de production par fabrication additive.



Figure 3-1. Tous les procédés de FA. [39]

La technologie de production de composants métalliques pour FA est actuellement dans une phase active de développement qui rend déjà possible la production de composants techniques fiables et reproductibles parfaitement fonctionnels.

Cependant, il est clair que grâce à la seule la combinaison de la conception de produit virtuel, notamment du CFD, FEM, et d'autres outils d'analyse numérique, et l'application de principes de conception optimisés pour la FA, il est possible d'examiner le potentiel de la production additive. Les sous-procédés de développement de composants pour la production par FA la plus courante sont présentés à la Figure 3-2.

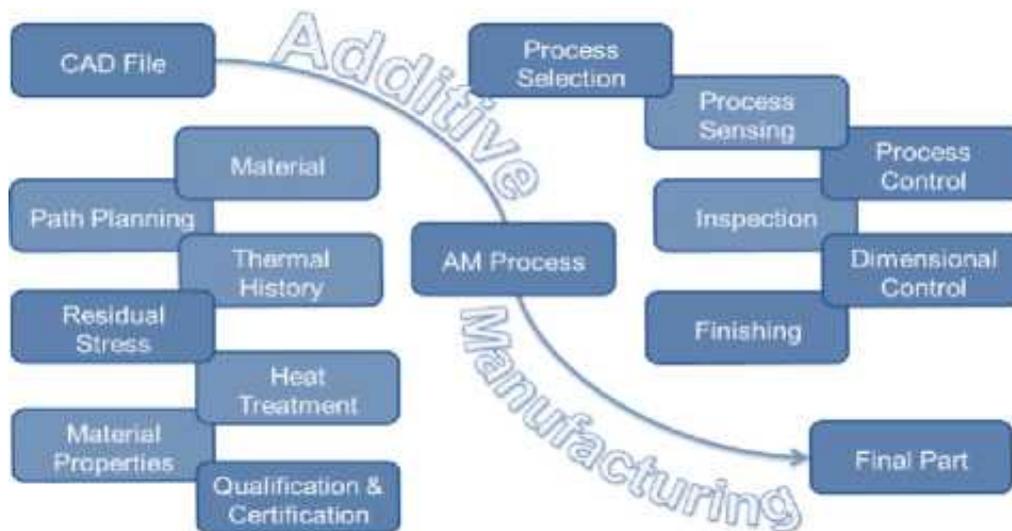


Figure 3-2. Flux de travail FA. [40]

Récemment, Caffrey et Wolhers ont montré la popularité croissante de l'utilisation de la FA dans la production de composants industriels métalliques, en suivant la vente d'équipements métalliques pour la FA chaque année, Figure 3-3.

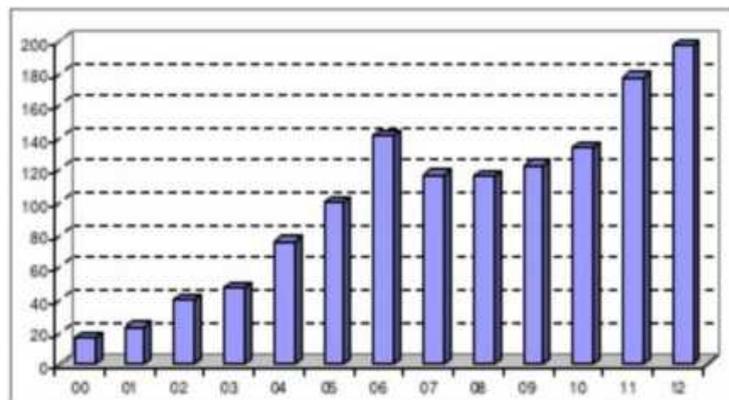


Figure 3-3. Vente d'équipement FA Source : Rapport Wohlers 2013 [41, 42]

En 2010, Holmstrom *et al.* [41] ont suggéré que les principaux avantages de la fabrication additive par rapport à la fabrication par enlèvement sont les suivants :

- pas besoin d'outils de production ni de délai d'adaptation pour « intensifier » la production ;
- les petits « lots » de production sont réalisables et économiquement viables ;
- Les changements de conception sont prêts et rapides à mettre en œuvre ;
- optimisation de produit focalisée sur la fonction (par exemple, canaux de refroidissement optimisés) ;
- possibilité de produire des géométries complexes ;
- potentiel de simplification de l'industrie de la chaîne des approvisionnements, délais de livraison réduits, des volumes d'inventaires plus faibles.

En 2014, *Ford* [42] a suggéré qu'en poursuivant son évolution, la technologie de la FA pouvait déboucher sur les modifications suivantes :

- un « délai de mise sur le marché » plus court dû à des cycles de prototypage et de conception rapides, ainsi que la possibilité d'élimination de nombreuses opérations de fabrication traditionnelles, notamment le transport, la fabrication de moules et l'assemblage ;
- la concurrence plus intense se traduisant par une plus grande diversité de solutions/produits en raison de l'élimination de barrières ;
- des chaînes d'approvisionnement plus courtes, plus efficaces et meilleur marché, en particulier pour ce qui concerne la production de composants complexes, avec des volumes de production réduits.

3.2 Prévisions

En 2050, la fabrication devrait être tout à fait différente, en passant d'une production de masse bon marché à une production personnalisée, s'adaptant ainsi aux marchés en pleine évolution [65][66]. Ces technologies permettent une production propre, grâce à une efficacité énergétique et un taux d'utilisation accrus. Au cours de ces années, le secteur de la FA est passé du prototypage à la production, et les exigences en matière de qualité et de complexité sont bien plus étendues. Le rapport Wohlers 2016 indique que le « point de bascule » de la FA a été atteint en 2012 [67]. À la suite de ce dernier, des investissements massifs ont été réalisés en matière de recherche et de commercialisation. De nombreux fabricants d'équipements sont apparus en 2015 et continueront d'évoluer de manière impressionnante au cours des 5 à 15 années qui viennent [67].

Le secteur aérospace donne une impulsion à la FA. Pour ce faire, GE a ouvert un centre de recherche sur la FA de 32 millions en Pennsylvanie en 2016. La Federal Aviation Administration des États-Unis a agréé l'un des composants réalisés par fabrication additive, et l'a intégré à 400 moteurs à réaction sur des avions commerciaux. GE travaille à obtenir l'autorisation de produire des buses intégrées fabriquées par FA pour une nouvelle génération de moteurs à réaction. Ces buses sont 25 % plus légères que les buses conventionnelles [67]. D'ici à 2020, 100 000 pièces pour moteurs d'avions devraient être produites par FA. Airbus mise également sur la fabrication additive pour le futur. La société travaille intensivement sur les méthodes d'optimisation de topologie avancées, obtenant parfois une réduction de poids de 50 % ou plus. Les avions contiennent de nombreuses pièces polymères et métalliques. La société prévoit de construire 30 tonnes de pièces métalliques chaque mois en 2018, grâce à un réseau de systèmes de FA. 300 employés supplémentaires ont été formés à la FA en 2016 [67].

La rareté des matières premières, les bases de big data [66] et la tendance à la personnalisation de produit font de la FA une parfaite alternative à la fabrication conventionnelle. Les prévisions de la FA examinent différents points pour améliorer la technologie en termes de viabilité à l'échelle industrielle.

- Productivité et flexibilité
- Collecte de données
- Normalisation de la qualité
- Disponibilité des matériaux

➤ Équipes multidisciplinaires et programmes de formation

On attend une réduction des coûts d'équipement de FA de 25 à 45 % en 2020. Les frais élevés d'équipement de la FA se justifient par une vitesse de fabrication plus courte, des chambres plus grandes, et la simplicité de chargement ou de déchargement, entre autres. Pour accroître la vitesse de dépôt et la productivité, la recherche se concentre sur différents points clés. Par exemple, des lasers plus performants sont à l'étude [68]. Un équipement utilisant plusieurs lasers est pris en compte pour qu'ils fonctionnent en parallèle ou suivent plusieurs stratégies, notamment la stratégie skin-score, qui utilise un laser haute performance pour construire la base de la pièce, et un autre laser, moins puissant, pour construire la surface, qui a besoin de davantage de précision. Des systèmes de matrice à plusieurs points montés sur une tête de type tête d'impression permettant l'évacuation des fumées, et un gaz de protection local sont étudiés grâce aux avantages que présentent la vitesse d'exécution et l'absence de limite de la taille de chambre. Le concept d'illumination du lit de poudre ou la fusion multi-jets est au stade de développement. Ce système utilise des agents chimiques pour réduire ou amplifier le procédé de fusion, ce qui permet d'obtenir une haute précision sur la surface, et des caches pour contrôler le rayonnement laser. Autre option pour réduire la durée de traitement : l'utilisation de systèmes novateurs qui accélèrent le dépôt de poudre ou permettent de réaliser simultanément le dépôt de matière et la fusion.

La rugosité de la surface et la précision peuvent être optimisées via un traitement ultérieur, notamment le fraisage, le polissage et/ou l'usinage. Pour ce faire, les machines hybrides intègrent à la fois la fabrication additive et l'usinage, ce qui permet d'améliorer la productivité et de réduire les temps d'arrêt. Les concepts de modularisation et d'intégration permettent une certaine flexibilité grâce à la combinaison et à l'intégration de périphériques, de chambres de fabrication plus importantes, d'un traitement postérieur et d'une station de manipulation ou de déchargement qui peuvent réduire considérablement les coûts de production.

Les composants complexes de bonne qualité sont difficiles à obtenir. C'est pour cela qu'il est important de créer et de suivre des méthodologies permettant de sélectionner les paramètres et les stratégies pour différents matériaux. L'intégration et la communication entre machines, la collecte de données et les programmes d'analyse permettant de les gérer sont très importants. Par ailleurs, la simulation est utile pour prévoir et contrôler les distorsions, les contraintes résiduelles et les microstructures, ce qui limite le nombre d'expériences à mener.

Dans le domaine des systèmes de surveillance, différentes méthodologies ont été développées pour garantir des procédés de fabrication constants, pour produire différents lots sans différence de qualité et de dimensions d'un lot à l'autre. Le contrôle de procédé de la chambre permet de surveiller les éventuelles irrégularités survenant pendant le dépôt de chaque couche, mais également les paramètres physiques du laser, le niveau d'oxygène et de pression dans l'atmosphère. Le contrôle du procédé de bassin de fusion permet la surveillance de la température et de la forme du bain de fusion en temps réel à l'aide de capteurs de haute résolution. Cela permet d'améliorer la traçabilité, la qualité, la

fiabilité, la répétabilité et l'efficacité du procédé. Il existe également des logiciels de simulation qui permettent de préparer le bassin de fusion et de prévoir le comportement de la poudre de métal.

D'autre part, des tests non destructifs (NDT) assurent la qualité des composants fabriqués. Dans ce domaine, la tomographie informatisée est un outil utile pour détecter la porosité des géométries complexes. En raison du caractère récent de la fabrication additive des pièces métalliques, les spécifications d'inspection sont toujours en cours d'élaboration et de nombreux concepteurs de méthodes d'inspection explorent de nouvelles méthodologies de fabrication additive [67].

L'optimisation des conceptions de topologie doit être améliorée par un logiciel spécialisé. Les concepteurs changeront leur méthode de conception pour adopter un mode plus fonctionnel, exigeant moins de fabrication et leur offrant davantage de liberté de conception. Le logiciel d'optimisation de topologie permet des conceptions optimisées et efficaces avec des structures de type réticulaire et bionique en appliquant des algorithmes mathématiques. Dans les structures réticulaires, les matériaux sont ajoutés seulement aux zones utiles, permettant d'obtenir des structures rigides tout en optimisant leur poids, ce qui réduit la consommation de poudre de métaux et les délais nécessaires à la fabrication.

L'absence de standardisation rend difficiles la certification et la normalisation de la fabrication additive dans des domaines où la certification est très importante, notamment le secteur aérospace. La normalisation est nécessaire si l'on souhaite obtenir un procédé viable. La normalisation d'un procédé peut être obtenue grâce à la création d'une base de données répertoriant les propriétés des différentes applications en fonction des matières et des paramètres, à l'optimisation des propriétés mécaniques en fonction des traitements thermiques et des paramètres de procédé. La normalisation de la conception nécessite la définition de règles de conception et de critères de fabrication. À l'avenir, ces règles devraient être partagées et harmonisées [69].

Le nombre de matériaux disponibles continue d'augmenter. Cependant, une augmentation du nombre de matériaux est nécessaire. Des développements sont en cours sur les procédés de traitement de nouveaux matériaux métalliques tels que les superalliages à base de nickel, à base d'aluminium, les métaux réfractaires et les aciers martensitiques, entre autres. La création de bases de données répertoriant les propriétés de matériaux spécifiques obtenus par fabrication additive et différents procédés peut fournir des informations pour la conception de nouveaux alliages appropriés pour la FA.

EXMET a développé un procédé permettant de réaliser des pièces métalliques à surface vitreuse au moyen de la fabrication additive. Les métaux vitreux combinent de façon unique des propriétés telles qu'une robustesse élevée, une certaine élasticité, la dureté, la résistance à la corrosion, la conductivité et la biocompatibilité, toutes très utiles pour une application à forte valeur future dans les secteurs électronique et aérospace et l'ingénierie mécanique.

Un nouveau procédé de fabrication servant à fabriquer des composants avec plusieurs matières à des fins spécifiques est en cours de mise au point. Ils sont réalisés à partir de la

transition de la matière dans un corps pendant le procédé de fabrication. Ils doivent prouver une compatibilité entre les deux matières. Ils peuvent être fabriqués dans deux chambres différentes ou faire appel à une modification de la matière première par la combinaison de trois matériaux différents dans des proportions différentes.

Dans le domaine de la fabrication de la poudre, la tendance est à la réduction du prix des poudres et à l'augmentation du volume de poudre produit. METALYSIS est un nouveau procédé de fabrication de poudre qui utilise l'électrolyse. Il présente l'avantage d'être propre, de consommer peu d'énergie et de réduire les coûts de 75 % [68]. Cependant, une méthodologie permettant de valider les poudres fabriquées selon les nouvelles technologies est requise. Il est également nécessaire de mener une étude approfondie du recyclage ou de la réutilisation des poudres tout en faisant en sorte que les pièces fabriquées gardent des propriétés correctes.

Parmi les exigences futures, des programmes d'éducation et de formation sont indispensables pour former des travailleurs compétents, et il faudra créer des équipes multidisciplinaires pour développer des produits complexes par FA [65]. Pour parvenir à ce résultat, il est très important de concevoir des programmes de formation centrés sur les techniques et les technologies de la FA métallique pour le premier cycle, le collège et l'université, mais aussi dans le cadre de la formation professionnelle, afin d'inclure différents métiers et un nombre de professionnels dans ce domaine [67].

3.3 L'opportunité du marché

Ce chapitre décrit la situation actuelle de l'investissement dans les technologies de la FA au niveau mondial.

Europe

Le marché d'ensemble de la fabrication additive a dépassé le milliard de dollars en 2009, avec des recettes directes issues des systèmes et des ventes de plus de 500 millions de dollars.

90 % des équipements de fabrication additive vendus sont des imprimantes D qui permettent la production d'équipements et de composants en polymère. Il faut noter que la visibilité de ce type d'équipement contribue réellement à la croissance du marché de la technologie de la FA. Début 2010, plusieurs sociétés menées par Materialise ont formé un groupe pour assurer collectivement la commercialisation de la FA. Un numéro récent du magazine Britannique *The Economist* a fait sa Une sur le potentiel de la fabrication additive en tant que technologie de fabrication révolutionnaire.

Bien qu'actuellement, la majeure partie de l'activité de systèmes de fabrication additive utilise des systèmes à base de polymères, la fabrication additive métallique génère actuellement beaucoup d'activité et suscite bien de l'intérêt. La fabrication métallique suscite beaucoup d'intérêt, car elle offre la possibilité de fabriquer directement des pièces « quasi-parfaites », et dans certains cas, des composants finaux, sans recourir à des outils ou à des procédés d'usinage par la suite. Elle intéresse particulièrement le secteur

aérospatial, l'industrie automobile bas de gamme et le secteur biomédical, et ce, parce qu'elle offre la possibilité de produire des composants hautes performances tout en réduisant le coût total de production. Les chercheurs et les leaders de l'industrie de l'Union européenne (UE) voient dans la FA une technologie émergente clé.

Différents pays n'appartenant pas à l'UE ont accru leur connaissance de la technologie de FA, car depuis des années et jusqu'à aujourd'hui, l'Amérique du Nord est à l'avant-garde en matière d'adoption de la FA. Cependant, l'importance accordée à ces systèmes et à ces technologies a tendance à s'étendre rapidement à d'autres pays, mettant la FA au centre du développement de leur territoire. Toutefois, la situation des différents pays d'Europe n'est pas la même partout, comme vous le verrez ci-dessous :

| Pays | Opportunité du marché |
|------------------|---|
| Belgique | Le gouvernement régional des Flandres a investi dans un programme de fabrication additive nommé STREAM (Structural Engineering Materials via la FA). Ce programme, qui faisait appel aux universités, aux centres de recherche et à l'industrie a donné naissance à trois projets financés à partir de 2014. Les projets ont pour objectif de développer le frittage sélectif par laser des polymères et la fusion laser sélective des métaux. Une suite d'initiatives éducatives a été développée pour favoriser la propagation de la technologie de FA [43]. |
| France | L'association française pour le prototypage rapide a contribué à augmenter les niveaux de normalisation des technologies de FA, à la fois sur le plan national et sur le plan international [43]. |
| Allemagne | L'Allemagne a une stratégie de fabrication additive qui se développe via l'établissement de liaisons entre la communauté scientifique et l'industrie. Le Direct Manufacturing Research Centre (DMRC), établi dans l'Université de Paderborn en Allemagne, est une association établie entre l'industrie et les universités visant à développer les technologies de Fabrication additive. Le DMRC et le German State of North-Rhine-Westphalia ont fait un investissement conjoint de plus de 2 millions €. 3 400 000 € supplémentaires ont été investis par l'État allemand pour compléter l'investissement équivalent de l'industrie, ce qui représente un budget global d'environ 11 millions d'euros qui financera un plan quinquennal de cinq ans destiné au développement de la FA [43]. |
| Pays-Bas | Aux Pays-Bas, le procédé de développement de produit est devenu un volet essentiel de la FA. Par exemple, l'institut de recherche hollandais a initié une initiative de développement partagé (Penrose) avec un certain nombre de partenaires de l'industrie dont l'objectif est le développement de la prochaine génération d'outils et appareils de FA en vue d'une production de composants via le procédé de FA de niveau industriel [43]. |

Portugal

La stratégie portugaise en matière de fabrication additive est en accord avec les initiatives européennes sur le prototypage rapide, notamment pour ce qui concerne les moules. Des projets RTD ont également été financés et un réseau national pour le prototypage rapide (RNPR) a été créé. L'industrie était poussée par la curiosité, mais les résultats sont restés limités. L'année 2000 fut cruciale pour l'exploitation du prototypage rapide, le développement des systèmes, les modèles d'activité, les initiatives et les événements. Après 2010, les initiatives « Industry 4.0 » initiées par les ministères de l'Économie et la technologie ont suscité l'intérêt de différents secteurs d'activité, notamment de la métallurgie, de la céramique, du verre, de la construction, de la santé et de l'aéronautique. Aujourd'hui, le Portugal a acquis des compétences en application, mais la fourniture des systèmes en est toujours à ses balbutiements. Actuellement, le programme Additive Manufacturing Initiative (initiative portugaise en matière de fabrication additive) est sur les rails, et devrait assurer la liaison entre différents centres de recherche dans le domaine de la fabrication additive. En 2016, le CDRSP s'est vu attribuer par le ministre des Sciences la responsabilité de coordonner une plateforme de fabrication additive nationale.

Portugal

Espagne

En Espagne, les centres de recherche privés ont pris la tête des applications industrielles de FA et récemment, de nombreuses start-ups sont intervenues directement dans ces nouvelles technologies. Certaines régions comme l'Andalousie, les Asturies, la Catalogne et le Pays Basque sont très actives et font avancer les initiatives européennes dans plusieurs domaines, notamment le secteur aérospatial, la construction et les transports. Le gouvernement espagnol, en plus d'affecter les fonds correspondant au plan H2020, finance des projets spécifiques de technologies et d'applications de FA.

En outre, ADDIMAT, l'association Additive & 3D Manufacturing Technologies d'Espagne animée par l'AFM a été fondée fin 2014, avec un objectif principal : regrouper toutes les forces du secteur et accélérer l'adoption de la fabrication additive par l'industrie espagnole. Aujourd'hui, elle représente 60 organisations présentant des profils divers : des fabricants d'équipement, des fabricants de matières premières et de pièces, des utilisateurs finaux, des prestataires de service, des distributeurs et des bureaux de commercialisation, des centres de recherche, des universités et des centres éducatifs. www.addimat.es

**Royaume-
Uni**

Le Royaume-Uni a également constaté des investissements significatifs dans la FA et ce, dans un certain nombre de secteurs, comme l'indiquent les chiffres qui suivent : le secteur des biens de consommation a apporté 2 500 000 £ engendrant environ 7 500 000 £ de financement de l'État, le secteur automobile a versé 3 500 000 £ en engendrant un financement d'état de 6,5 millions £ sur des activités de recherche de FA et le secteur médical investit 3 millions de £ pour compléter un financement de 11,5 millions de £ dans ce domaine. Dans le même temps, le secteur aérospatial du Royaume-Uni a investi 13 millions de £ dans le développement de la FA. Plus récemment, le Gouvernement britannique a investi 30 millions, à parts égales avec l'industrie sur une période de sept ans afin de développer une

nouvelle technologie aérospatiale. L'EPSRC (Engineering and Physical Sciences Research Council) a également émis un Fonds de 4 millions de livres pour le développement de la FA.

Le Portugal aurait tout intérêt à parier sur la fabrication additive au niveau international, et en particulier en Europe comme décrit plus haut dans plusieurs aspects et secteurs, car dans ce domaine, les technologies, malgré leurs 27 ans d'histoire et d'évolution, sont toujours en phase de germination. Les sociétés portugaises trouveraient là suffisamment de place pour se développer et s'imposer dans des domaines déjà identifiés, que ce soit dans les applications ou le développement et la fabrication de systèmes (équipement + matériaux) [43].

États-Unis

En 2012, le National Additive Manufacturing Innovation Institute (Institut national de l'innovation de la fabrication additive - NAMII) a financé 22 projets dans le domaine grâce à un investissement public de 13 500 000 \$ et à 15 millions de \$ d'investissement du secteur. Il a également lancé une série de projets de recherche exécutés par des agences publiques qui ont reçu plus de 7 millions de dollars de financement. En mars 2014, une annonce a été faite disant que le gouvernement allait accroître son engagement de financement de 50 millions d'euros [43].

Asie

Les pays asiatiques investissent eux aussi. En fait, 26,4 % de l'ensemble des systèmes industriels de la FA installés dans le monde se trouvent dans la région Asie/Pacifique. La province d'Anhui (Chine), Hefei et Bozhou et Xery3D investissent ensemble 245 millions de \$ sur une période de 6 ans pour développer l'impression 3D. En avril 2014, le Ministère de l'Économie, du commerce et de l'Industrie (METI) du Japon a investi plus de 36 500 000 \$ pour lancer un nouvel organisme de recherche pour développer la technologie de fabrication additive métallique. En mars 2013, le gouvernement de Singapour a annoncé qu'il allait investir environ 400 millions de \$ sur une période de cinq ans dans des technologies de fabrication avancées. Dans le même temps, L'Université technologique Nanyang bâtira un centre de recherche sur la FA, et prévoit d'investir pour cela 30 millions de \$.

Le Ministère de la Science et de la Technologie de Taïwan a initié un programme de développement de l'impression 3D, avec un financement annuel de 2,33 millions de \$.

Afrique du sud

Au cours de l'année 2013, plus de 10 millions de \$ ont été investis en Afrique du sud, et 80 % de ces investissements ont été concentrés sur les systèmes de FA de la catégorie d'imprimante 3D privée. L'Afrique du sud semble prête à accroître ses investissements

dans le domaine de la FA et à étudier des domaines spécifiques, notamment les secteurs de la médecine, du dentaire et de l'aéronautique [43].

Australie

L'Advanced Manufacturing Cooperative Research Centre (AMCRC), initiative de développement majeure en Australie a déjà financé un certain nombre de projets de FA et dirige un consortium qui vise à mettre en place un centre national chargé du développement de la FA, et qui devrait bénéficier d'un investissement de 50 millions de \$ australiens sur 7 ans. Les pays européens ont également développé des compétences nationales en matière de FA, ce qui représente un progrès significatif pour l'extension et la commercialisation des technologies [43].

3.4 Contexte industriel

Le secteur aéronautique, qui nécessite des pièces à géométrie complexe, résistantes, légères et généralement produites en petites quantités, utilise des technologies de FA datant de 1988, alors que les tests de cette technologie en étaient à leur début. Avec le temps, l'adoption des différentes technologies de FA a augmenté dans tous les secteurs. Actuellement, selon le rapport de Wohler de 2013, le secteur aérospatial représente 10,2 % des revenus mondiaux générés par la fabrication additive de 2012. Dans les seuls États-Unis, le secteur de la fabrication aérospatiale (fabrication traditionnelle et additive) a généré un rendement estimé à 157,7 milliards de \$ en 2011. Le secteur aérospatial représente environ 12,1 % de la production additive, d'une valeur estimée à environ 29 800 000 \$, ce qui représente moins de 0,05 % de la valeur totale du secteur aérospatial américain.

Le secteur aérospatial prête une attention croissante à la FA, et la considère comme un moyen de réduire le coût du développement des prototypes, et même comme une alternative pour créer des composants fonctionnels. Pour réduire le poids de l'avion, l'industrie développe un nombre croissant de pièces d'avion fabriquées avec des matériaux légers généralement onéreux, la technologie de FA permettant de réduire la quantité de matière première utilisée au minimum, optimisant ainsi le poids, le coût et le délai de production, ce qui apparaît comme une solution viable. Bien que les technologies de fabrication additive et leurs applications soient en constante évolution, le tableau suivant a pour objectif de présenter certaines applications actuelles et futures du secteur aérospatial :

Tableau 3-1. Applications générales de technologie de fabrication additive dans l'industrie automobile, l'aéronautique, le secteur de l'espace et des moules [44]

| Applications actuelles | Applications futures |
|--|--|
| Prototypage et développement conceptuels | Systèmes électroniques intégrés produits par fabrication additive directement sur les pièces |

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| Production de pièces détachées | Fabrication additive d'ailes d'avions |
|--------------------------------|---------------------------------------|

| | |
|--|---|
| Production de pièces avec gaspillage de matières premières réduit au minimum | Production de composants directement pendant la réparation sur site |
|--|---|

| | |
|--|--|
| Production des composants avec des structures internes complexes | Production de pièces de moteur complexes |
|--|--|

| Défi | Produit résultant |
|--|--|
| Injecteur Moteur GE LEAP (General Electric and Morris) |  <p>Injecteur 25 % plus léger et cinq fois plus résistant à l'usure qu'une pièce conventionnelle [45].</p> |
| Réacteur GENx (General Electric) |  <p>Réacteur capable d'atteindre 33 000 tr/min à plein régime[46]</p> |
| Drones plus grands, plus rapides et plus complexes produits par fabrication additive (Stratasys et Aurora Flight Sciences) |  <p>Délais de développement d'ingénierie et de production réduits de 50 % [47]</p> |
| Tuyère de moteur de fusée (NASA Aerojet et Rocketdyne) |  <p>Développement d'ingénierie, de production et de test d'un composant critique tel que la tuyère d'un moteur avec une réduction de coût de 70 % [48]</p> |
| Support de cabine pour l'Airbus A350 XWB (Airbus et Concept Laser GmbH) |  <p>Pièce imprimée à l'aide de titane (Ti), avec réduction du poids de plus de 30 % [49].</p> |
| Démonstrateur d'un modèle d'aile (Concept Laser GmbH) |  <p>Prototype de structures légères réalisé par production additive (production immédiate) [50].</p> |
| Conduite de gaz (RSC Engineering GmbH) |  <p>Conception optimisée d'une conduite d'émission. [51]</p> |

| Défi | Produit résultant |
|--|--|
| Modèle de moteur (Concept Laser GmbH) |  <p>Modèle complet de moteur en acier inoxydable incluant les engrenages et les revêtements d'aile 3D [51].</p> |
| Chambre de combustion (Concept Laser GmbH) |  <p>Prototype Fonctionnalités du procédé de production additive, prouve notre de production et parois internes.</p> |
| Raccord universel (Concept Laser GmbH) |  <p>Prototype d'engrenage fonctionnel</p> |
| Outil d'engrenage creux (VBN Suède) |  <p>Délai de production plus court, gaspillage moindre et allègement 40 % du poids de l'outil [51]</p> |
| Support multi-composants (Airbus et 3T) |  <p>Pièce unique avec 35 % de poids en moins. Le support produit par FA est 40 % plus rigide que le composant d'origine, et réduit également le gaspillage généré par les méthodes conventionnelles. [52]</p> |
| Moteur de tank AbramsM1AGT1500 (Optomec) |  <p>Moteur de tank AbramsM1AGT1500 utilisant le système de FA LENS. [53]</p> |
| Injecteurs de carburant en spirale (Morris Technologies) |  <p>Production de conceptions extrêmement complexes, produit comme une seule pièce, réduction drastique du délai de production (2 semaines au lieu de 6 semaines), 50 % de réduction des frais et amélioration de la solidité. [54]</p> |

| Défi | Produit résultant |
|--|---|
| Incertitude de moulage d'injection thermoplastique (Renishaw) |  <p>Production de dessin extrêmement complexe, durabilité et meilleures performances.</p> |
| Circuit de refroidissement de motosport (Green Team and Rennishaw) |  <p>Support de roue et circuit de refroidissement fabriqués de manière à améliorer la capacité de refroidissement, conception complexe</p> |
| Incertitude de moulage d'injection thermoplastique (Moules linéaires) |  <p>Délai de cycle optimisé, durabilité accrue des inserts d'outils.</p> |
| Embouts d'échappement Koenigsegg One: 1 (Koenigsegg) |  <p>Embout d'échappement d'automobile Koenigsegg Un : fabriqué en titane, ce qui a permis d'alléger le poids de 400 g avec un délai de production de 3 jours. [55]</p> |
| Turbo à géométrie variable Koenigsegg One : 1 (Koenigsegg) |  <p>Turbo à géométrie variable produit immédiatement, avec pièces mobiles internes haute performance [55]</p> |
| Déploiement de protection en titane ARC pour F1 (T RPD ® LTD, Within Technologies) |  <p>Production de conception extrêmement complexe pour la protection contre un arc électrique approuvée en F1.</p> |

Malgré des projets présentés au préalable et représentant des avancées majeures dans l'application des technologies de FA dans des secteurs d'activités sous contrat sélectionnés pour ce projet, certains facteurs tels que les limites de taille des composants à produire par fabrication additive ont fait obstacle à l'adoption plus large de ces technologies par l'industrie. Les problèmes de matériaux, de précision, de finition de surface et de normes de certification sont d'autres défis qui cherchent à garantir l'adoption généralisée d'une solution de ces technologies par le secteur. La taille et la complexité croissantes des applications futures orientent les recherches vers une amélioration du contrôle des procédés de production, des matériaux et d'inspection pour garantir la sécurité et la traçabilité de composants produits avec pour objectif une utilisation en tant que composant final.

Frazier [56] a présenté certains défis techniques spécifiques de la fabrication additive qui doivent être surmontés pour une utilisation opérationnelle dans l'industrie. La fabrication additive, en particulier dans l'armée de l'air, devient une réalité :

- les effets des variations d'une machine à l'autre doivent être connus et contrôlés,
- des spécifications et des normes industrielles pour le traitement des composants doivent être développées ; pour atteindre cet objectif, Frazier suggère de donner la priorité au développement de procédés intégrés par le biais du développement de technologies visant à contrôler et surveiller les procédés de production ;
- des alternatives aux méthodes de qualification conventionnelles basées sur des modèles validés, des méthodes de probabilité et des pièces standard, entre autres doivent exister ; de nouvelles normes et tests non destructifs (NDT) capables de détecter les effets critiques avec un haut degré de certitude sont nécessaires ;
- de nouvelles directives en matière de conception avec des caractéristiques structurelles innovantes sont requises pour produire des composants optimisés en termes de structure et de poids. La validation de modèles virtuels basés sur les modèles physiques afin de prévoir les caractéristiques de microstructure, et les propriétés mécaniques et électrochimiques est nécessaire ;
- De nouveaux matériaux doivent être développés afin d'optimiser le procédé de production et les propriétés finales des composants.
- Les moyens permettant d'obtenir des propriétés anti usure et de meilleures finitions de surface doivent être développés.

Le réel potentiel de la FA ne peut être atteint que si le procédé de développement d'ingénierie est optimisé et si les avantages de cette nouvelle technologie de fabrication sont adoptés. Cependant, cela signifie également que les projets de composants existants doivent être totalement réexaminés.

Matériaux métalliques actuellement disponibles pour la production additive

La sélection et l'utilisation de certains matériaux est sont d'abord définies par les exigences d'utilisation finale, cependant, elles dépendent également de la technologie additive utilisée.

Les différentes technologies de production additive présentent la plupart des possibilités d'utilisation de matériaux similaires. De cette façon, les superalliages à base de titane et de nickel (par exemple, l'Inconel), les aciers haute résistance et les aciers inoxydables utilisent couramment la production additive. On essaie ainsi de tirer profit de la production additive pour traiter des matériaux onéreux difficiles à usiner en réduisant les coûts de matière utilisée et les délais de production des composants.

Les technologies basées sur le laser, le faisceau d'électrons et le soudage à l'arc au plasma permettent le traitement de la majeure partie des métaux, mais exigent néanmoins des recherches pour comprendre et maîtriser chacun des procédés pour chacun des matériaux disponibles. Ainsi, le secteur se concentre sur les matières dont le traitement par des moyens conventionnels est plus intéressant du point de vue économique. Les procédés de dépôt des matériaux sous forme de poudre présentent un potentiel énorme, car ils peuvent utiliser plusieurs buses pour déposer la matière, ce qui permet de modifier la

composition chimique des matériaux déposés sur la même pièce ainsi que les ratios de dépôt et les précisions différentes, en fonction de la taille et de l'utilisation de la pièce [64].

3.5 Tendances dans le secteur aérospatial

Introduction

Aujourd'hui, la FA représente une révolution dans la conception et dans différents domaines tels que le secteur aérospatial, l'automobile, l'énergie, la médecine, l'outillage et les biens de consommation. Le schéma de la Figure 3-4. FA appliquée aux secteurs industriels majeurs [1] .représente la répartition actuelle des technologies de FA exploitées dans le secteur industriel. Dans le cas du secteur aérospatial, en particulier on observe une tendance croissante au recours à des technologies de FA, qui est passé de 9,9 % à 16,6 % pendant la période s'étendant de 2011 à 2016 [1].

Le secteur aérospatial a adopté précocement la FA, et a commencé à explorer les applications tout de suite après la commercialisation de la technologie. Boeing et Bell Helicopter ont commencé d'utiliser des pièces FA en polymère dans des applications de production non structurelles au milieu des années 90. Boeing a installé des dizaines de milliers de pièces pour le vol, ce qui représente plus de 200 pièces uniques sur 16 avions commerciaux ou militaires différents. La NASA, l'Agence spatiale européenne, SpaceX et d'autres organismes étudient la possibilité d'utiliser la FA pour les allumeurs, les injecteurs et les chambres de combustion sur les moteurs de fusée.

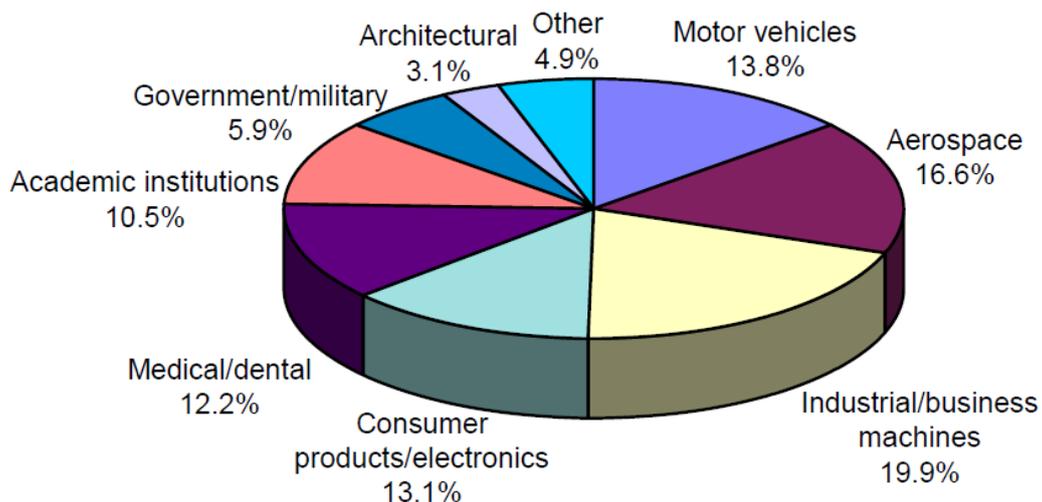


Figure 3-4. FA appliquée aux secteurs industriels majeurs [1] .

En règle générale, le secteur aérospatial est soumis à des exigences strictes : pression constante pour améliorer le rendement énergétique des avions, réduction de la pollution sonore et de l'air et accroissement de la durabilité et du contrôle des émissions. Ces aspects nécessitent que le secteur aérospatial fonctionne de manière efficace, en repoussant les limites des technologies et de la fabrication.

Pour ce faire, la FA est une alternative séduisante pour le secteur, principalement en raison du taux d'utilisation des matériaux et de la possibilité de fabriquer des matériaux de grade aérospace, notamment des alliages de titane et de nickel. En outre, la FA est vue comme une technologie performante en termes de légèreté et d'optimisation topologique, en raison de la liberté de conception et de la possibilité de créer des structures complexes qu'elle procure ; elle peut en outre permettre de bénéficier d'une amélioration des performances et de réduction des déchets. Un autre domaine d'intérêt de l'application FA dans le secteur aérospace : les tests et les conceptions complexes ou difficiles à mettre en œuvre, notamment les tests sur les propulseurs de moteurs complets.

Les domaines d'application de la FA (Fabrication additive) sont étroitement liés à la sélection des matériaux et à la technologie. Certaines des principales applications de la technologie FA sont classées par domaine d'expertise, par exemple le secteur aérospace ou l'industrie automobile, le secteur biomédical, l'architecture, le commerce de détail ou le secteur de la bijouterie.

La réduction du poids et l'augmentation du ratio résistance/poids élevé concernent de nombreux secteurs industriels. Le secteur aérospace est l'un des secteurs dans lesquels le poids est primordial. La production de pièces pour le domaine aérospace devient très chère si l'on utilise des procédés conventionnels, et ce, parce que les opérations génèrent beaucoup de gaspillage. Avec les procédés de FA dans l'industrie aérospace, les pièces peuvent être redessinées pour gagner en légèreté, ce qui se traduit par des coûts de fabrication plus bas. Un poids plus léger pour les pièces de structure a des répercussions sur la réduction de la consommation de carburant.

Les avantages offerts par la FA peuvent être résumés comme suit : réduction de l'utilisation des matières premières, la réduction des ratios buy-to-fly, la liberté par rapport aux contraintes géométriques et réduction de la quantité d'énergie utilisée.

Les applications de FA les plus intéressantes sont des pièces légères et les solutions d'ingénierie. Le principal but de l'industrie aérospace consiste à obtenir des structures de faible poids pour garantir des tests de sécurité système. En outre, des composants hautes performances peuvent être produits grâce à la technologie FA, et avec une large gamme d'alliages : aciers inoxydables, aciers d'outillage, alliages de nickel, de titane Ti64, de cuivre, d'aluminium, etc. Différentes pièces telles que les pales de turbines ou des tuyaux d'admission peuvent être obtenues à la fois par la méthode SLM et la méthode EBM.

De plus, parmi tous les domaines d'application potentiels de la FA, c'est l'industrie automobile qui offre probablement les meilleures opportunités de changement de mode de fabrication. Les contraintes de conception actuellement imposées aux designers automobiles par les limites de conception d'outillage seront supprimées. Le secteur du sport automobile et les constructeurs automobiles classiques peuvent utiliser la technologie FA dans de nombreux produits destinés aux utilisateurs finaux.

En bref, la **FA offre les avantages qui suivent au secteur aérospace** [24]-[26] :

(1) **Réduction des délais : procédé de développement et de mise sur le marché plus court.** La FA permet le prototypage rapide et l'examen et la validation de la conception. La fabrication d'outillage peut être évitée, et il est possible de passer directement aux pièces finies. Pour la production de faibles volumes, tels que les démonstrateurs, la fabrication, la FA réduit ou élimine les frais d'outillage onéreux et à amortissement faible. Convient bien aux aspects de l'ingénierie collaborative et à la recherche et au développement.

(2) **Flexibilité de conception.** Le haut niveau de complexité des pièces, la réduction du poids des composants et l'amélioration et la fiabilité des pièces. La FA offre une conception topologique optimisée et davantage de flexibilité en termes de géométrie. Des composants complexes peuvent être construits. La FA permet également aux concepteurs d'offrir les meilleures performances sans avoir besoin de faire de compromis. En outre, l'industrie aérospatiale a déjà réussi à fabriquer par addition certains composants aérospatiaux avec des géométries complexes dans des matériaux exotiques tels que le titane Ti6Al4V et l'Inconel 718, qui habituellement, sont difficiles à former si l'on ne veut pas compromettre leurs excellentes propriétés.

(3) **Réduction des coûts de production et des coûts d'exploitation.** La plus grande liberté de conception permet de réduire le nombre de sous-composants qui constituent les assemblages système, de sorte que le nombre de composants, la durée d'assemblage et les coûts sont réduits (la FA permet de diminuer l'outillage, le soudage, le nombre de pièces et dans certains cas, l'ensemble des lignes d'assemblage). L'allègement du poids des pièces offre également l'avantage concurrentiel de coûts réduits. D'autre part, concernant les composants spatiaux, les véhicules spatiaux requièrent des pièces minutieusement conçues afin de réduire au maximum le poids et le volume du paquet. Produit en petits volumes, ils sont chers et longs à produire lorsqu'ils sont fabriqués de manière traditionnelle.

(4) **Réduction des impacts négatifs de la production sur l'environnement.** Suite à la réduction du poids des composants aérospatiaux, on s'attend à ce que la consommation de carburant et les émissions de CO₂ soient réduites.

Il convient également de mentionner que l'un des principaux moteurs de la fabrication de composants aérospatiaux **améliore le rapport buy-to-fly des composants métalliques** (avec des valeurs de ratio BTF est compris entre 5 et 20). Le tableau Figure 3-5. Analyse de prix composants par rapport à la vitesse de dépôt de poudre métallique en FA, avec un point « mort » comparé à la fabrication par usinage traditionnel aux ratios buy-to-fly traditionnels [27]. met en évidence les raisons pour lesquelles la FA est une alternative intéressante grâce à l'efficacité d'utilisation du matériau et la possibilité de traiter des alliages de titane et de nickel de niveau aérospatial.

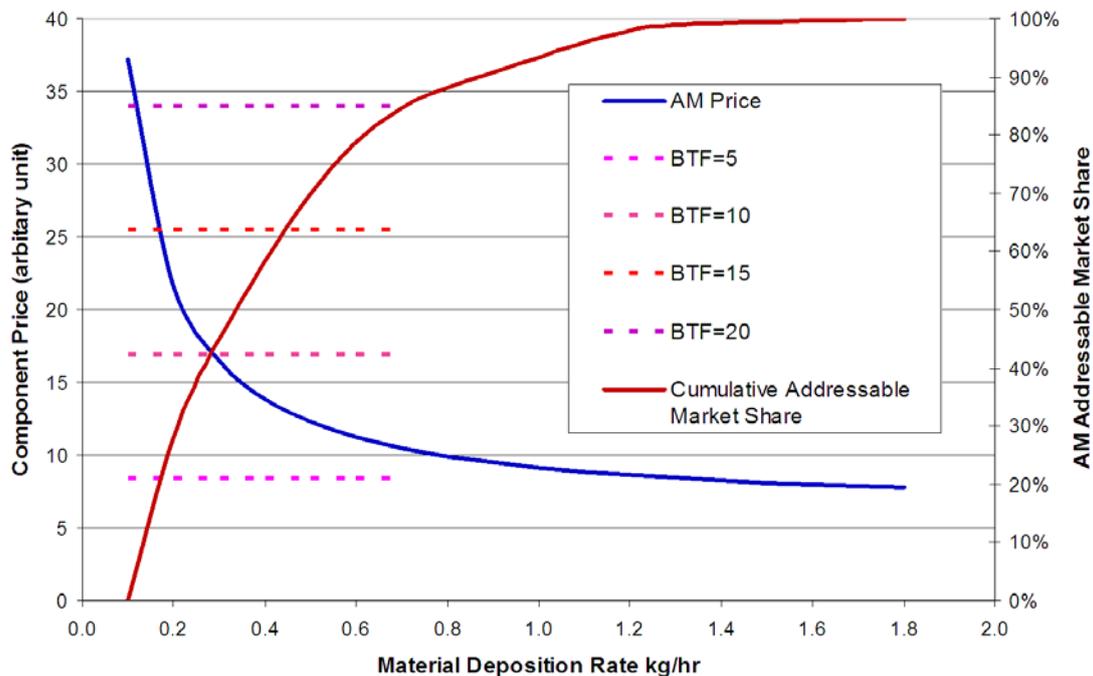


Figure 3-5. Analyse de prix composants par rapport à la vitesse de dépôt de poudre métallique en FA, avec un point « mort » comparé à la fabrication par usinage traditionnel aux ratios buy-to-fly traditionnels [27].

Défis de l'utilisation de la fabrication additive dans le secteur aérospatial

Concernant les principaux défis que pose l'obtention de la *qualité aérospatiale*, il convient de prendre en compte les points suivants :

- **Conception** : les outils de conception actuels ne permettent pas de tirer pleinement avantage de la FA, car certaines fonctions de FA spécifiques sont absentes, la compatibilité avec les machines de FA n'est pas contrôlée et les règles de conception de FA ne sont pas clairement établies. En outre, les concepteurs subissent les contraintes liées aux règles de conception des procédés de fabrication conventionnels.
- **Matière première** : physique (morphologie, fluidité, distribution de taille de particules, humidité...) et propriétés chimiques (niveau d'impureté, contenus interstitiels...) les poudres de FA de *qualité aérospatiale* n'ont pas encore de définition réelle. En outre, il n'existe pas de spécification particulière de manipulation ou de recyclage pour garantir la traçabilité et éviter la contamination des matières premières.
- **Traitement** : aujourd'hui, la robustesse, la répétabilité et la fiabilité du procédé FA ne sont pas totalement garanties, car deux machines du même constructeur peuvent produire des pièces de qualité inégale, le manque de contrôle des traitements et l'impact des paramètres de procédé des machines FA sur la qualité du produit final ne sont pas bien connus.
- **Post traitement** : actuellement, différents traitements post traitement sont appliqués aux pièces FA, qui incluent les traitements thermiques (fours sous vide, haute pression isostatique (HIP),...), traitements de surface (polissage électrochimique, polissage par jet de grenaille) et procédures de nettoyage (décapage à l'air comprimé, sablage). Cependant, la manière dont ces traitements affectent les propriétés finales n'est pas claire.

- **Qualification** : une méthode autre que la méthode classique de *Qualification de niveau de produit* doit être appliquée aux pièces FA, car l'ajout d'échantillons de test n'est pas représentatif de la pièce, il n'existe pas de procédé ou de méthodologie de vérification des pièces et une assurance du produit des pièces FA doit être mise en place.
- **Analyse des défaillances** : les projets aérospatiaux précédents ont permis le développement de pièces FA qui n'ont pas été soumises à des essais dans des conditions de test réelles, ou même dans des conditions normales. Habituellement, le niveau de maturité technologie (NMT) des applications étudiées est inférieur à 4. Donc, le comportement des pièces FA dans des conditions de vol réelles et les sources de défaillance éventuelles restent floues. Les études seront réalisées après l'inspection de pièces FA défaillantes et le remplacement des pièces abîmées.
- **Conception pour élimination** : dans le cas de composants spatiaux, ce concept implique que le matériel d'un système allant dans l'espace est conçu de façon à brûler totalement (ou à se désintégrer) en cas de retour non contrôlé dans l'atmosphère, ce qui constitue un moyen d'éliminer la pièce après la mission. Cela est requis en particulier en cas de rentrée non contrôlée. Ce concept implique de remplacer des matériaux dont le point de fusion est élevé comme le titane ou l'acier inoxydable par des alliages d'aluminium haute résistance (séries 7XXXX, alliages Al-Li).

Dans ce cadre, les activités de recherche européennes sont actuellement centrées sur l'étude des effets de la matière première, les paramètres de procédés de FA et les traitements appliqués aux propriétés obtenues pour les pièces aérospatiales obtenues. En outre, un autre objectif important consiste à définir un procédé et des procédures de qualification de fournisseurs et des normes de fabrication applicables aux pièces aérospatiales issues de la FA.

Tendances du secteur aérospatial en matière de Fabrication additive

Les tendances actuelles dans le secteur aérospatial sont centrées sur les nouvelles stratégies visant à réduire le poids des composants destinés au secteur aérospatial, et notamment la conception topologique et les structures bioniques et réticulaires cellulaires [23].

Les concepts des structures bioniques et cellulaires sont motivés par le désir de mettre de la matière uniquement où elle est nécessaire pour une application spécifique. D'un point de vue de l'ingénierie, l'un des avantages clés offerts par ce type de matériau est une résistance élevée et une masse plutôt faible. Ces matériaux peuvent offrir de bonnes caractéristiques d'absorption d'énergie et de bonnes propriétés d'isolation thermique et acoustique également. Les structures cellulaires conçues affichent généralement des structures plus résistantes par unité de poids que les structures en mousse classiques. Cependant, en raison de leur complexité, elles sont difficiles à générer avec les logiciels de CAO. En outre, les techniques de fabrication additive métallique, notamment le procédé de fusion laser sélective PBF qui a l'avantage de présenter de bonnes capacités de fabrication pour les structures métalliques réticulaires et légères sont toujours confrontées aux limitations de procédés en termes de capacité géométrique et d'exigence en structures de support [27]-[29].

Un exemple de développement de conception optimisée est inclus dans la Figure 3-6. Application pour l'espace développée par CATEC et AIRGUS D&S (A) Assemblage de l'adaptateur de charge utile (ACU) du lanceur VEGA, (b) Support de connecteur original, (c) Support optimisé : i. fabrication ponctuelle (assemblage intégré), ii. Optimisation conventionnelle et iii. conception bionique qui représente le support du connecteur de l'adaptateur de charge utile du lanceur spatial VEGA (appartenant à l'ESA) fabriquée par CATEC (Espagne). Le procédé d'évolution implique le remplacement du composant en 4 pièces d'origine par une géométrie intégrée, suivi par une optimisation traditionnelle et une conception bionique de la géométrie du composant.

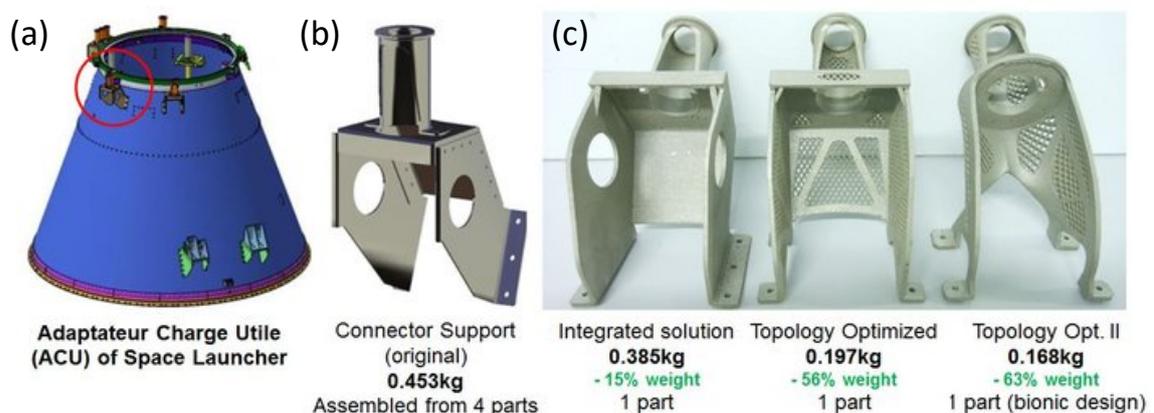


Figure 3-6. Application pour l'espace développée par CATEC et AIRGUS D&S (A) Assemblage de l'adaptateur de charge utile (ACU) du lanceur VEGA, (b) Support de connecteur original, (c) Support optimisé : i. fabrication ponctuelle (assemblage intégré), ii. Optimisation conventionnelle et iii. conception bionique

La Figure 3-7. Application spatiale développée par CATEC et AIRBUS D&S (a) support d'origine d'Hipparcos, (b) Support de topologie optimisé produit par SLM.représente un composant aérospatial incluant une optimisation de topologie. Vous y trouverez une pièce du satellite Hipparcos (appartenant au). La fixation du support est une des composantes de la structure de support des déflecteurs du télescope et fait partie de la charge utile qui protège ce dernier contre la diffusion de la lumière.

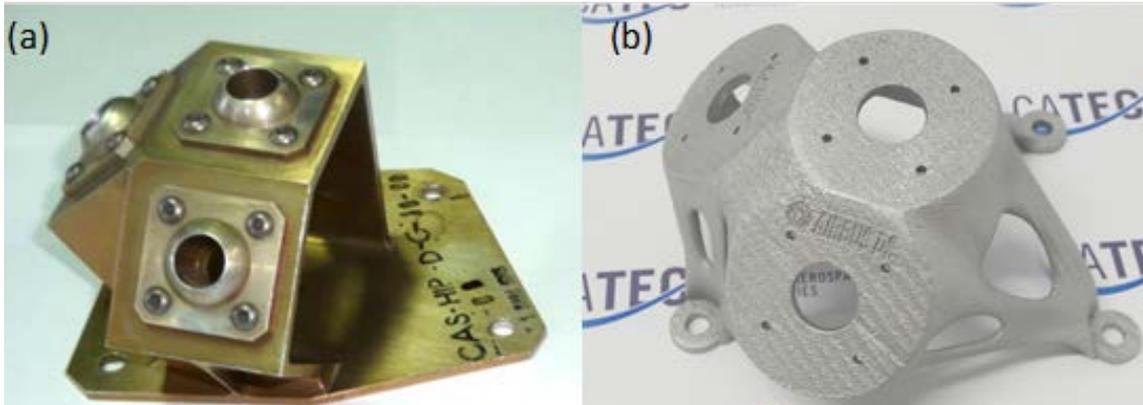


Figure 3-7. Application spatiale développée par CATEC et AIRBUS D&S (a) support d'origine d'Hipparcos, (b) Support de topologie optimisé produit par SLM.

D'autre part, vous pouvez voir un exemple d'aile bionique dans la Figure 3-8. Aileron d'avion bionique développé par Airbus. L'aspect est inspiré de celui du nénuphar [30].. Pour les structures bioniques, la stratégie de conception est basée sur des exemples naturels, et on recherche suffisamment de rigidité avec un composant le plus léger possible [30] [31].

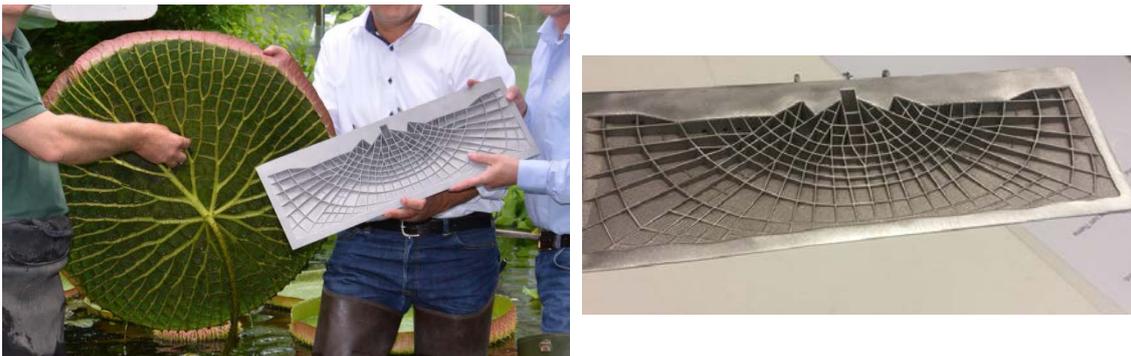


Figure 3-8. Aileron d'avion bionique développé par Airbus. L'aspect est inspiré de celui du nénuphar [30].

Le composant de cabine d'avion imprimé en 3D le plus grand du monde développé par Autodesk et Airbus est également remarquable : une « cloison bionique » sert à séparer la cabine passager de la cuisine. Cette conception innovante imite une structure cellulaire organique et le développement d'un os dans des organismes vivants (voir Figure 3-9. La « cloison bionique » d'Airbus a été présentée à l'Université Autodesk [30].). Le résultat du projet crée des attentes : une cloison à la structure très performante, mais également très légère, pesant 45 % (30 kg) de moins que les articles habituels. Cela fait de cette cloison bionique un développement d'avant-garde pour un secteur dans lequel un poids plus faible permet de réaliser des économies de carburant. Lorsqu'elle est appliquée à

l'ensemble de la cabine et à l'arrière des avions A320, Airbus estime que cette nouvelle approche permettrait de relâcher jusqu'à 465 000 tonnes de CO₂ de moins dans l'atmosphère chaque année.



Figure 3-9. La « cloison bionique » d'Airbus a été présentée à l'Université Autodesk [30].

Une autre tendance remarquable de la personnalisation de masse des constructions légères dans cette industrie est fondée sur la combinaison de technologie FA avec une technologie d'enlèvement de matière, ce qui permet à chaque procédé de fonctionner avec l'autre sur la même machine, voire sur la même pièce [23], [32], [33]. La Fabrication hybride réduit les coûts et les frais associés à l'adoption de technologie FA métallique ce qui offre aux constructeurs industriels une évolution à la fois pragmatique et révolutionnaire. Bien qu'il s'agisse d'une tendance générale dans différents secteurs, elle est particulièrement utile dans le secteur aérospatial en raison du gain de poids qu'elle représente.

Enfin, concernant l'industrie aérospatiale, il faut remarquer la ligne de recherche suivie par le Centre de mise en forme de l'école de métallurgie et des matériaux de l'Université de Birmingham (Projet PhotAM financé par l'ESA) [34]. Actuellement, si un composant (support ou charnière) se casse dans l'espace, la réparation du problème peut s'avérer problématique, coûteuse et potentiellement dangereuse. Avec la station spatiale internationale (SSI), les pièces de rechange peuvent être envoyées depuis la Terre. Cependant, au fur et à mesure que l'exploration de l'espace s'élargit, il est de moins en moins possible d'envoyer des pièces depuis la base. Le développement de l'impression 3D dans l'espace permettra aux astronautes de résoudre le problème en fabriquant de façon efficace des pièces de remplacement, et la recherche actuelle pourrait faire en sorte que l'équipement soit fabriqué directement dans l'espace.

Exemples de composants aérospatiaux réalisés par Fabrication additive.

Actuellement, le marché aérospatial utilise la FA de différentes façons, de nombreux exemples de composants de niche étant fabriqués et fournis via des formes de FA différentes (à la fois avec des polymères ou des métaux). L'application de la FA pour le

secteur aérospatial s'utilise dans le prototypage, le moulage et l'outillage, la fabrication de pièces détachées, la réparation de composants existants et également la fabrication d'une pièce en totalité [35].

La FA a largement été utilisée lors des premières phases de développement des structures, en d'autres termes, dans le **prototypage** et la production de maquettes 3D physiques (certains exemples figurent dans la Figure 3-10. (a) Modèle de concept d'hélicoptère, (b) pièce de « maquette » d'évacuation de gaz [36].et la Figure 3-11. Prototype fabriqué par SICNOVA.). Le prototypage permet de fournir des spécifications pour un système fonctionnant concrètement plutôt qu'en théorie. La vérification de modèle CAO, les aides visuelles, les modèles de présentation, la mise à l'échelle, etc. sont souvent utilisés dans le prototypage 3D. Les « maquettes » physiques 3D ; terme utilisé pour la première fois dans l'industrie aéronautique, sont utilisées pour le test final des différents aspects des pièces.

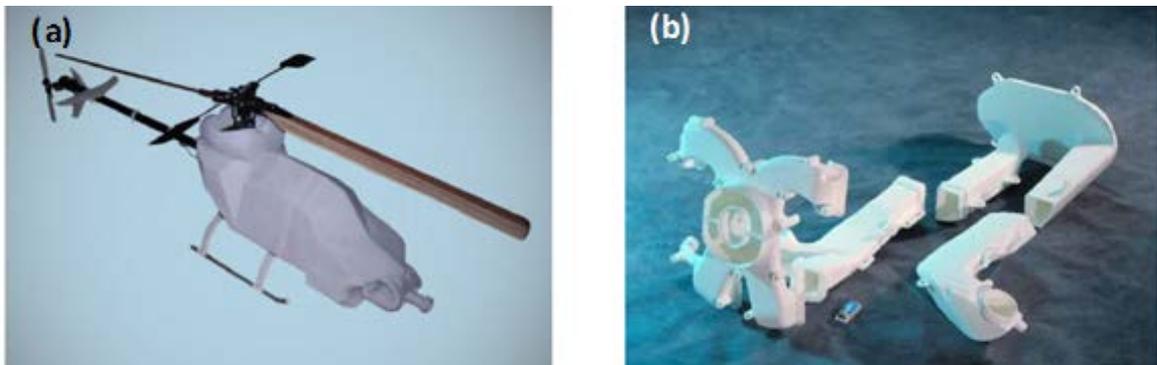


Figure 3-10. (a) Modèle de concept d'hélicoptère, (b) pièce de « maquette » d'évacuation de gaz [36].

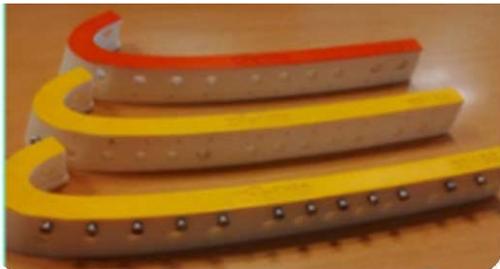


Figure 3-11. Prototype fabriqué par SICNOVA.

Concernant le **moulage et/ou l'outillage** pour le secteur aérospatial, il existe une grande



variété de composants. Certains exemples figurent dans



12.

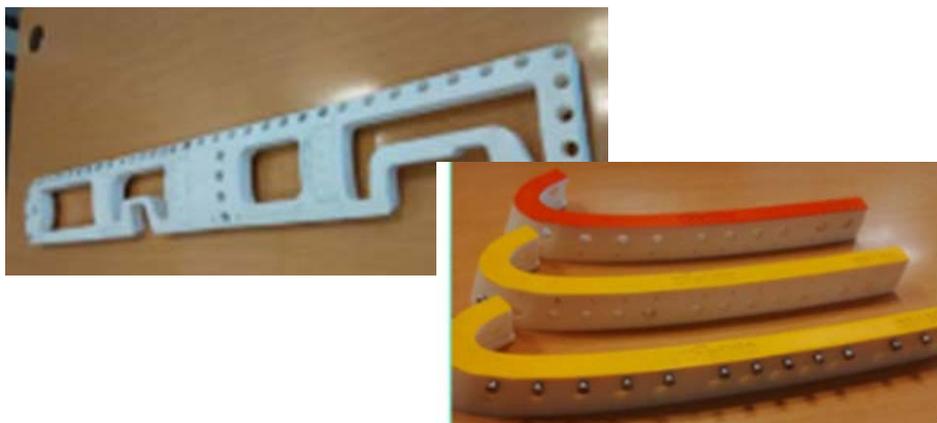


Figure 3-12. Quelques exemples de pièces industrielles pour le moulage ou l'outillage de l'aéronautique fournies par AERNNNOVA.

Dans le domaine de la **réparation et la fabrication de pièces détachées**, les technologies de Fabrication additive se sont révélées particulièrement flexibles. Les pièces détachées peuvent être fabriquées *sur ordre*, pour éviter le stockage. La FA permet également de fabriquer les pièces détachées exactement à l'endroit où elles sont nécessaires. D'autre

part, lorsqu'il s'agit de réparations, la FA peut servir à réparer les pièces endommagées en ajoutant de la matière uniquement aux endroits où elle est nécessaire. Il faut aussi remarquer la faculté qu'a la FA de rendre fonctionnelle une pièce existante en lui ajoutant de nouvelles fonctionnalités. La réparation par FA permet de réduire de façon drastique des coûts et des délais de production.

Concernant les **pièces finales**, la FA est utilisée dans la fabrication de pales de turbine, de pièces de structure pour les drones, les intérieurs personnalisés pour les avions privés, pour les hélicoptères privés, les tourbillons ou les injecteurs de carburant de Morris Technologies, les dégivreurs de pare-brise fabriqués par AdvaTech, etc. Certains exemples sont inclus dans la Figure 3-13. (A) Buse de mélange pour échappement de turbine à gaz produite par DED-LENS par Optomec, (b) boîtier de support de compresseur produit par PBF-EBM par Arcam, (c) pale de turbine produite par PBF-SLM par Concept Laser, (d) pales de turbine fabriquées par PBF-SLM par Morris Technologies. De nos jours, les technologies FA peuvent être appliquées à la fabrication de composants aérospatiaux avec un haut niveau de complexité géométrique tout en respectant des propriétés aérodynamiques précises.

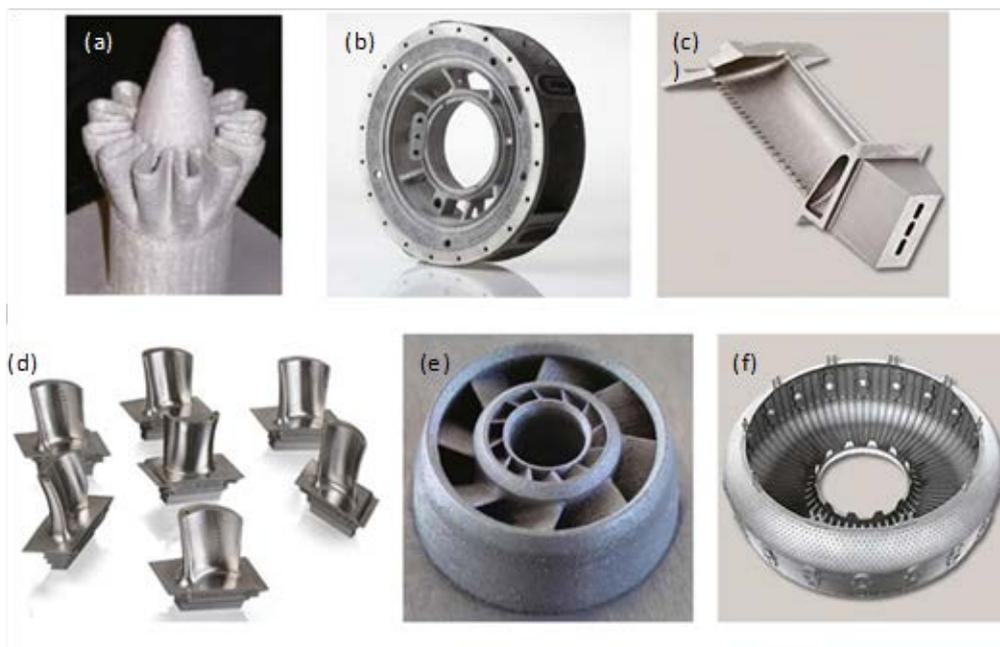


Figure 3-13. (A) Buse de mélange pour échappement de turbine à gaz produite par DED-LENS par Optomec, (b) boîtier de support de compresseur produit par PBF-EBM par Arcam, (c) pale de turbine produite par PBF-SLM par Concept Laser, (d) pales de turbine fabriquées par PBF-SLM par Morris Technologies

Quant à l'**application spatiale**, plusieurs simulateurs de vol ont été revisités et fabriqués grâce à des technologies de FA, et notamment des injecteurs, des propulseurs monobloc, des chambres de combustion, des buses, entre autres. Ainsi, le Groupe AIRBUS a récemment développé un support pour système de contrôle d'attitude FLPP en titane Ti-6Al-4V pour Ariane5ME et 6 lanceurs représentant une économie de poids de plus de 30 %. Le groupe RUAG a également développé un support allégé de 42 % pour le satellite Sentinel1. Un consortium dirigé par DMRC a développé un support de roue de réaction en AlSi10Mg au poids 56 % moins élevé et un concept révolutionnaire pour le projet Artes5.1.

ESA, TESAT et ILT ont collaboré pour utiliser la FA dans du matériel à fréquence radio tels que les harnais des guides d'ondes, les filtres et les antennes. Tous ces projets ont prouvé les possibilités que les technologies de la FA représentent dans les structures secondaires et les pièces non essentielles. Concernant le développement de structures secondaires, dans la Figure 3-14 contient différentes étapes du développement d'une pièce destinée au satellite EUROSTAR3000 fabriquée par Airbus D&S. Un support de télémétrie en aluminium a été optimisé du point de vue topologique pour obtenir au final une réduction de 35 % de sa masse.

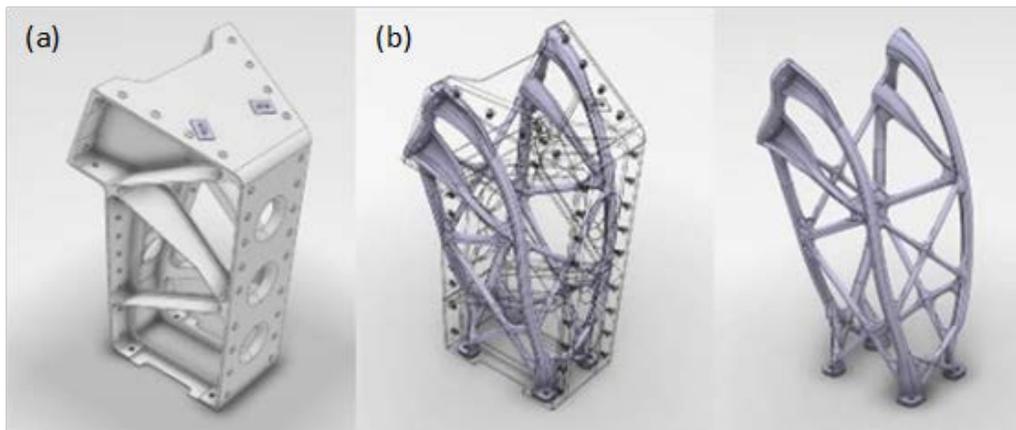


Figure 3-14. Support de télémétrie en aluminium, application spatiale développée par AIRBUS D&S : (A) version originale ; (b) vue du composant optimisé.

Concernant le développement de structures primaires dans les applications pour le lancement spatial et les sondes, le travail de CATEC (Espagne) en association avec AIRBUS D&S (Space Systems, Madrid) a été mis en évidence. Certains développements de CATEC-Airbus D&S en cours sont inclus dans la Figure 3-15. Développement de structure principale d'ARIANE5, par CATEC et AIRBUS D&S : (a) Vu du LPSS et du lanceur d'ARIANE5 (la bande est assemblée par le biais de l'adaptateur de charge utile (ACU)), (b) Composants FA fabriqués par SLM, (c) Assemblage système, test fonctionnel (up).



Figure 3-15. Développement de structure principale d'ARIANE5, par CATEC et AIRBUS D&S : (a) Vu du LPSS et du lanceur d'ARIANE5 (la bande est assemblée par le biais de l'adaptateur de charge utile (ACU)), (b) Composants FA fabriqués par SLM, (c) Assemblage système, test fonctionnel (up)

Dans ce sens, les efforts d'Airbus et de GE sur les développements de FA doivent être soulignés. Dans le cas d'Airbus, le Rapport de Wohlers de 2016 mentionne ce qui suit : « Airbus, peut-être plus que les autres équipementiers Airbus dans le futur d'intégrer la FA à ses procédés de production. Toutes sortes de projets de recherches ont été menés sur des pièces métalliques et polymères fabriquées à l'aide de FA, que ce soit pour des réparations ou de l'outillage. Un travail considérable a été réalisé pour la conception et la production de pièces pour ses avions. La société a également travaillé à la mise au point de méthodes d'optimisation avancées visant à réduire la quantité de matériau utilisée et le poids des conceptions, réduction pouvant atteindre plus de 50 % » D'autre part, GE Aviation produit des pièces finales en métal avec par FA pour son moteur LEAP. D'ici à 2020, la société devrait fabriquer par FA plus de 100 000 pièces pour LEAP et d'autres moteurs d'avions [1].

3.6 Principaux intervenants du secteur de la FA dans l'espace SUDOE

Le tableau 3.3 ci-dessous répertorie la plupart des capacités de l'espace SUDOE en matière de technologies de fabrication additive métallique, des centres de recherches, les fabricants, et les vendeurs à valeur ajoutée.

Tableau 3-2. Liste des principaux acteurs de fabrication additive métallique

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|---------------------|---|---|---------|---|
| ACITURRI | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Fournisseurs de premier rang d'assemblages structurels pour avions et fournisseur de deuxième rang de composants pour moteurs | ESPAGNE | www.aciturri.com |
| AD Industrie | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | AD INDUSTRIE est un groupe industriel spécialisé dans l'ingénierie mécanique et hydraulique. Étude, assemblage et test d'équipement. Industrialisation et production de pièces complexes, de matériaux métalliques et composites, d'engrenages et de transmissions, EDM, traitements thermiques, soudage, liaison, revêtement au plasma, inspection des particules magnétiques, inspection des pénétrants de colorants, contrôle par radio et ultrasons). | FRANCE | http://www.adgroup.e.com/ |
| AIRBUS | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Constructeur aéronautique européen | FRANCE | http://www.airbus.com/fr/ |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|---------------------------------------|---|---|---------|---|
| Lanceurs SAFRAN AIRBUS | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Développement et production des véhicules de lancement d'Ariane 5 et Ariane 6. R&D pour les programmes de lanceur européens futurs. Responsable du système de missile balistique de la force de dissuasion française : développement, production et services de maintenance des différents composants. | FRANCE | https://www.airbusafrancais.com/launchers.com/fr |
| AKKA Technologies | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Groupe d'ingénierie technologique et de conseil | FRANCE | https://www.akka-technologies.com/fr |
| ALESTIS | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | ALESTIS Aerospace, leader dans les fibres de carbone et les technologies composites. Responsabilité de la conception, de développement, certification, fabrication et support d'aérostructures en fibre de carbone complexes Impliqué dans des programmes MAM | ESPAGNE | www.alestis.aero |
| ASSYSTEM France | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Ingénierie et conseil en innovation | FRANCE | http://www.assystem.com/ |
| ATR | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Fabrication de turbopropulseurs | FRANCE | http://www.ATRaircraft.com/ |
| DASSAULT Aviation | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Conception, production, fabrication et assistance pour avions civils et militaires. | FRANCE | http://www.dassault-aviation.com/fr/ |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|---------------------------|---|--|---------|---|
| FIGEAC AERO | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Fournisseur de premier rang des fabricants majeurs de pièces aérospatiales, de mécanismes pour l'aéronautique (usinage et assemblage), de pièces structurelles, de pièces de moteur, de pièces de précision. | FRANCE | http://www.figeac-aero.com/ |
| Fusia | Constructeur aérospatial/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Fabrication de pièces de précision pour l'aéronautique, l'espace, la défense | FRANCE | https://www.fusia.fr/ |
| ITP | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | ITP est actuellement la neuvième société de moteurs d'avion et de composants du monde en termes de recettes. | ESPAGNE | http://www.itp.es |
| LATECOERE | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Acteur majeur du secteur aérospatial le groupe Latécoère intervient dans le domaine des aérostructures et des systèmes d'interconnexion et pendant les phases de définition, d'industrialisation, de fabrication et d'installation. Le groupe exerce également des activités d'assistance produit (réparation, pièces détachées, etc.) | FRANCE | http://www.latécoere-group.com/ |
| Prismadd | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Fondée en octobre 2014 à Montauban, la société PRISMAAD s'adresse à des secteurs industriels techniques très pointus, tels que l'armement, l'aéronautique et le nucléaire | FRANCE | http://prismadd.com/ |
| Rochette Industrie | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Métaux - Finition, traitements thermiques, traitements de surface. Revêtements par procédés physiques. Usinage de métaux, fabrication d'assemblages mécaniques. Fraisage, tournage. Traitement de plastiques et usinage de traitement secondaire | FRANCE | http://www.mecanicsud.fr/ |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|--------------------------------------|---|---|----------|---|
| Groupe SAFRAN | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | SAFRAN est un groupe international de haute technologie, un équipementier leader intervenant dans les domaines de l'espace, de la défense et de la sécurité | FRANCE | https://www.safran-group.com/fr/groupe |
| MOTEURS d'hélicoptères SAFRAN | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Conception, fabrication, ventes et assistance de turbines d'hélicoptère. | FRANCE | https://www.safran-group.com/fr/societe/safran-helicopter-engines |
| AEROSOFT France | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Spécialisée dans les systèmes et les ingénieries des structures et configuration de cabine | FRANCE | http://www.aerosoft.it/ |
| CAETANO Aeronautic | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Conçoit, produit et fabrique des pièces pour les avions civils et militaires. | PORTUGAL | http://www.caetanoaeronautic.pt |
| ELEMCA | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Laboratoire de test, d'analyses et d'expertise indépendante CND + Métallurgie | FRANCE | https://elemca.com/ |
| LAUAK Portuguesa | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Conçoit, produit et fabrique des pièces pour les avions civils et militaires. | PORTUGAL | http://www.groupe-lauak.com/ |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|-------------------------------|---|---|----------|---|
| SOGECLAIR Aerospace | Compagnie aérospatiale/ Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | SOGECLAIR est responsable de projets de grande envergure concernant des études et le codéveloppement pour les grands comptes industriels, et développe des solutions de simulation et de réalité virtuelle innovantes. | FRANCE | http://sogeclair.com/fr/ |
| AIRGRUP | Constructeur aérospatial/intégrateur | AIRGRUP est une société industrielle engagée dans la fabrication de systèmes de pipeline pour l'aéronautique. Impliqué dans différents programmes MAM | ESPAGNE | www.airgrup.com |
| Egile Corporation | Constructeur aérospatial/Équipementier de premier rang du secteur aérospatial | Il s'agit d'une Corporation regroupant des entrepreneurs en technologie qui développe des produits à forte valeur ajoutée, des services et des solutions pour ses Clients, et avec des compétences essentielles en mécanique de haute précision. Dans le secteur aéronautique, Egile développe des procédés dans de nouvelles cellules de travail spécifiques adaptées à la fabrication additive en tant qu'engagement stratégique pour le futur. | ESPAGNE | www.egile.es |
| EMBRAER | Intégrateur aérospatial | Conçoit, produit et fabrique des pièces pour les avions civils et militaires. | PORTUGAL | www.embraer.com |
| STELIA (Groupe Airbus) | Intégrateur aérospatial | STELIA Aerospace offre des solutions globales pour les fabricants aéronautiques et les lignes aériennes. | FRANCE | http://www.stelia-aerospace.com/ |
| 2MA Tech | Consultation | 2MAtech est une société d'ingénierie et d'expertise qui intervient dans les domaines de la mécanique et des matériaux avancés. | FRANCE | http://www.2matech.fr/ |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|---|---|--|----------|---|
| 3R | Fournisseur d'équipement MAM et de solutions | Concepteur et fabricant de machines de test servant à caractériser des matériaux et des structures. | FRANCE | http://www.3r-labo.com/fr/ |
| ADDILAN | Fournisseur d'équipement et de solutions MAM | ADDILAN est une nouvelle société de fabrication de machines fondée à la fin de 2016, qui s'engage dans la fabrication des pièces de moyennes et grandes dimensions grâce à la technologie WAAM | ESPAGNE | www.addilan.com |
| ADIRA – Solutions de formage de métaux | Fournisseur d'équipements et de solutions MAM | Fournisseur d'équipements et de solutions, Fabricant d'équipement de découpe de matériaux basés sur les technologies laser. Fabricant d'imprimantes 3D métalliques à grande échelle, combinant la fusion sur lit de poudre et le dépôt de métal et de fusion. ADIRA est équipé de la plus grande zone de traitement de poudre métallique et d'un système qui permet la fabrication sous le volume de la chambre. | PORTUGAL | http://www.adira.pt |
| CODI | Fournisseur d'équipements et de solutions MAM | Fournisseur d'équipement et de solutions. Ingénierie et développement de produit. Fabrication additive de pièces polymères. | PORTUGAL | http://codi.pt/ |
| IBARMIA | Fournisseur d'équipement et de solutions MAM | Avec plus de 60 ans d'expérience dans le secteur des machines-outils, la société a développé un modèle de centre d'usinage ZVH ADD + PROCÉDÉ qui combine la fabrication additive avec usinage. | ESPAGNE | www.ibarmia.com |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|-----|------|----------------------|------|----------|
|-----|------|----------------------|------|----------|

| | | | | |
|------------------------------------|---|--|-------------|---|
| KALLISTO | Fournisseur d'équipement et de solutions MAM | Société spécialisée dans la commercialisation, l'intégration, la mise en œuvre de systèmes et services de conception, l'analyse et fabrication rapide de ces technologies. Large gamme de prototypage 3D et de machines de fabrication rapide. | FRANCE | http://www.kallisto.net/ |
| METALLIE D Powder Solutions | Fournisseur d'équipements et de solutions MAM | Producteur de poudre métallique pour les marchés de la fabrication additive | ESPAGNE | www.erasteel.com |
| Micronorma | Fournisseur d'équipements et de solutions MAM | Machines de métallurgie sur mesure. Conception de produit. Il existe actuellement un projet visant à développer des procédés basés sur la fabrication additive par laser. | PORTUGAL | http://www.micronorma.pt/ |
| PROCURT | Fournisseur d'équipement et de solutions MAM | Fabricant et fournisseurs d'outils de découpe au carbure connu pour ses outils de découpe de précision sur mesure. | PORTUGAL | www.procurt.pt |
| Zayer | Fournisseur d'équipements et de solutions MAM | Avec plus de 60 ans d'expérience dans la fabrication de machines de fraisage et de centres d'usinage, cette société mène des recherches dans différentes machines avec configuration hybride combinant technologies additives et technologies d'enlèvement de matière. | ESPAGNE | www.zayer.es |
| ADDIMEN | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Concentre son activité sur la conception et la fabrication de composants métalliques fonctionnels. | ESPAGNE | www.addimen.com |
| BBE | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Développement de produit, analyse et conception, Ingénierie assistée par ordinateur, Conception et révision de produits, moules de fabrication de prototypes, frittage métallique et plastique. | PORTUGAL | http://www.bbe.pt/pt/ |
| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |

| | | | | |
|------------------------------|--|--|----------|---|
| DIMLASER | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Fabrication additive de pièces métalliques. Fournisseur de solutions | PORTUGAL | http://www.dimlaser.com |
| DURIT | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Produit des composants matériels en métal basé sur la métallurgie des poudres | PORTUGAL | http://www.durit.com/pt/ |
| EDAETECH | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Développement, essai et fabrication de prototypes et production de composant en métal en petites séries, en particulier pour l'industrie automobile. | PORTUGAL | http://www.edaetech.pt/ |
| GNC LASER | Opérateur MAM ou fabricant de composants | GNC Laser offre des services de trempage, de soudage et de fabrication additive utilisant la technologie laser. | ESPAGNE | www.gnclaser.es |
| Groupe IBEROMOLDES | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Fournisseurs d'ingénierie et de solutions. Phases de support de conception et de développement de produits incluant des technologies de prototypage et des solutions de fabrication rapides pour une large gamme d'applications utilisant un large éventail de matériaux. | PORTUGAL | http://www.iberomolde.com.pt/ |
| I3D CONCEPT | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Gestion de projets MAM : Traitement de fichiers numériques, fabrication de pièces (prototypes et séries), post-traitement et caractérisation | FRANCE | http://www.i3dconcept.fr/ |
| INDRAERO / Ebas Group | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Conception, fabrication et assemblages d'accessoires du secteur aérospatial. A une grande expérience des matériaux plastiques, métalliques, textiles, en mousse et en caoutchouc. Les fonctionnalités des technologies MAM sont basées sur le revêtement (DED Dépôt de matière sous flux dirigé) | ESPAGNE | http://ebasgroup.com/ |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|-----|------|----------------------|------|----------|
|-----|------|----------------------|------|----------|

| | | | | |
|-------------------------------------|--|---|----------|---|
| MIZAR | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Mizar offre un service spécialisé dans la conception et la production de tous les types de composants personnalisés. | ESPAGNE | www.mizaradditive.com |
| GNC LASER | Opérateur MAM ou fabricant de composants | GNC Laser offre des services de trempage, de soudage et de fabrication additive utilisant la technologie laser. | ESPAGNE | www.gnclaser.es |
| I3D CONCEPT | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Gestion de projets MAM : Traitement de fichiers numériques, fabrication de pièces (prototypes et séries), post-traitement et caractérisation | FRANCE | http://www.i3dconcept.fr/ |
| Groupe IBEROMOLDES | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Fournisseurs d'ingénierie et de solutions. Phases de support de conception et de développement de produits incluant des technologies de prototypage et des solutions de fabrication rapides pour une large gamme d'applications utilisant un large éventail de matériaux. | PORTUGAL | http://www.iberomolde.pt/ |
| INDRAERO / Ebas Group | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Conception, fabrication et assemblages d'accessoires pour secteur aérospatial. A une grande expérience des matériaux plastiques, métalliques, textiles, en mousse et en caoutchouc. Les fonctionnalités des technologies MAM sont basées sur les techniques de revêtement (DED Dépôt de matière sous flux dirigé) | ESPAGNE | http://ebasgroup.com/ |
| MIZAR | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Mizar offre un service spécialisé dans la conception et la production de tous types de composants personnalisés. | ESPAGNE | www.mizaradditive.com |
| MIZAR Additive Manufacturing | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Société spécialisée dans la conception et la production de toutes sortes de composants personnalisés. Secteurs aérospatial, médical ou industriel en général | FRANCE | http://mizaradditive.com/fr/ |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|-----|------|----------------------|------|----------|
|-----|------|----------------------|------|----------|

| | | | | |
|---|---|---|----------|---|
| VEROT | Opérateur MAM ou fabricant de composants | VEROT, S.A. Offre des services de transformation de métaux, et d'impression 2D par fabrication additive métallique. | ESPAGNE | www.verot.com |
| LISI Additive Manufacturing LISI | Opérateur MAM ou fabricant de composants | Composants et attaches pour l'assemblage dans les industries aéronautiques | FRANCE | https://www.lisi-group.com/ |
| PAMI | Organismes publics, programmes et initiatives relatifs au MAM & Aerospace | Initiative de fabrication additive portugaise | PORTUGAL | www.pami.pt |
| TOYAL Europe | Poudre de matière première | Leader dans la fabrication des pigments d'aluminium avancés et de poudre atomisée | FRANCE | http://toyaleurope.com |
| AIMEN | Recherche et développement | AIMEN est spécialisé dans les technologies Laser (découpe, traitement de surface, revêtement et fabrication additive) | ESPAGNE | www.aimen.es |
| CATEC | Recherche et développement | Centre technologique travaillant sur le développement des technologies de fabrication additive depuis 2004; avec des résultats remarquables dans les secteurs aéronautique et spatial, fournissant des solutions basées sur les fonctionnalités de Fabrication additive basée sur les métaux. | ESPAGNE | www.catec.aero |
| CATIM | Recherche et développement | Centre de recherche pour la métallurgie qui offre des services de fourniture de tests, de contrôle qualité et de métrologie. CATIM crée un projet pour informer ses membres des opportunités qu'offre la fabrication additive métallique. | PORTUGAL | http://www.catim.eu/en/ |

| | | | | |
|--------------------|----------------------------|--|----------|---|
| CDRSP - IPL | Recherche et développement | Centre de recherche de l'école d'ingénieurs de l'institut polytechnique de Leiria, centré sur les applications de technologies de prototypage rapide et de technologies Additive | PORTUGAL | http://cdrsp.ipleiria.pt/ |
| CEA CESTA | Recherche et développement | Le Centre des études scientifiques et technique d'Aquitaine (CESTA) a pour première mission de garantir l'architecture industrielle des armes des forces de dissuasion. | FRANCE | http://www.cea.fr/ |
| CEIIA | Recherche et développement | Centre d'ingénierie axé sur les solutions de mobilité de pointe. Production de composants et de produits pour les secteurs automobile et aéronautique, notamment pour la fabrication additive de pièces en polymère pour des solutions de mobilité de pointe. | PORTUGAL | https://www.ceiia.com/ |
| CENTIMFE | Recherche et développement | CENTIMFE est un organisme public à but non lucratif qui développe des activités compétitives pour préparer la reprise industrielle. Développement de projets faisant appel à des technologies de fabrication additive. | PORTUGAL | http://www.centimfe.com |
| CIRIMAT INP | Recherche et développement | Interuniversity Centre of Research & Engineering of materials (Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux). | FRANCE | http://www.cirimat.cnrs.fr/ |
| CNES | Recherche et développement | Le CNES, organisme public à caractère industriel et commercial, (EPIC), propose à l'administration française une politique de l'espace et la met en œuvre dans cinq domaines stratégiques : Ariane, les sciences, l'observation, les télécommunications et la défense. | France | https://cnes.fr/fr |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|-----|------|----------------------|------|----------|
|-----|------|----------------------|------|----------|

| | | | | |
|----------------------|----------------------------|---|----------|---|
| ESTIA | Recherche et développement | Développement d'une plateforme pour MAM : ADDIMADOUR. Machine LMD/P, CMT, Robotique, matériaux composites, etc. | FRANCE | http://www.estia.fr |
| IK4-CEIT | Recherche et développement | CEIT est un centre technologique privé ayant développé une expertise dans l'atomisation des poudres et les traitements thermiques (HIP). | ESPAGNE | www.ceit.es |
| IK4-CIDETEC | Recherche et développement | CIDETEC est un centre de recherche privé ayant une expertise dans les traitements mécaniques. | ESPAGNE | www.cidetec.es |
| IK4-IDEKO | Recherche et développement | IDEKO est un centre de recherche privé spécialisé dans le LMD. | ESPAGNE | www.ideko.es |
| IK4-LORTEK | Recherche et développement | LORTEK est un centre technologique privé ayant développé une expertise étendue dans différentes technologies de fabrication additive métallique (SLM, LMD, WAAM) et différents tests non destructifs (NDT). | ESPAGNE | www.lortek.es |
| IK4-TEKNIKER | Recherche et développement | TEKNIKER est un centre de recherche privé avec une expertise dans le LMD, le NDT et la surveillance. | ESPAGNE | www.tekniker.es |
| IK4-VICOMTECH | Recherche et développement | VICOMTECH est un centre de technologie privé avec des compétences en logiciel de conception et solutions d'intelligence artificielle. | ESPAGNE | www.vicomtech.org |
| INEGI | Recherche et développement | Institut des sciences et de l'innovation dans l'ingénierie industrielle et mécanique reliant l'Université et l'industrie. | PORTUGAL | http://www.inegi.up.pt/ |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|-----|------|----------------------|------|----------|
|-----|------|----------------------|------|----------|

| | | | | |
|----------------------------|----------------------------|--|---------|---|
| PRODINTEC | Recherche et développement | PRODINTEC est un centre technologique qui travaille sur le développement de technologies de fabrication additive depuis 2004. | ESPAGNE | www.prodintec.es |
| TECNALIA | Recherche et développement | TECNALIA est un centre de développement de recherche et de technologies appliquées au financement privé avec une expertise dans le domaine de la fabrication additive métallique. | ESPAGNE | www.tecnalia.com |
| THALES | Recherche et développement | Équipement et systèmes pour : L'aéronautique, l'espace, le transport terrestre, la sécurité et la défense | FRANCE | https://www.thalesgroup.com/fr |
| THALES Alenia Space | Recherche et développement | Thales Alenia Space conçoit, intègre, teste, fait fonctionner et propose des systèmes spatiaux innovants. | FRANCE | https://www.thalesgroup.com/fr/global/ |
| TKNIKA | Recherche et développement | TKNIKA est le centre de recherche et d'innovations appliquées à l'éducation et la formation professionnelle | ESPAGNE | www.tknika.eus |
| UPV | Recherche et développement | L'Université du Pays Basque (UPV/EHU), en particulier le groupe de fabrication haute performance d'ingénierie mécanique mène des recherches sur les procédés de fabrication additive métallique depuis 2004. | ESPAGNE | www.ehu.es/manufacturing |

| Nom | Type | Activité/description | Pays | Site web |
|---|--|--|----------|---|
| VLM Robotics | Recherche et développement | Office d'étude robotique + Développement de MAM | FRANCE | http://vlm-robotics.fr/ |
| École des Mines D'Albi Carmaux | Recherche et développement | École supérieure (Ingénieur) + Laboratoire avec plateforme MIMOSA : SLM Machine | FRANCE | http://www.mines-albi.fr/ |
| IST | Recherche et développement | École d'ingénieur + Laboratoire de recherche + Centre de recherche | PORTUGAL | www.tecnico.ulisboa.pt |
| REDIT | Recherche et développement | Le réseau des instituts de technologie de la région de Valence est une association privée à but non lucratif qui a été créée en 2001 par les centres technologiques de la région avec la collaboration et le soutien du gouvernement régional. | ESPAGNE | www.redit.es |
| IHM | Recherche et développement + Éducation | L'IHM est à la fois un centre de formation unique et un centre de service d'innovation dans la fabrication avancée, et offre des équipements de formation sur les procédés MAM. | ESPAGNE | www.imh.es |
| Polyshape | Recherche et développement | Poly-Shape est une société innovante spécialisée dans la conception et la fabrication rapide de pièces de prototypage fonctionnelles et dans la production de petites séries. | France | Recherche et développement |
| Pôle formation des industries technologiques | Formation | Formation | France | https://formation.les-industries-technologiques.fr/ |
| GetReady4 3D | Formation | Formation et transfert de connaissances sur la fabrication additive | PORTUGAL | http://www.getready43d.com |

3.7 CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE - FABRICATION ADDITIVE MÉTALLIQUE POUR LE SECTEUR AÉROSPATIAL

Introduction

Le consortium ADDISPACE a mené une enquête parmi les acteurs de l'espace SUDOE. La réponse a été fournie par 78 sociétés opérant dans le secteur aérospatial en France, en Espagne et au Portugal, soit des intégrateurs/équipementiers de premier rang du secteur aérospatial, des fournisseurs et opérateurs MAM, des organismes publics, groupes et associations, des centres de formation et de recherche et des agents d'innovation.

L'objectif de l'enquête était de qualifier et d'identifier les besoins des intervenants dans le domaine de la fabrication additive métallique (MAM) et dans le secteur aérospatial.

Résultats

Selon les réponses, trois secteurs importants sont impactés par cette technologie de fabrication : AÉROSPACE, ESPACE ET DÉFENSE, le premier d'entre eux recueillant plus de 47 % des réponses contre 37 % et 14% respectivement pour les autres.

Les personnes qui ont répondu ont mentionné que selon eux, le marché mondial sera dominé à 68 % par des SOCIÉTÉS BASÉES EN EUROPE. Cependant, même si plusieurs sociétés ont pris la tête du marché de la fabrication additive métallique (comme General Electric, Airbus, Thales Alenia Space, Boeing ou Thales), LES PRINCIPAUX DÉFIS sont toujours d'actualité. La certification (50 % des personnes qui ont répondu), la fabrication (20 %) et le changement des règles de conception (19 %) sont les défis cités le plus souvent.

Cependant, ce nouveau procédé de fabrication suscite UNE FORTE ADHÉSION, plus de 96 % des personnes interrogées conseillent au SECTEUR AÉRONAUTIQUE D'INVESTIR dans cette technologie. De même, la courbe ci-dessous montre la confiance des industriels dans le développement, la maturité et l'appropriation des procédés MAM pour les années à venir.

Estimation of the development and maturity of MAM from the past to the next 20 years

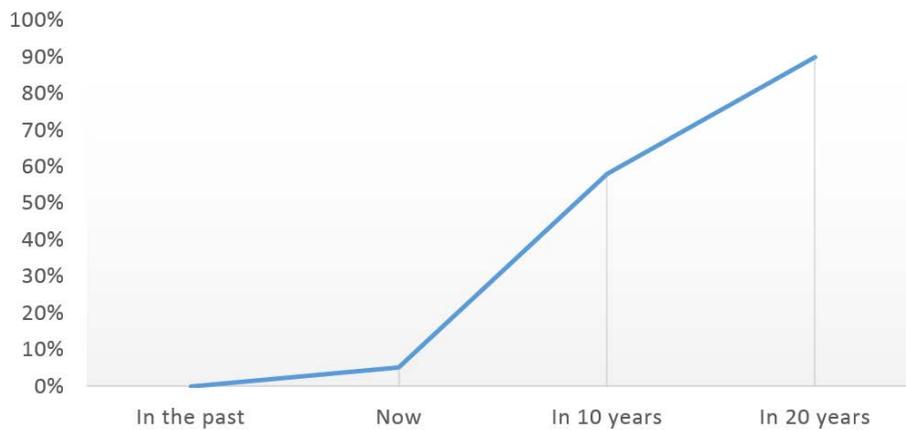


Figure 3-16. Estimation de l'évolution du développement et de la maturité de la fabrication additive métallique

Au cours des 20 prochaines années, pour faire du MAM une technologie standard, fiable et compétitive, plusieurs OBSTACLES vont devoir être surmontés, à savoir « des coûts de production élevés » (23 %), le principal facteur, suivi du « besoin le post-traitement des surfaces » (20 %) et un « délai d'impression long » (18 %). Puis venaient le « manque de compétence et de formation » (14 %) et les inquiétudes techniques au sujet des performances mécaniques (9 %). Une réponse intéressante concernait l'« approvisionnement en matériaux source », qui avait un faible impact (6 %) et qui reflétait certainement l'augmentation du nombre de fournisseurs au niveau mondial.

Malgré tout, l'enquête révèle que les personnes interrogées sont très PRÈS D'ADOPTER cette technologie au cours des années qui viennent. Le résultat montre que 31 % des entités possèdent de l'équipement MAM et la majorité d'entre elles (96 %) prévoit d'en acheter dans les 5 ans à venir. Plus spécifiquement, l'équipement et les technologies se tournent vers la fusion sur lit de poudre SLM (26 % des personnes interrogées), le dépôt de matière en fusion (17 %) et la fusion sur lit de poudre EBM et le dépôt de matière sous flux dirigé WAAM (15 %).

Pour ce qui concerne la FABRICATION INDUSTRIELLE, 47 % des personnes qui ont répondu vont produire des prototypes rapides, et parmi elles, 22 % se concentreront sur des pièces de structures aérospatiales de fabrication, 18 % des pièces de moteur, et 17 % du fuselage.

L'étude permet d'identifier les AVANTAGES ET LES FAIBLESSES DE LA MAM pour le secteur aérospatial. Les cinq principaux AVANTAGES qui font qu'on préfère la MAM aux procédés de fabrication conventionnels sont la réduction de la masse, la liberté de conception des pièces, l'impression directe depuis des fichiers de CAO en une seule opération et non l'assemblage de plusieurs pièces, le ratio Buy-to-Fly clairement favorable au MAM et la production sur demande.

D'autre part, les cinq principales FAIBLESSES DE LA MAM sont la limitation de taille actuelle (100 cm x 50 cm), la rugosité de la surface des pièces imprimées qui nécessitent une finition, l'absence de norme et de procédures d'homologation, la vitesse de fabrication des machines actuelles plus faible, et le coût élevé des équipements et des matières premières.

On a demandé aux personnes concernées de spécifier les DOMAINES D'AMÉLIORATION de la MAM. Les réponses recueillies concernent les procédés, les technologies, la conception, les matières premières et l'intégration à d'autres technologies ou procédés, à savoir :

- Le post-traitement (finition de surface, retrait des supports et traitement thermique), la conception de pièce et la configuration des machines ont été mentionnés par 68 % des personnes interrogées.
- La matière première est désormais considérée comme bien au-dessus du raisonnable en termes de qualité (79 %) et de disponibilité (57 %). Même chose pour la qualité des pièces actuellement produites par la MAM, considérée comme bien supérieure au raisonnable. Cependant, les coûts de production, des matières premières et d'inspection sont trop élevés si l'on en croit les personnes qui ont répondu (plus de 56 %).
- Actuellement, la fabrication additive nécessite que chaque pièce soit examinée et testée. Pourtant, 83 % des personnes interrogées sont d'accord pour dire que la méthode d'inspection basée sur la tomographie de lot pourrait être utilisée à la place. En outre, les personnes interrogées ont privilégié des tests non destructifs basés sur la tomographie, les ultrasons, la thermographie et les caméras infrarouges plutôt que sur les rayons X.

L'enquête a révélé que les BESOINS EN FORMATION ne doivent pas être ignorés, et 59 % des personnes interrogées pensent que la formation actuelle ne répond pas aux besoins du personnel engagé des activités MAM, et principalement les ingénieurs industriels, les ingénieurs en électricité/en mécanique et les techniciens/les opérateurs. Les personnes interrogées pensent qu'elles pourraient augmenter leur personnel MAM dans les années à venir, principalement pour les activités de conception et de contrôle. Les différences de formation principales ont été identifiées dans le secteur de l'optimisation topologique, des procédés et de la réglementation, des règles de conception, de contrôle non destructif et de la finition de surface.

Méthodologie

Ce rapport est disponible en ligne directement depuis www.addispace.eu et a été également distribué à Lisbonne le 1er février 2017, pendant un atelier sur la fabrication additive et à Albi le 7 mars 2017, pendant une journée SLM organisée par Aerospace Valley.

Le rapport a reçu 78 réponses distribuées comme suit :

- France : 68 % de réponses

- Espagne : 22 % de réponses
- Portugal : 10 % de réponses

Sur le nombre de personnes interrogées, 32 % étaient originaires du secteur de la recherche et du développement, 28 % travaillaient dans des compagnies aérospatiales, les équipementiers de premier rang du secteur aérospatial, et 25 % d'autres secteurs (équipement MAM, conseil, intégrateurs aérospatiaux, formation, laboratoire, etc.).

Il est également intéressant de noter que 20 % de ces personnes avaient le sentiment de ne pas avoir d'expérience de MAM, 32 % avaient des notions de base, 36 % avaient une bonne expérience et 12 % se sont considérés comme des experts de la fabrication additive.

Rapport complet de l'analyse de l'enquête MAM disponible à l'Annexe

4 POLITIQUE RÉGIONALE RIS3 DE SUPPORT DE LA MAM

4.1 Introduction

La Commission européenne a défini des technologies clés génériques (KET) comme les technologies générant des activités d'apprentissage intensives. Les KET sont associés à des activités de recherche et développement importantes, à des cycles d'innovation rapides, à des investissements élevés et à des emplois très spécialisés. Les technologies de fabrication additive sont souvent désignées par l'acronyme KET. Dans ce contexte, la MAM (Fabrication additive métallique) offre des capacités qui pourraient s'avérer révolutionnaires si elles étaient appliquées au secteur du transport. Par exemple, une méthode de ce type pourrait raccourcir de manière significative les procédés en évitant la phase outils de découpe et les procédés de formage en plusieurs étapes. En outre, la MAM permet de manipuler des formes complexes et d'améliorer la vitesse et les délais de fabrication.

D'autre part, le retour sur investissement des KET est extrêmement intéressant, et les investissements publics peuvent s'avérer très positifs et générer des recettes sous forme de taxes et de contributions de sécurité sociale. Donc, les recettes peuvent se monter à quatre fois l'investissement initial, et peuvent constituer un important effet de levier dans la mise à niveau de la compétitivité des entreprises et offrir des emplois, contribuant ainsi au développement économique et à la prospérité de l'économie.

Dans les chapitres qui suivent, on étudie le soutien des politiques générales. Les trois régions de l'espace SUDOE impliquées dans ADDISPACE utilisent la **Research and Innovation Strategy for a Smart Specialization** (RIS3-Stratégie de recherche et l'innovation pour une spécialisation intelligente) comme partie intégrante du soutien au développement régional des KET, qui compte plusieurs niveaux.

4.2 Couverture de la région SUDO E

Le projet ADDISPACE a pour sujet les technologies MAM dans l'ensemble de la région SUDO E décrite dans la carte ci-dessous (Figure 4-1). La région SUDO E couvre les régions du sud-ouest de l'Europe, notamment l'ensemble des Communautés autonomes espagnoles (à l'exception des îles Canaries), les six régions du sud-ouest de la France, toutes les régions continentales du Portugal, le Royaume-Uni (Gibraltar) et la Principauté d'Andorre.



Figure 4-1. Carte régionale SUDO E 1

4.3 Axe et priorités du RIS3 dans la zone SUDO E en matière de Fabrication additive métallique MAM

Ce chapitre se concentre sur l'adéquation de l'axe et des priorités du RIS3 au développement des activités de fabrication additive métallique dans la région SUDO E.

| | | | |
|-------------|--------|---------------|---------------------------------|
| Pays | FRANCE | Région | NOUVELLE AQUITAINE OCCITANIE |
|-------------|--------|---------------|---------------------------------|

AXE ET PRIORITÉS RIS3

Nouvelle Aquitaine :

- Chimie, industrialisation des matériaux et mobilisation de la biomasse et des bioraffineries dans l'industrie
- **Systèmes laser**, photoniques et d'imagerie
- Agriculture de précision et éco efficacité, agroalimentaire
- **Construction écologique en bois et efficacité énergétique de l'immeuble**
- Géosciences, métrologie/surveillance pour la gestion durable des ressources naturelles
- Logiciels intégrés et objets connectés
- Livraison d'actifs intelligente pour le bien-être et la santé
- **Parcours de santé intégré et techniques d'assistance pour le bien-être et l'assistance au patient**
- Mobilité nette et intelligente
- **Usine compétitive axée sur le facteur humain**

Occitanie (Languedoc-Roussillon - Midi-Pyrénées) : Toutes les configurations

- Systèmes intégrés
- Innovation de chaîne agroalimentaire territorialisée
- Biotechnologies industrielles pour la récupération du carbone renouvelable
- Matériaux et procédés avancés : aéronautique et diversification
- Recherche translationnelle en oncologie et en gériatrie
- Ingénierie cellulaire et médecine régénérative

AVANTAGES RÉGIONAUX

- Optimiser la gouvernance et accroître le support des intervenants
- Développer et mettre en œuvre des stratégies de transformation économique :
 - (A) le renouvellement de secteurs traditionnels via des activités à forte valeur ajoutée et de nouvelles niches
 - (B) modernisation, grâce à l'adoption et la diffusion de nouvelles technologies ;
 - (C) diversification des technologies relatives aux spécialisations existantes dans les domaines associés ;
 - (D) le développement des nouvelles activités économiques via des innovations technologiques radicales et nouvelles ;
 - (E) l'exploitation de nouvelles formes d'innovation telles que l'innovation ouverte et dirigée par les utilisateurs, l'innovation sociale et l'innovation des services.
- Réponses aux défis économiques et sociétaux
- Croissance de la visibilité régionale pour les investisseurs internationaux
- Amélioration des contacts internes ou externes d'une région
- Promotion de la transmission du savoir et de la diversification technologique

OBJECTIFS

Le couplage des matériaux et des procédés avancés pour l'aéronautique et la diversification ont pour objectif d'assurer l'interface et d'assurer la synergie des compétences dans la région.

Les domaines du futur vont au-delà du seul secteur aéronautique.

Avec 25 établissements industriels leader, 150 PME spécialisées dans la haute technologie et une tradition établie de programmes de collaboration de RDI, cette spécialisation contribue à renforcer et diversifier l'économie industrielle des régions.

Le projet ADDISPACE s'inscrit dans cette approche et a pour but de développer la diffusion des recherches appliquées en relation avec la relation des technologies génériques principales. Elle a pour objectif de promouvoir les capacités d'innovation en vue d'un développement intelligent et durable. Mise en œuvre d'une étude stratégique régionale sur les enjeux de la FA (enjeux par secteur, impact et potentiel régional). Restitution planifiée cet automne

Lancement d'une étude sur la formation de FA (besoins + offre)

Le groupe de travail a identifié deux orientations pour la FA, à savoir :

Les matières agroalimentaires, les agros composites : identification des actions structurantes en faveur du secteur à la suite de la structuration des CRTCI (Composite Transfer and Resource Centre Innovative) à Tarbes.

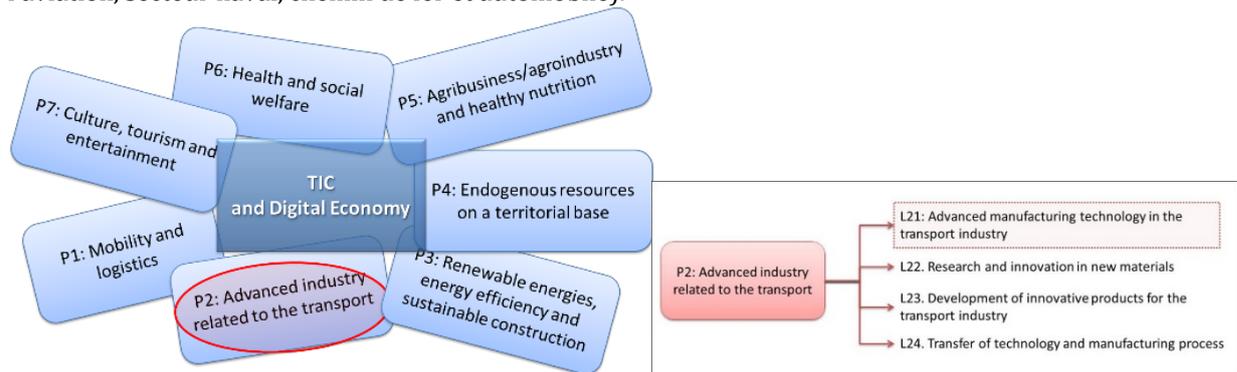
Recyclage/Valorisation : réflexion en cours pour clarifier les enjeux/les besoins du secteur

| | | | |
|-------------|----------------|---------------|-------------------|
| Pays | ESPAGNE | Région | ANDALOUSIE |
|-------------|----------------|---------------|-------------------|

AXE ET PRIORITÉS RIS3

Le document d'orientation « Vision Andalucía 2020 » répertorie les principaux vecteurs d'innovation, et notamment les ressources et les atouts de l'Andalousie dans le contexte mondial actuel et les tendances futures. Huit priorités de spécialisation ont été sélectionnées pour mettre en œuvre la stratégie d'innovation proposée en Andalousie. Axis P2 (« Secteur avancé associé au transport ») figure parmi les huit priorités pour la mise en œuvre sur quatre modes d'action différents (L21-L24), comme le montre l'illustration ci-dessous.

La ligne d'action L2 souligne que les technologies MAM peuvent contribuer au développement de nouvelles méthodologies et à l'amélioration de procédés et à la stratégie de l'Andalousie qui vise à innover dans la production de procédés dans l'industrie du transport en utilisant son potentiel d'augmentation de la productivité pour les composants, pièces et systèmes destinés au secteur aérospatial et à d'autres (secteur de l'aviation, secteur naval, chemin de fer et automobile).



AVANTAGES RÉGIONAUX

La plupart des activités de recherche et de développement des KET en Espagne sont menées en Andalousie, et pas seulement dans les Universités, mais aussi dans les centres de recherche.

CATEC a une expérience importante dans la recherche et le développement des technologies de FA, en d'autres termes, la fabrication par superposition de couches (également connu sous le nom de prototypage rapide (RP), la fabrication rapide (FR), la fabrication de solide à forme libre, la fabrication numérique (DM), etc.).

Deux orientations sont proposées : 1) Transformer l'Andalousie en référence mondiale en matière de recherche et de développement, de démonstration de technologie et 2) Favoriser les répercussions dans d'autres secteurs de l'économie, avec promotion du transfert de connaissances et de technologie.

OBJECTIFS

Le secteur aérospatial et la défense sont des objectifs pour l'Andalousie. Les lignes d'assemblage des sociétés mondiales à la pointe telles que le nouvel avion de transport militaire européen ADS et les usines de production de fibre de carbone.

Le travail consistant à améliorer les technologies et les systèmes de fabrication avancés actuels continuera dans cet esprit. Il reste également du travail en matière d'automatisation, de robotisation et de numérisation des procédés de production pour les secteurs du transport.

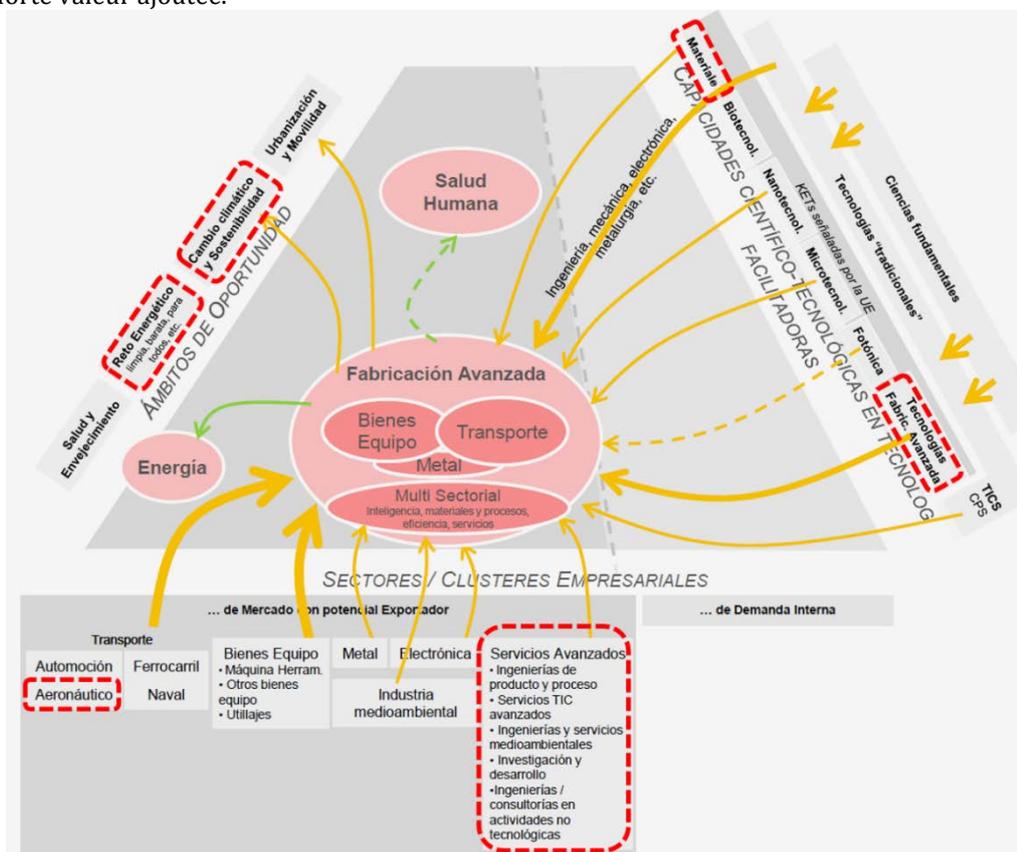
Les bénéficiaires de la priorité P2 (industrie avancée relative au transport) et le groupe sont :

Des agents du système informatique andalou associé au secteur de transport avancé.

Groupes de recherche issus d'Universités andalouses s'intéressant au transport.
 Compagnie de transport industriel.
 Des sociétés issues d'autres secteurs en lien avec le secteur du transport.

Pays ESPAGNE **Région** PAYS BASQUE
AXE ET PRIORITÉS RIS3

Dans le programme RIS3 (Research and Innovation Strategy for Intelligent Specialisation) mis en place par le gouvernement basque, la Fabrication avancée a été définie comme l'une des TROIS MÉTA PRIORITÉS, avec l'énergie et la bioscience. Il s'agit d'un engagement dans des recherches visant à incorporer de l'intelligence dans les moyens et systèmes de production, à utiliser des technologies et des fonctions émergentes dans de nouveaux produits et procédés, à intégrer des matériaux avancés dans des solutions avec davantage de valeur ajoutée ou dans des procédés améliorés, l'efficacité et la durabilité des ressources utilisées et l'intégration de services à forte valeur ajoutée.



AVANTAGES RÉGIONAUX

Le choix de « Fabrication avancée » en tant que méta priorité au Pays Basque est basé sur son applicabilité transversale, sur la tradition industrielle basque, sur la résistance relative de différents secteurs d'activité, ainsi que sur l'existence d'importantes fonctionnalités technologiques scientifiques favorisant les technologies associées à des activités de fabrication.

OBJECTIFS

Les domaines de spécialisation du RIS3 associés au projet ADDISPACE présentant le plus fort potentiel de développement de la Communauté autonome du Pays basque sont :

Le développement de matériaux et procédés de fabrication additive métallique avancés destinés à différentes branches du transport, notamment le secteur aéronautique.

Développement des moyens de production MAM, étude des technologies évolutives au niveau de la machine-outil (technologies LMD, WAAM) et groupes de recherche de nouveaux concepts de machine (hybridation de procédés) associés au transport.

Compagnie de transport industriel.

Des sociétés issues d'autres secteurs qui présentent des liaisons potentielles avec le secteur du transport.

| Pays | ESPAGNE | Région | AUTRES RÉGIONS |
|------|---------|--------|----------------|
|------|---------|--------|----------------|

AXE ET PRIORITÉS RIS3

À part les régions cibles du Pays Basque et d'Andalousie, il faut noter qu'un nombre significatif d'autres régions d'Espagne considèrent le secteur aérospatial et/ou de la Fabrication additive comme des technologies clés numériques (KET), parmi leurs priorités RIS.

Par exemple, les régions de Madrid, de Castilla-Léon et Castilla la Mancha considèrent le secteur aérospatial comme une de leurs priorités en s'appuyant sur leurs capacités existantes. La région de Galice considère également ce secteur comme une opportunité de niche qui permettra de diversifier le secteur mécanique métallurgie traditionnel.

Le nombre de régions d'Espagne qui adoptent les technologies de fabrication avancées en tant que technologie clé numérique prioritaire sont nombreuses, et parmi elles, certaines considèrent les technologies de fabrication additives comme des priorités de spécialisation : Aragon, Asturies, Cantabrie, Catalogne, Madrid, Navarre et Valence.

| Pays | PORTUGAL | Région | CENTRE DU PORTUGAL |
|------|----------|--------|--------------------|
|------|----------|--------|--------------------|

AXE ET PRIORITÉS RIS3

Les principaux objectifs du RIS3 au Portugal sont définis par rapport aux domaines technologiques et scientifiques dans lesquels le Portugal présente des avantages comparatifs ou concurrentiels.

La vision 2020 du Portugal repose sur 4 piliers fondamentaux :

Économie numérique ;

Science et créativité ;

Capacité industrielle technologique ;

Améliore les fonctionnalités et les différentiateurs endogènes.

Et 5 axes thématiques

La promotion du potentiel de la base de connaissances scientifiques et technologiques ;

La promotion de la coopération entre les institutions de R&D publiques et privées et entre les sociétés,

Le foyer sur les biens et les services à valeur ajoutée

La promotion de l'entrepreneuriat, la promotion de la création de l'emploi et la qualification des ressources humaines ;

La transition à une économie à faible carbone.

Le domaine du MAM (et donc, ADDISPACE) est tout à fait aligné avec certains des axes structurels et priorités cités ci-dessus, car il promeut le développement et le transfert des connaissances scientifiques et technologiques. ADDISPACE contribue à la distribution et à la coopération entre sociétés et à la recherche et en vue de la création de groupes de services pour le secteur aérospatial en tant qu'effet de levier pour la compétitivité de ce secteur à haute valeur ajoutée.

ADDISPACE s'intègre à la plateforme d'innovation transversale « Solutions industrielles durables » dans quatre domaines prioritaires : « Automobile, Aéronautique et Espace », « Matériaux et matières premières » et « Industrie de technologies et produit de production »

AVANTAGES RÉGIONAUX

Le RIS3 du Centre du Portugal a pour objectif le développement de procédés, de matériaux et de systèmes durables à plus forte valeur ajoutée, de la recherche et des technologies clés génériques et donc l'enjeu que représente la fabrication additive (la FA) et donc la MAM (la fabrication additive métallique ainsi que l'intégration à des systèmes et des équipements de fabrication traditionnelle sont très importants. Le développement d'applications de ces technologies de fabrication additive par les centres de connaissance, le transfert et l'adoption de ces nouvelles avancées.

La stratégie régionale inclut également l'industrie aérospatiale, marché à forte valeur ajoutée, ce qui constitue un autre point commun avec ADDISPACE.

Le programme RIS3 de la région définit également le développement de technologies avancées et/ou les procédés émergents, les produits innovants et les écosystèmes à plus forte valeur ajoutée comme des priorités. Le développement des technologies MAM s'inscrit dans les objectifs du RIS3 pour l'évaluation de la durabilité des procédés, des produits et des systèmes et la rentabilité des ressources et la réduction de l'impact environnemental des procédés de production.

L'utilisation de technologies MAM sophistiquées permet de fabriquer des composants à forte valeur ajoutée de meilleure qualité, avec des délais de production courts et en réduisant les coûts de fabrication, avec des gains d'efficacité avérés.

OBJECTIFS

Développement des technologies MAM par des sociétés situées au centre du Portugal, afin de développer l'activité économique locale en créant des partenariats et fournissant des composants, des produits et des services. L'objectif du RIS3 est d'anticiper les capacités d'exportation des sociétés locales pour fournir des technologies avancées au marché aérospatial, et donc, d'accroître la compétitivité de la région. L'adoption des technologies de fabrication additive par des sociétés de la région constitue l'un des objectifs et une contribution positive à la durabilité et l'efficacité de l'utilisation des ressources, le procédé additif réduisant l'utilisation des procédés de découpe pour fragmentation (technologies d'enlèvement), avec une réduction substantielle des pertes sous forme de copeaux. ADDISPACE s'inscrit donc dans les objectifs régionaux RIS3 en favorisant une utilisation efficace des matériaux bruts, la réduction des pertes et l'efficacité énergétique.

Un autre objectif du RIS3 consiste à accroître les possibilités humaines par des actions de diffusion et de transfert des connaissances via les cours de formation pilote et la formation continue. Les technologies de fabrication additive et ADDISPACE sont de nouveau d'importants contributeurs à cette opération de priorité RIS3.

5 GLOSSAIRE

[3D] : En trois dimensions

[ACU] : Adaptateur de la charge utile d'ARIANE

[AMCRC] : Soudage à l'arc sous gaz avec électrode de tungstène

[AMCRC] : Advanced Manufacturing Cooperative Research Center of Australia (Centre de recherche de coopération de fabrication avancée d'Australie)

[ASTM] : American Society for Testing and Materials (Société américaine des tests et des matériaux)

[CAO] : Conception assistée par ordinateur

[CATEC] : Centre for Advanced Aerospace Technologies de Séville, Espagne

[CDRSP] : Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie eu Japon

[CDRSP] : Centre for Rapid and Sustainable Product Development (Centre pour le développement rapide et durable du produit)

[CFD] : Outils de dynamique des fluides

[CMT] : Transfert de métaux à froid

[DED] : Technologies de dépôt de matière sous flux dirigé

[DM] : Fabrication numérique

[DMRC] : Direct Manufacturing Research Centre of Germany (Centre de recherche de Fabrication direct d'Allemagne)

[EBAM][™] : Fabrication de forme libre avec faisceau à électrons (EBF3)

[EBM] : Fusion par faisceau d'électrons (EBM)

[EPSRC] : Engineering and Physical Sciences Research Council of UK (Conseil de recherche en ingénierie et en science physique du Royaume-Uni)

[ESA] : Agence européenne de l'espace

[FA] : Fabrication additive

[FCT] : Foundation for Science and Technology of Portugal (Fondation pour la science et la technologie du Portugal)

[FDM] : Modélisation par dépôt de fil en fusion

[FEM] : Outils de modèle d'élément fini

[FGM] : Matériaux à gradient fonctionnel

[FLPP]: Programme de préparation des futurs lanceurs d'ESA

[GMAW] : Soudage à l'arc au plasma

[GTAW] : Soudage à l'arc sous gaz avec électrode métallique

[HIP] : Haute compression isostatique

[ISCAR]: Rotation interne et Support de système de contrôle d'attitude pour FLPP

[KET] : Technologies clés génériques

[LEAP] : Propulsion d'aviation de pointe Moteur à turbohélice à haut évitement fabriqué par CFM International

[LEAP] : Centre de ressources et de transfert en composites innovants (CRTCI) à Tarbes, France.

[LMD] : Dépôt de métal par laser (LMD)

[LMD-w] : Dépôt de fil métallique par laser

[MAM] : Fabrication additive métallique

[MIG] : Gaz inerte métallique

[NAMII] : National Additive Manufacturing Innovation Institute of the United States of America (Institut de l'innovation dans la fabrication additive nationale des États-Unis)

[NASA] : National Aeronautics and Space Administration des USA

[NDT] : Technologies non destructives

[OEM] : Original Equipment Manufacturer - équipementier

[PAMI] : Initiative de fabrication additive portugaise

[PBF] : Technologies de fusion sur lit de poudre

[R&D] : Activités de recherche et développement

[RIS3] : Research and Innovation Strategy for a Smart Specialization (Stratégie de recherche et d'innovation pour la spécialisation intelligente)

[RM] : Fabrication rapide

[RNPR]: Portuguese National Network of Rapid Prototyping (Réseau national portugais de prototypage rapide)

[RP] : Prototypage rapide

[SLM] : Fusion sélective par laser

[SLM] : Frittage laser métallique direct

[STL] : STL est le type de fichier standard utilisé par la plupart des systèmes de fabrication additive

[STREAM] : Matériaux d'ingénierie structurelle via un programme FA

[TIG] : Gaz inerte tungstène

[TNO]: Institut de recherche des Pays-Bas

[TRL] : Niveau de maturité technologique

[USA] : États-Unis

[WAAM] : Fabrication additive de soudage à l'arc et de fil métallique (WAAM)

6 RÉFÉRENCES

- [1] T. Wohlers and T. Caffrey, “Wohlers Report 2016. 3D printing and Additive Manufacturing. State of the industry.,” *Wohler Assoc.*, 2016.
- [2] “Introduction to Additive Manufacturing Technology. A guide for Designers and Engineers.,” Shrewsbury, UK, , 2015.
- [3] “Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report form the EC Workshop on Additive Manufacturing.” European Commission, p. 78, 2014.
- [4] J. Scott et al., “Additive Manufacturing: Status and Opportunities,” in *Science and Technology Policy Institute*, 2012, pp. 1–29.
- [5] “Hype Cycle for 3D Printing,” *Gart. Inc.*, 2014.
- [6] “Additive manufacturing: opportunities and constraints,” Royal Academy of Enineering. UK , 2013.
- [7] “F2792-12a: Standard terminology for additive manufacturing technologies,” ASTM International, 2013.
- [8] Y. Cadoret, V. Chastand, A. Tezenas, and W. Maia, “Additive Manufacturing in Thales.” Paris, 2015.
- [9] J. J. Lewandowski and M. Seifi, “Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties,” *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 46, no. 1, pp. 151–186, 2016.
- [10] R. Sharman, “GKN Aerospace. Additive Manufacturing.” GKN Aerospace.
- [11] “Additive Manufacturing. A game changer for the manufacturing industry?” Roland Berger Strategy Consultants, Munich, 2013.
- [12] M. Aliakbari, “Additive Manufacturing: state of the art, capabilities and sample applications with cost analysis.,” PhD thesis, KTH, 2012.
- [13] A. Biamino, S. Penna, “Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation.,” *Intermetallics*, vol. 19, p. 776, 2011.
- [14] “<https://slm-solutions.com/>,” 2016 .
- [15] “<http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melt>,” 2016.
- [16] L. E. Murr, “Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam technologies,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 28, pp. 1–14, 2012.

- [17] L. Xue, "Laser consolidation process for the manufacturing of structural components for advanced robotic mechatronic system," *Proc. 6th Int. Symp. Artif. Intell. Robot. Autom. Sp.*, 2001.
- [18] "<http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/elect>," 2016 .
- [19] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015.
- [20] "WAAM." [Online]. Available: <http://waammat.com/>. [Accessed: 01-Oct-2016].
- [21] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire + arc additive manufacturing," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 836, no. March, 2015.
- [22] J. Ding, F. Martina, and S. Williams, "Production of large metallic components by additive manufacture – issues and achievements," *1st Met. Mater. Process. Ind. challenges*, no. February, 2015.
- [23] "Additive Manufacturing - Next generation." Roland Berger Strategy Consultants, 2016.
- [24] M. M. Cotteleer, M., Holdowsky J., "3D opportunity for aerospace and defense," *Deloitte University Press*, 2014. .
- [25] M. M. Cotteleer, M., Holdowsky J., "The 3D opportunity primer," *Deloitte Univ. Press*, 2014.
- [26] "<http://www.farinia.com/additive-manufacturing/industrial-3d/can-additive-manufacturing-save-the-aerospace-sector/>," 2016.
- [27] M. Tomlin and J. Meyer, "Topology Additive manufacturing technologies optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part," *7th Altair CAE Technol. Conf.*, 2011.
- [28] L. Hao, D. Raymont, C. Yan, A. Hussein, and P. Young, "Design and additive manufacturing of cellular lattice structures," *Innov. Dev. Virtual Phys. Prototyp.*, no. November 2014, pp. 249–254, 2011.
- [29] P. Sanders, "Emerging technologies and Concepts. On the way to Additive Manufacturing." Airbus Group, 2016.
- [30] "<http://www.airbus.com/>," 2016. .
- [31] "<http://www.techworld.com/personal-tech/industrial-3d-printing-transformation-design-says-airbus-innovation-chief-3646683/>," 2016.

- [32] M. Merklein, D. Junker, A. Schaub, and F. Neubauer, "Hybrid additive manufacturing technologies - An analysis regarding potentials and applications," *Phys. Procedia*, vol. 83, pp. 549–559, 2016.
- [33] "<http://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-core-applications/hybrid-manufacturing/>," 2016.
- [34] "<http://www.materialstoday.com/additive-manufacturing/news/3d-printing-in-space/>," 2016.
- [35] "La fabricación aditiva llega a la industria aeronáutica y espacial." Addimat, Hegan, Invema, AEI, Ministerio de Industria, Energía y Turismo (Gov. Esp.), 2016.
- [36] "www.3dsystems.com," 2016.
- [37] J. Shukla, A. Mishra, and R. K. Dwivedi, "Review of Development in 3D Printing and Its Impact on Industrial , Social and Medical," *Amsi 2014*, 2014.
- [38] "<http://journal.hep.com.cn/fme/EN/abstract/abstract4627.shtml#1>," 2016.
- [39] Coykendall, Cotteleer, Holdowsky and Mahto, 3D opportunity in aerospace and defense: Additive manufacturing takes flight, Deloitte University Press, 2014.
- [40] Shawn Kelly, EWI, Metal Additive Manufacturing for Aerospace Markets, 7th International EWI/TWI Aerospace Seminar, Seattle, WA Sept 17-18, 2014.
- [41] Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., & Walter, M. (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(6), 687-697.
- [42] Ford, Sharon. « Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness » *Journal of International Commerce and Economics*. Publié par voie électronique en septembre 2014
- [43] Wholers, T., & Caffrey, T. (2014). Wholers Report 2014 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Wholers Associates.
- [44] Deloitte analysis; CSC, 3D printing and the future of manufacturing, 2012.
- [45] <http://www.geaviation.com/company/additive-manufacturing.html>, accessed on November 11, 2015
- [46] <http://generalelectric.tumblr.com/post/61429020156/engineers-at-ge-aviations-additive-development>, accessed on November 11, 2015
- [47] <http://www.suasnews.com/2015/11/39747/aurora-flight-sciences-3d-printed-wing/>, accessed on November 11, 2015
- [48] <http://additivemanufacturina.com/2013/07/22/nasa-industrv-test-3d-printed-rocketis-enaine-iniector/>. accessed on November 11, 2015

- [49] <http://additivemanufacturing.com/2014/10/30/concept-laser-gmbh-a-world-first-additively-manufactured-titanium-components-now-onboard-the-airbus-a350-xwb/>, accessed on November 11, 2015
- [50] METAL AM - The magazine for the metal additive manufacturing industry, Vol.1 No.1 Spring 2015, published by Inovar Communications Ltd
- [51] <http://www.metal-am.com/news/003141.html>, accès le 11 novembre 2015
- [52] http://www.airbusgroup.com/int/en/news-media/press-releases/Airbus-Group/Financial_Communication/2015/03/20150319_airbus_defence_and_space_3d_printing_eurostar_e3000_satellite_platform.html, accès le 11 novembre 2015
- [53] http://www.designnews.com/author.asp?section_id=1392&doc_id=274172&itc=d_n_analysis_element&dfpPPParams=ind_183,industry_aero,industry_gov,industry_machinery,bid_27,aid_274172&dfpLayout=blog&dfpPPParams=ind_183,industry_aero,industry_gov,industry_machinery,bid_27,aid_274172&dfpLayout=blog, accessed on November 11, 2015
- [54] Jukka Muhonen, Laser Sintering - AM Solutions from EOS to meet changing market demands and opening up future possibilities, Teknologidag Hpgskolen i Gj0vik, 19th of September, 2013
- [55] <https://3dprint.com/1357/worlds-fastest-car-koenigsegg-one1-to-feature-3d-printed-exhaust-tips/>
- [56] The Army's Role in Additive Manufacturing, NCMS, October 2013 Frazier, William E. 2010.
- [57] Direct Digital Manufacturing of Metallic Components: Vision and Roadmap. Paper read at Direct Digital Manufacturing of Metallic Components: Affordable, Durable, and Structurally Efficient Airframes, at Solomons Island, MD.
- [58] M. Shellabear, O. Nyrhila, DMLS - Development History and State Of The Art, 1EOS GmbH Electro Optical Systems, Germany; 2EOS Finland, Finland.
- [59] R. Udroi, Powder Bed Additive manufacturing Systems and its Applications, Academic Journal Of Manufacturing Engineering, Vol. 10, Issue 4/2012.
- [61] www.eos.info, accessed on November 11, 2015
- [62] E. Herderick, « Additive Manufacturing of Metals: A Review » EWI, Columbus, OH USA Materials Science and Technology (MS&T) 2011
- [63] Kristofer Ek « Additive Manufactured Material » - Master of Science Thesis MMK 2014:19 MKN 109 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design SE-100 44 STOCKHOLM

- [64] Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2010), « Additive Manufacturing Technologies », Springer, London 59
- [65] The government office for science, « The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK, » London, 2013.
- [66] European Commission, « Advancing Manufacturing- Advancing Europe-Report of the task force on advanced manufacturing for clean production, » Brussels, 2014.
- [67] Wohlers associates, « Wohlers report 2016. 3D printing and manufacturing state of the industry annual worldwide progress report, » 2016.
- [68] R. Berger, « Additive Manufacturing – next generation, » 2016
- [69] Bonnín, J.R., Fuchs, E., Vaishav, P., Morgan, M.G., Mendonça, J., « When Risks cannot be seen: regulating uncertainty in emerging technologies, » 2015.[70] Ponche R. « Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres ». Ecole Centrale de Nantes; 2013.
- [71] Bourell D.L., Leu M.C., Rosen D.W., Beaman J.J. « Roadmap for Additive Manufacturing : Identifying the Future of Freeform Processing ». 2009.
- [72] Sakly A. « Fabrication additive de pièces à base d’alliages métalliques complexes ». Université de Lorraine; 2013.
- [73] Bo Q., Yu-sheng S., Qing-song W., Hai-bo W. « The helix scan strategy applied to the selective laser melting ». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 63, 5–8, 631–40, 2012;
- [74] Foroozmehr E., Kovacevic R. « Effect of path planning on the laser powder deposition process : thermal and structural evaluation ». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 51, 5–8, 659–69, 2010;
- [75] Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. « Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review ». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 83, 1, 389–405, 2015;
- [76] Kumar A., Roy S. « Effect of three-dimensional melt pool convection on process characteristics during laser cladding ». Computational Materials Science. 46, 2, 495-506, 2009;
- [77] Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. « 3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection : effects of laser pulse shaping on the process ». Optics and Lasers in Engineering. 41, 6, 849-67, 2004;
- [78] Cho C., Zhao G., Kwak S.-Y., Kim C.B. « Computational mechanics of laser cladding process ». Journal of Materials Processing Technology. 153–154, 494–500, 2004;

- [79] Ghosh S., Choi J. « Three-dimensional transient finite element analysis for residual stresses in the laser aided direct metal/material deposition process ». *Journal of Laser Applications*. 17, 3, 144-58, 2005;
- [80] Morville S., Carin M., Muller M., et al. « 2D axial-symmetric model for fluid flow and heat transfer in the melting and resolidification of a vertical cylinder ». *COMSOL Conference*. Paris; 2010.
- [81] Alimardani M., Toyserkani E., Huissoon J.P., Paul C.P. « On the delamination and crack formation in a thin wall fabricated using laser solid freeform fabrication process : An experimental-numerical investigation ». *Optics and Lasers in Engineering*. 47, 11, 1160-8, 2009;
- [82] Fallah V., Alimardani M., Corbin S.F., Khajepour A. « Temporal development of melt-pool morphology and clad geometry in laser powder deposition ». *Computational Materials Science*. 50, 7, 2124-34, 2011;
- [83] Driessen A.M. « Overhang constraint in topology optimisation for additive manufacturing: a density gradient based approach ». *Delft University of Technology*; 2016.
- [84] Takezawa S., Nishiwaki S., Izui K., Yoshimura M. « Structural optimization based on topology optimization techniques using frame elements considering cross-sectional properties ». *Optimisation structurelle et multidisciplinaire*. 34, 1, 41-60, 2007;
- [85] Bendsoe M.P., Sigmund O. « Topology optimization: theory, methods, and applications ». Springer Verlag; 2003.
- [86] Zegard T., Paulino G.H. « Bridging topology optimization and additive manufacturing ». *Optimisation structurelle et multidisciplinaire*. 53, 1, 175-92, 2016;
- [87] Brackett D., Ashcroft I., Hague R. « Topology Optimization for Additive Manufacturing ». 2011;
- [88] R. Berger, « Marktchancen und Potentiale des Additive Manufacturing Roland Berger analyzed Additive Manufacturing (de FA) technologies, focusing on metal structures for clients in engineered products, » 2014, no. September.

Partners



ADDISPACE est co-financé par le Fond Européen de Développement régional (FEDER) à travers du programme INTERREG SUDOE 2014-2020

www.addispace.eu