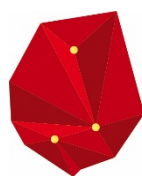




ETUDE SUR LES IMPACTS TECHNOLOGIQUES ET INDUSTRIELS DE LA FABRICATION ADDITIVE SUR LES FILIERES DE LA SOUS-TRAITANCE INDUSTRIELLE EN REGION OCCITANIE / PYRENEES-MEDITERRANEE



madeeli
— mon agence —
DÉVELOPPEMENT EXPORT INNOVATION

RAPPORT FINAL

TABLE DES MATIERES

1.	Etat des lieux de la fabrication additive : technologies et usages	5
1.1.	Les opportunités offertes par la fabrication additive.....	5
1.2.	Les matières premières de la FA	6
1.3.	Les technologies FA prometteuses pour une industrialisation	11
1.4.	Les usages de la FA	28
2.	Le marché de la FA	35
2.1.	Les données clés du marchés	35
2.2.	La chaîne de valeur et les acteurs leaders en France	37
3.	L'impact de la FA sur la filière de sous-traitance	45
3.1.	Les enjeux de la FA pour la filière de sous-traitance	45
3.2.	Stratégie des donneurs d'ordres vis-à-vis de la FA	48
3.3.	Roadmap prévisionnelle des pièces produites en FA.....	52
3.4.	Impact sur la filière de sous-traitance conventionnelle	54
3.5.	Evolution prévisionnelle des besoins en compétences sur la chaîne de valeur .	61
3.6.	Synthèse de l'impact de la FA sur la filière de sous-traitance globale.....	63
4.	Cartographie de la FA en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée positionnés sur la FA	64
4.1.	Résultats du sondage en ligne.....	64
4.2.	Acteurs en présence.....	65
5.	Préconisations pour les entreprises du territoire	78
6.	Annexes	82
6.1.	Listes des acronymes utilisés	82
6.2.	Liste des entretiens réalisés	83

Contexte et méthodologie de l'étude

MADDELI, Agence Régionale de Développement Economique de l'Export et de l'Innovation, a souhaité engager une réflexion avec le financement de l'Etat et de la Région, sur les **impacts technologiques et industriels de la fabrication additive sur les filières de sous-traitance industrielle en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée**. Cette réflexion a associé le pôle de compétitivité **Aerospace Valley** et l'**IRT Saint Exupéry**.

Cette étude, confiée à D&Consultants, vise à **clarifier et mettre en perspective les conditions de création de valeur de la fabrication additive dans les trois principales filières du territoire régional : le transport, la santé et l'agro-industrie**. Une forte dominante de cette étude a été attribuée au secteur du **transport, et notamment de l'aéronautique**.

Les **principaux objectifs** de cette étude sont les suivants :

- **Identifier les enjeux de la fabrication additive à court et long terme**, en termes d'évolutions techniques et de marchés ;
- **Evaluer les conséquences des évolutions des marchés et des chaînes de valeur** sur les filières de sous-traitance régionales ;
- **Cartographier l'écosystème** régional « Fabrication Additive » ;
- **Etablir des recommandations** en matière de développement de la filière.

Une étude réalisée en 3 phases :

Janvier 2016

PHASE 1

IDENTIFICATION DES ENJEUX DES TECHNOLOGIES FABRICATION ADDITIVE PAR FILIÈRE

- Analyse prospective des enjeux induits par la révolution « Fabrication Additive »
- Analyse des mutations à venir sur les chaînes de valeur par filière et sur la sous-traitance

PHASE 2

MESURE DE L'IMPACT SUR LES ENTREPRISES MANUFACTURIÈRES RÉGIONALES

- Analyse des conséquences de la révolution « Fabrication Additive » sur les entreprises des filières de la sous-traitance industrielle
- Formalisation des risques et opportunités en termes d'investissements, de compétences et de modèle économique

PHASE 3

MESURE DU POTENTIEL RÉGIONAL ET PRÉCONISATIONS

- Diagnostic des opportunités : compétences régionales, détection des potentiels, réponses aux lacunes
- Préconisations d'aides individuelles et collectives

Juillet 2016

Des moyens importants déployés au cours de l'étude :

Analyse bibliographique : une trentaine de sources bibliographiques ont été analysées.

Entretiens qualitatifs approfondis : Près de 80 entretiens qualitatifs ont été réalisés auprès de donneurs d'ordre (22), d'organismes de recherche (7), d'acteurs appartenant à la filière de sous-traitance (46) et d'experts (4).

Groupe de travail : D&Consultants a présenté les résultats de la phase 1 de l'étude à au groupe de travail « Fabrication additive » de la Stratégie Régionale de l'Innovation, constitué d'industriels (donneurs d'ordres et sous-traitants) ainsi que d'acteurs institutionnels afin de confronter ses résultats à la vision consolidée des acteurs régionaux.

Questionnaire en ligne : les industriels positionnés sur au moins l'une des trois filières (transport, santé, agro-industrie) et localisés dans la région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée ont été interrogés *via* un questionnaire en ligne afin de connaître leur positionnement vis-à-vis de la fabrication additive. L'enquête s'est déroulée sur 2 mois, de mai à juillet 2016, auprès de 92 entreprises.

Les chiffres et les cartographies présentés dans ce rapport sont issus des données déclaratives des structures ayant répondu à l'enquête réalisée par D&Consultants.

1. ETAT DES LIEUX DE LA FABRICATION ADDITIVE : TECHNOLOGIES ET USAGES

1.1. Les opportunités offertes par la fabrication additive

La FA permet de s'affranchir de la plupart des contraintes qui s'appliquent aux procédés conventionnels tels que l'usinage, la fonderie ou encore l'injection plastique. Elle offre de nombreux avantages :

- **Une liberté de conception**, les formes réalisables n'étant pas contraintes par l'impératif de passage d'outils enlevant de la matière ou par la réalisation de moules. La FA permet ainsi de fabriquer des formes complexes jusqu'à présent irréalisables par les procédés conventionnels ;
- **La réalisation de pièces monoblocs**, permettant de s'affranchir de l'étape d'assemblage. Dans les applications déjà développées, le nombre de pièces est réduit jusqu'à un facteur 6, améliorant considérablement l'ergonomie de l'outillage et la rapidité de mise en œuvre en exploitation. Des ensembles à mouvement relatifs intégrés (verrous, loquets) peuvent être réalisés en une seule opération ;
- **L'intégration de fonctions**, telles que le refroidissement par canaux internes, l'intégration d'antennes ou de capteurs, permettant d'augmenter la valeur ajoutée des pièces produites, de simplifier la conception et d'améliorer la fiabilité ;
- **Une économie de matière**, la matière non solidifiée pouvant être réutilisée un nombre significatif de fois. Cette économie constitue un enjeu important pour les matériaux dont le prix est élevé tel que le titane. A titre d'exemple, dans le secteur aéronautique, le ratio « Buy to fly »¹ est aujourd'hui de 10/1 pour les pièces en titane ;²
- **Un gain de masse** par optimisation de la forme de la pièce. La FA peut permettre un gain jusqu'à 70%, ce qui peut présenter un fort intérêt dans les secteurs des transports à travers la diminution de la consommation en énergie et donc la diminution de l'impact environnemental. Le gain de masse doit être évalué économiquement, avec des perspectives en aéronautique et spatial, mais reste loin de la rentabilité dans le secteur automobile ;
- **Un raccourcissement des délais de mise sur le marché** grâce à la suppression de certaines étapes de production complexes telles que l'assemblage, les opérations multiples de tournage et de fraisage ou encore la création de moules pouvant prendre jusqu'à 10 à 20 semaines. Les délais de fabrication sont intéressants pour des productions de pièces en petite série ;

¹ Ratio mesurant le rapport entre la masse de matière mise en œuvre pour réaliser une pièce et la masse qui vole effectivement

² Il faudra cependant attendre la baisse du prix de la poudre, qui est actuellement de 300 €/kg pour le titane, pour que l'économie de matière devienne une réalité

- **Une réduction des coûts de fabrication** dans certains cas. Outre la réduction des étapes d'usinage, la FA permet en effet d'éviter la création de moules d'injection plastique ou de moules pour pièces en métal, particulièrement coûteuse et rentable uniquement pour des grandes séries. Le coût lié à l'outillage est ainsi considérablement réduit. Le coût unitaire est stable dès la première pièce. De plus, le coût associé à la FA est indifférent à la complexité de la pièce fabriquée comme le montre la Figure 1 (échelle non normée). Ainsi, la FA peut être une solution plus économique que les procédés conventionnels pour de petites séries de production ainsi que pour des pièces d'une grande complexité ;

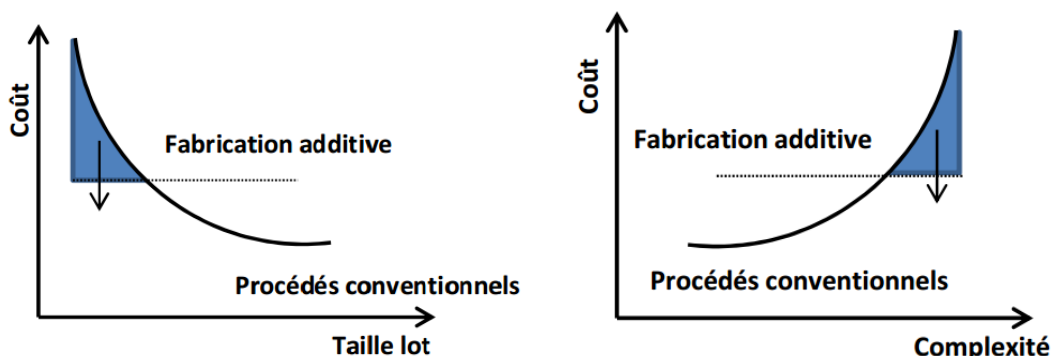


Figure 1 : Comparaison du coût de fabrication d'une pièce en fonction de son volume de production (à gauche) et de sa complexité (à droite) (source : CETIM, 2013)

- **Une réduction des stocks**, les produits étant stockés sous forme numérique et non plus physiquement.

Ainsi, la FA est une technique offrant de nombreuses opportunités pour la production de pièces complexes, personnalisées en petite série. Dans le présent document, les « petites séries » désignent des séries dont le nombre de pièces peut atteindre environ 10 000 unités par an.

1.2. Les matières premières de la FA

La FA permet d'utiliser une grande variété de matériaux. On compte environ 200 matériaux aujourd'hui disponibles pour l'impression. Ces matériaux se classent en cinq grandes familles que sont les **polymères, les métaux, les céramiques, les composites et les matières organiques** (Figure 2).

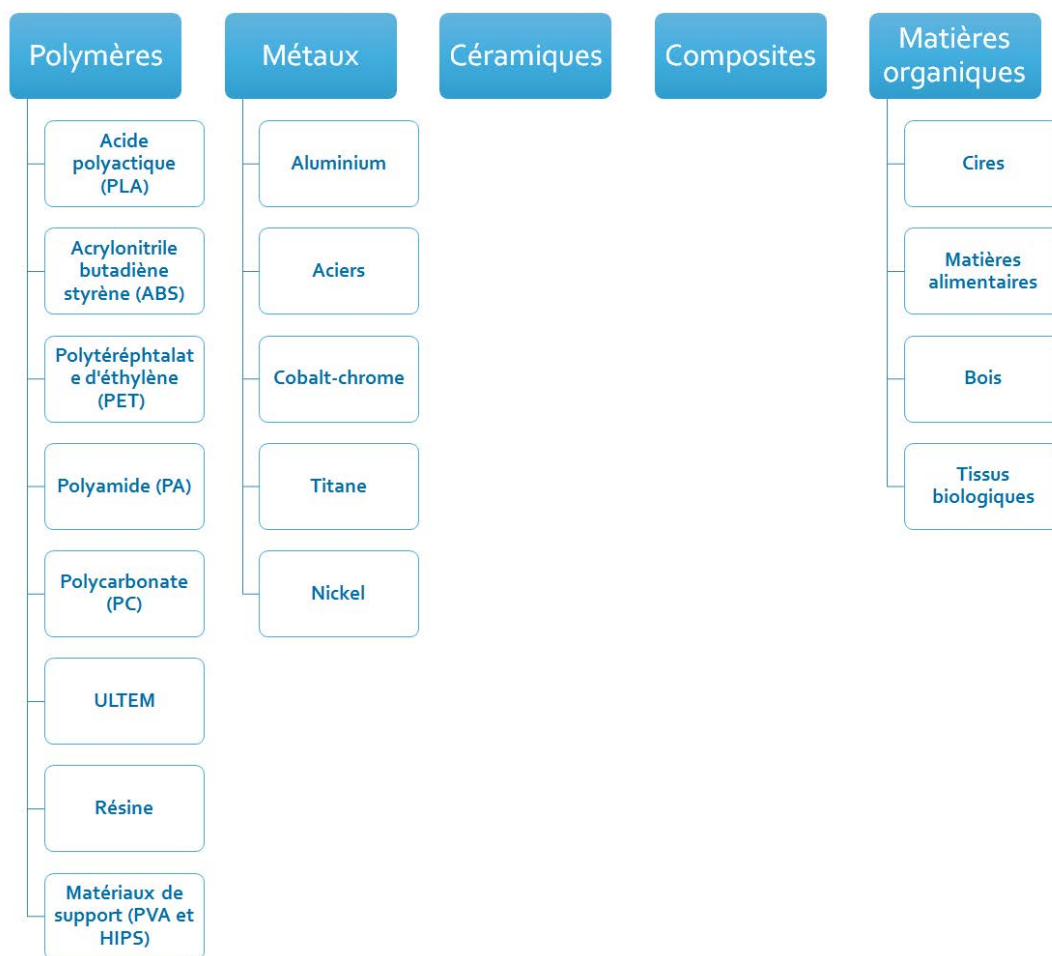


Figure 2 : Les principaux matériaux par grande famille (Source : D&Consultants, 2016)

1.2.1. Les polymères

Les polymères constituent les matériaux dont l'impression en 3 dimensions est la plus démocratisée actuellement, à la fois auprès du grand public et des professionnels. On distingue le **PLA**, l'**ABS**, le **PET**, le **PA**, le **PC**, l'**ULTEM**, la **résine** et les **matériaux utilisés pour la réalisation des supports des pièces**. Le tableau présente les principales caractéristiques des matériaux utilisés pour la fabrication de pièces (hors supports).

Principaux matériaux	Propriétés	Température de fusion	Etat
PLA (Acide polylactique)	<ul style="list-style-type: none"> + Biodégradable car issu de l'amidon (maïs / plantes / lait de chèvre) + Compatibilité avec un contact alimentaire + Ne nécessite pas de plateau chauffant - Sensible à l'eau et à la chaleur - Mauvais état de surface 	Entre 160 et 220°C	Bobines de filament

Principaux matériaux	Propriétés	Température de fusion	Etat
ABS (Acrylonitrile butadiène styrène)	<ul style="list-style-type: none"> + Résistant à l'eau et à la chaleur + Bon état de surface - Plateau chauffant nécessaire pour éviter qu'il ne se rétracte en refroidissant 	Entre 200 et 250°C	Bobines de filament Polymère liquide
PET (Polytéréphtalate d'éthylène)	<ul style="list-style-type: none"> + Associe robustesse et flexibilité + Ne nécessite pas de plateau chauffant 	De l'ordre de 220°C	Bobines de filament
PA (Polyamide)	<ul style="list-style-type: none"> + Associe résistance et élasticité + Ne nécessite pas de plateau chauffant + Compatibilité avec un contact alimentaire 	Entre 235 et 260°C	Bobines de filament Poudres
PC (Polycarbonate)	<ul style="list-style-type: none"> + Résistant à la chaleur + Grande résistance à la traction et à la flexion - Sensible aux UV et à l'eau 	Entre 260 et 290°C	Bobines de filament Poudres
ULTEM	<ul style="list-style-type: none"> + Hautes performances mécaniques + Léger + Ignifuge 	De l'ordre de 220°C	Bobines de filament Poudres
Résine	<ul style="list-style-type: none"> + Solidité + Impressions très détaillées, sur des formes complexes + Bon état de surface 		

Les matériaux utilisés pour la **fabrication de supports sont des plastiques solubles**. On distingue le PVA et le HIPS :

- **L'alcool polyvinylique (PVA)** permet de s'affranchir des supports imprimés dans le même matériau que celui de la pièce, souvent difficile à éliminer. Biodégradable, un simple passage dans l'eau permet de l'éliminer.
- Le **High impact polystyrène (HIPS)** est proche de l'ABS et offre même un rendu plus lisse que ce dernier. Son intérêt en tant que matériaux de support réside dans sa solubilité dans le D-limonène, une dissolution qui demande toutefois un temps plus long que pour éliminer du PVA.

Les efforts de R&D portent actuellement sur le développement de :

- **Thermoplastiques haute-température** tels que le PEEK³ ou l'ULTEM qui présentent un intérêt pour des applications dans les secteurs aéronautique et spatial ;
- Matériaux **ignifugés** ;
- Matériaux permettant d'obtenir une **bonne qualité de surface** ;
- Poudres permettant une **bonne recyclabilité des poudres non frittées** ;
- Matériaux alliant **flexibilité et résistance aux chocs** ;
- Matériaux d'origine **100% renouvelable**.

1.2.2. Les métaux

Les métaux sont de plus en plus utilisés en fabrication additive, notamment dans le monde industriel, et constituent en ce sens les principaux enjeux de la FA actuellement. Les principaux métaux utilisés sont le **titane et l'acier inoxydable**. On distingue également **l'aluminium, et l'alliage cobalt-chrome**. Tous ces métaux sont disponibles pour des utilisations en FA sous forme de poudres.

Principaux matériaux	Propriétés	Exemples d'alliages	Applications principales
Aluminium	<ul style="list-style-type: none"> - Résistant - Léger 	<ul style="list-style-type: none"> - AlSi10Mg associe l'aluminium au silicium et au magnésium 	Pièces de structure dans l'industrie aérospatiale ou dans les moteurs pour l'automobile car combine de bonnes propriétés thermiques et une faible densité
Aciers	<ul style="list-style-type: none"> - Bonnes propriétés mécaniques - Haute résistance à la corrosion 	Maraging Steel MS1 (développé par la société EOS) : alliage très résistant et utilisé dans l'outillage. Inox	Dans l'aérospatial pour le prototypage rapide de pièces solides et hautement résistantes
Cobalt-chrome	<ul style="list-style-type: none"> - Solide - Résistance à l'usure - Résistance à la chaleur - Aspect lisse 		Dans le secteur médical, pour la fabrication de prothèses ou de couronnes dentaires Fabrication de turbines
Titane	<ul style="list-style-type: none"> - Solide - Léger - Résistance à la corrosion - Résistance à haute température 	Ti6Al4V alliage très couramment utilisé notamment en aéronautique	Dans la santé pour la fabrication de prothèses Dans l'aérospatial pour des pièces complexes et/ou multifonctions

³ PolyEtherEtherKetone

Principaux matériaux	Propriétés	Exemples d'alliages	Applications principales
	<ul style="list-style-type: none"> - Biocompatibilité pour certains alliages, et donc utilisés pour les prothèses - Bonne adhérence aux tissus et à l'os 		
Nickel	<ul style="list-style-type: none"> - Résistance mécanique à haute température - Résistance à l'oxydation à chaud 	Alliage 718	Pièces moteurs

Il reste aujourd'hui plusieurs défis à relever concernant les poudres métalliques :

- La **production de poudres de qualité de matériaux réfractaires et avides d'oxygène**, tels que les alliages de titane, de zirconium, de tantale, de niobium, de tungstène ou de molybdène ;
- Le développement de poudres présentant une **bonne recyclabilité**.

1.2.3. Les céramiques

La céramique est un matériau présentant de nombreux avantages : elle est **biocompatible, compatible avec l'alimentation, recyclable et résiste à la chaleur**. Les céramiques techniques offrent notamment des avantages notables sur les pièces métalliques ou plastiques pour des **applications dans l'aéronautique et le spatial** :

- Conservation de la stabilité dimensionnelle à hautes températures ;
- Capacité à supporter des variations thermiques de fortes amplitudes ;
- Bon isolants électriques ;
- Grande résistance à l'usure ;
- Pas de dégazage en utilisation dans le vide ;
- Matériaux inertes ;
- Résistance à l'attaque de nombreux gaz et acides.

La fabrication par FA n'est actuellement **mature que pour la fabrication d'implants crâniens et de substitut osseux**.

1.2.4. Les composites

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion). L'un des matériaux les plus communs constituant la **matrice est le polyamide (nylon)**. Les matériaux constituant le **renfort peuvent être des fibres de verre, ou**

encore des fibres de carbone. Ces renforts apportent des propriétés intéressantes aux matériaux telles que la **résistance mécanique, la dureté ou encore la rigidité.**

L'un des principaux défis à relever sur les matériaux composites concerne les **matériaux céramique-métal** et les **matériaux à renforts particuliers.** Ces poudres posent en effet actuellement des problèmes d'hétérogénéité chimique dans les pièces fabriquées. Les producteurs de matériaux cherchent donc à créer des **poudres composites homogènes.** ⁴

1.2.5. Les matières organiques

On distingue quatre types de matières organiques pouvant être imprimées :

- Les **cires** sont utilisées pour la création de moules de haute précision qui serviront ensuite à faire des pièces finales. La résistance du matériau à la chaleur constitue en effet une propriété rendant les cires bien adaptées à la fabrication de moulages pour des objets métalliques.
- Les **matières alimentaires** : du chocolat aux sauces en passant par le sucre, de nombreux aliments peuvent être imprimés en FA.
- Des **alliages de polymères et de bois recyclé** à teneur d'environ 40 %. La couleur de rendu varie en fonction de la température d'extrusion (de 185 à 230°C). La FA de bois est une technique relativement récente.
- Les **tissus biologiques** constitués de deux types de matériel : celui constituant la matrice extracellulaire, qui peut être naturel ou synthétique, et les cellules qui peuvent être différenciées ou pluri/multipotentes.

Au regard des trois filières sélectionnées pour cette étude, D&Consultants a retenu six typologies de matériaux : **les polymères, les métaux, les céramiques, les composites, les constituants des tissus biologiques et les produits alimentaires.** La répartition de ces matières premières par filière est présentée dans la Figure 3 ci-dessous.

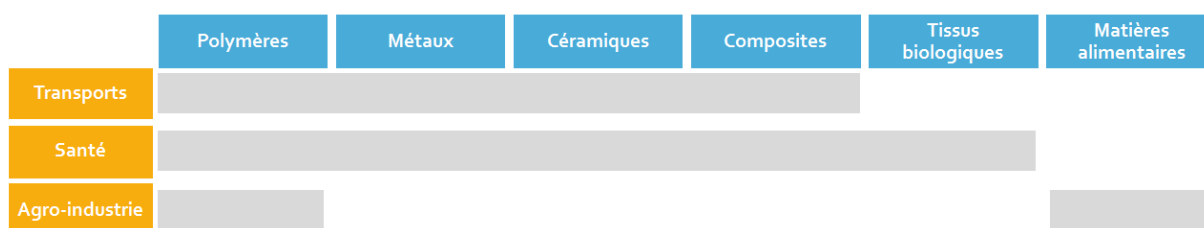


Figure 3 : Répartition des matières premières par filière applicative (Source : D&Consultants, 2016)

1.3. Les technologies FA prometteuses pour une industrialisation

Les différentes technologies de FA peuvent être segmentées en trois catégories en fonction des matières à imprimer : les **procédés utilisés pour imprimer tous les matériaux hors tissus**

⁴ [file:///C:/Users/C%C3%Agline/Downloads/10-17Fabadditive233%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/C%C3%Agline/Downloads/10-17Fabadditive233%20(2).pdf)

biologiques et matières alimentaires, les techniques permettant d'imprimer les tissus biologiques et celles pour les matières alimentaires.

1.3.1. Les technologies d'impression hors tissus biologiques et matières alimentaires

La FA est constituée de sept familles normalisées de procédés de FA, selon les normes NF : E 67-001 et ISO 17296-2:2014E.

- La **photopolymérisation en cuve** / Vat photopolymerisation
- La **projection de matière** / Material jetting
- La **projection de liant (lit de poudre)** / Binder jetting
- La **fusion sur lit de poudre** / Powder bed fusion
- L'**extrusion de matière** (Material extrusion)
- Le **dépôt de matière sous flux d'énergie dirigée (poudre par projection)** / Direct Energy Deposition (DED)
- La **stratification de couche** / Sheet lamination

Le choix des procédés dépend de la typologie de matériaux à imprimer. Le tableau ci-dessous présente les matériaux associés à chacune de ces technologies :

Tableau 1 : Les 7 familles de procédés et les matériaux associés (Source : D&Consultants, 2016)

Matériaux	Photopolymérisation en cuve	Projection de matière	Projection de liant	Fusion sur lit de poudre	Extrusion de matière	Dépôt de matière sous flux d'énergie dirigée	Stratification de couche
Polymères	x	x	x	x	x		x
Métaux		x	x	x		x	x
Céramiques	x		x	x			
Composites	x	x	x	x			
Cires	x	x			x		
Bois							x

Ainsi, une multitude de technologies ont été développées au cours des dernières années. Dans la suite de cette étude, D&Consultants s'est attaché à traiter des **associations technologies-matériaux les plus prometteuses d'un point de vue industriel**. Pour cela, D&Consultants s'est appuyé sur les informations issues des entretiens qui ont été réalisés auprès de donneurs d'ordres positionnés sur les secteurs industriels visés par l'étude.

Parmi les sept familles de procédés décrites ci-dessus, seules quatre sont utilisées et/ou prometteuses pour l'industrialisation : la photopolymérisation en cuve, la fusion sur lit de poudre, l'extrusion de matière et le dépôt de matière sous flux d'énergie dirigée. Chacune de ces familles est sous-segmentée en technologies. La Figure 4 présente les technologies plus industrialisables selon les typologies de matériaux sur les secteurs visés par l'étude.

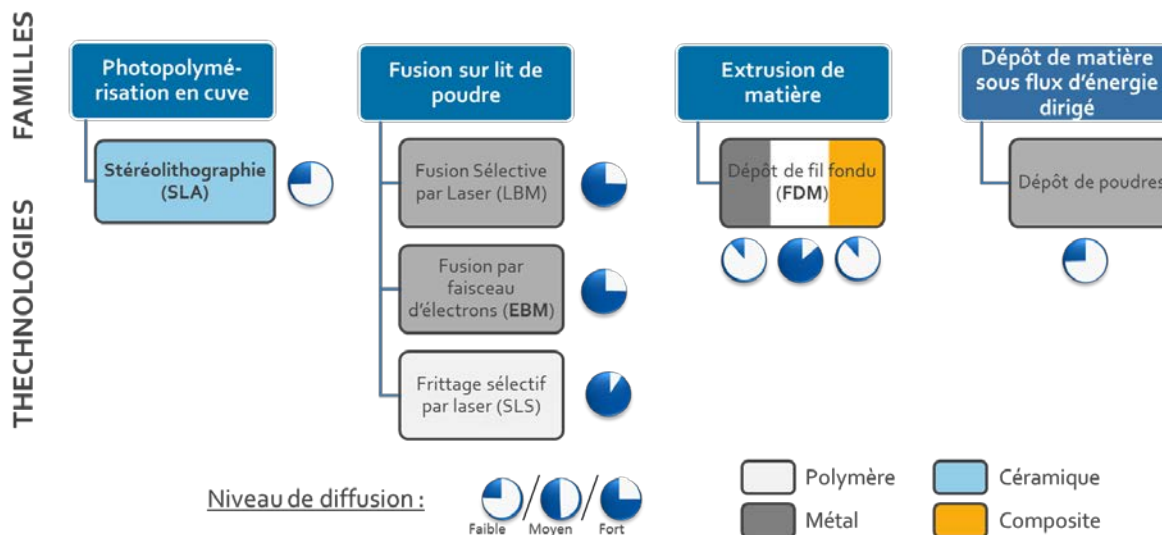


Figure 4 : Les technologies les plus utilisées et/ou prometteuses pour une application industrielle (Source : D&Consultants, 2016)

Ces technologies vont être détaillées ci-dessous par typologie de matériau. Afin de déterminer leurs niveaux de maturité, l'échelle « **Manufacturing Readiness Level** » (MRL) a été utilisée. Cette échelle diffère de l'échelle « Technology Readiness Level » (TRL) dans la mesure où elle intègre d'autres considérations telles que la **sécurité de l'approvisionnement en matière ou composants, la sécurité du procédé lui-même ou encore de disposer de la qualification adaptée des opérateurs**. Selon cette échelle, pour qu'une technologie soit considérée comme mature, il est nécessaire de **confirmer sa faisabilité d'une part, et d'autre part de s'assurer que les procédés de fabrication seront suffisamment bien maîtrisables et maîtrisés aux cadences attendues en phase de production et à des coûts économiquement compatibles avec le marché visé**⁵. L'échelle MRL s'applique donc bien à la technologie de FA dans la mesure où, pour qu'elle soit utilisée dans l'industrie, elle doit être capable de produire des pièces en série de manière fiable et reproductible.

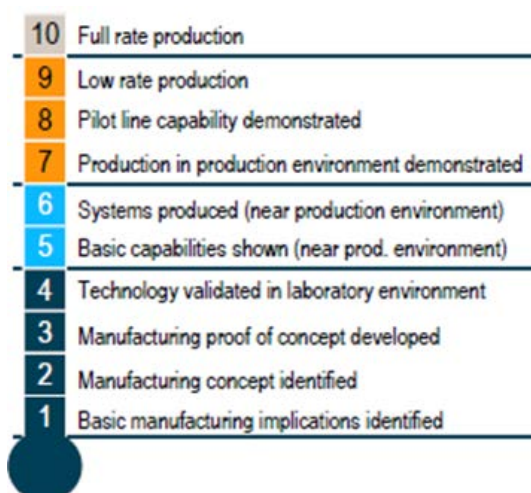


Figure 5 : Manufacturing Readiness Level (MRL) (Source: Roland Berger, 2013)

⁵ Réseau CTI (http://www.fcba.fr/sites/default/files/files/TRL%20Publications%20BD_page-page.pdf)

Ainsi, pour chacune des technologies sélectionnées, sont décrits ci-après :

- Le principe de fonctionnement
- Les principaux fabricants de machines
- Les avantages et inconvénients
- Les niveaux de maturité MRL

1. Les technologies appliquées aux polymères

▪ **Le frittage sélectif par laser (SLS pour Selective Laser Sintering)**

Le frittage sélectif par laser (SLS) est une technique de fabrication couche par couche à partir de poudres frittées grâce à l'énergie produite par un laser à forte puissance, tel qu'un laser CO₂ comme décrit dans la Figure 6 ci-dessous. Le marché des machines SLS est dominé par deux grands fabricants : l'américain **3D Systems** et l'allemand **EOS**.

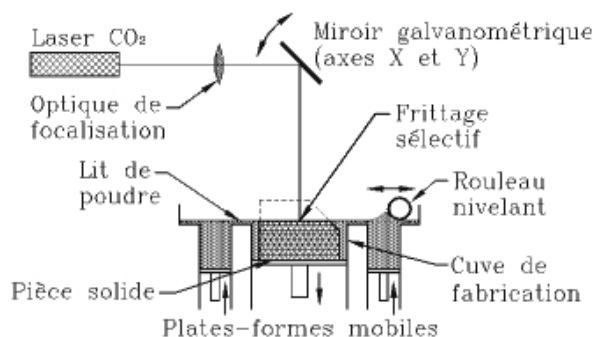


Figure 6 : Principe de fonctionnement de la technologie LBM (Source : A3Dm magazine, 2015)

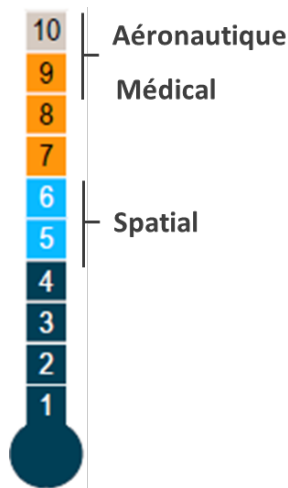
Cette technologie est plutôt utilisée pour la **fabrication de pièces de dimensions relativement importantes** (taille maximale : 55 x 55 x 76 cm); sa **vitesse d'impression élevée** et son **volume de construction important** étant ses deux principaux avantages. Cependant, la surface des pièces est souvent légèrement granuleuse.

Tableau 2 : Avantages et inconvénients de la technologie LBM

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Ne nécessite pas de support - Temps de fabrication rapide - Formes complexes - Volume de construction important - Diversité des pièces produites 	<ul style="list-style-type: none"> - Surface légèrement granuleuse - Pièces pouvant se déformer de façon significative

Le niveau de maturité du LBM diffère selon le secteur applicatif. Quelques exemples de réalisation sont présentés ci-dessous :

- Dans le **secteur aéronautique**, il y a déjà des pièces en vol fabriquées avec le procédé LBM. **Boeing** utilise le procédé LBM depuis 2002 pour la fabrication de **matériels de vols tels que**



des conduites d'air à la fois pour les programmes militaires et commerciaux⁶. Dassault Aviation a également utilisé le LBM pour la fabrication des tuyaux de conditionnement d'air de l'espace de repos de l'équipage du Falcon F7X⁷

- Dans le secteur du spatial, le CNES étudie actuellement le LBM pour la fabrication de pièces sur la partie satellite⁸

Figure 7 : Niveau de maturité de la technologie LBM par secteurs

▪ Dépôt de fil fondu (FDM pour Fused deposition modeling)

Le procédé de dépôt de fil fondu (FDM) consiste à fondre un polymère, généralement un thermoplastique type ABS, à travers une buse chauffée à haute température. Un filament en fusion ($\varnothing \sim 1/10^{\text{ème}}$ de mm) en sort, et est déposé en ligne et vient se coller par fusion sur le matériau préalablement déposé (cf. Figure 7). Les fabricants américains **MakerBot**, racheté par Stratasys, et **3D Systems** sont les leaders des imprimantes FDM.

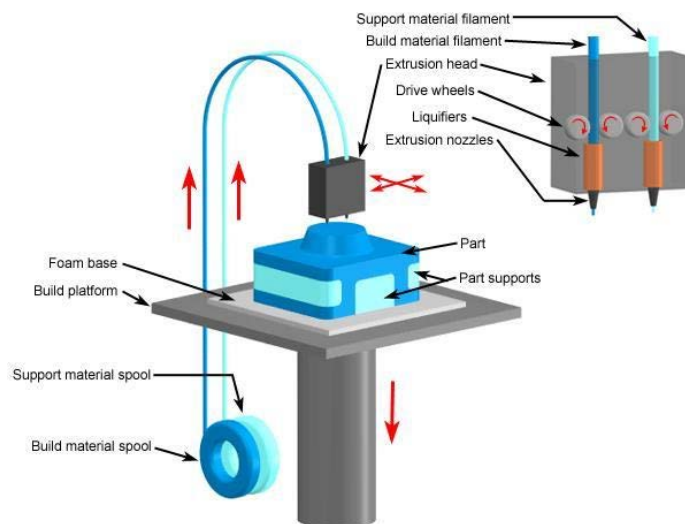


Figure 8 : Principe de fonctionnement de la technologie de procédé de dépôt de fil fondu (Source : CustomPartNet)

Le principal intérêt du FDM est sa **capacité à créer des pièces finales avec des thermoplastiques de qualité**. Le temps de fabrication reste néanmoins relativement long.

⁶ <https://www.naefrontiers.org/File.aspx?id=31590>

⁷ <http://www.cetim-certec.com/wp-content/uploads/2013/10/4-Panorama-de-la-fabrication-additive.pdf>

⁸ Entretien D&Consultants, 2016

Tableau 3 : Avantages et inconvénients de la technologie FDM

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Compatible avec un large choix de polymères thermoplastiques - Facilité d'utilisation et d'entretien - Grands volumes d'impression (de 10 cm³ à plus de 1 m³)⁹ - Résistance des pièces - Prix peu élevé 	<ul style="list-style-type: none"> - Etat de surface - Temps de fabrication

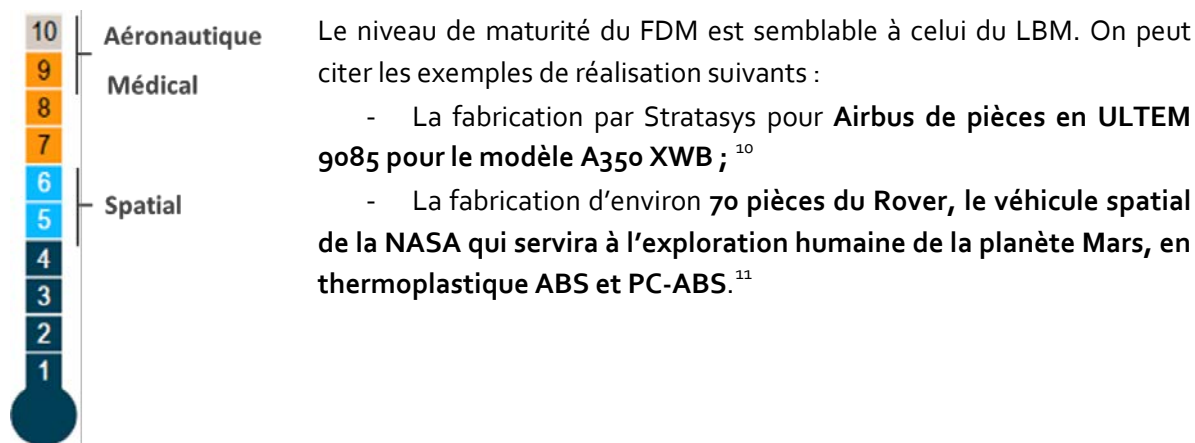


Figure 9 : Niveau de maturité de la technologie FDM par secteurs

Ainsi, la FA plastique constitue une technologie mature ayant atteint des MRL élevés. On assiste à une réelle démocratisation de la FA plastique. Les machines sont en effet de plus en plus robustes et de moins en moins onéreuses : le prix moyen d'une machine pour un usage industriel se situe aujourd'hui entre 30 000 et 40 000 € et la FA peut s'envisager jusqu'à 10 000 pièces par an.

2. Les technologies appliquées aux métaux

▪ Fusion Sélective par Laser (LBM pour Laser Beam Melting)

La **technologie de Fusion Sélective par Laser (LBM)** consiste à produire des pièces métalliques à l'aide de lasers de haute puissance, faisant fusionner progressivement et localement, c'est-à-dire de façon sélective, une poudre métallique dans une atmosphère contrôlée. On distingue trois fabricants de machines leaders sur ce marché : les allemands **SLM solution** et **EOS** et l'américain **3D Systems**.

⁹ <http://www.makershop.fr/blog/difference-fdm-depot-filament-sla-stereolithographie-quelle-technologie-pour-quelle-application-2/>

¹⁰ <http://www.3dnatives.com/airbus-stratasys-a350/>

¹¹ <http://www.cadvision.fr/etude-cas/le-rover-le-vehicule-spatial-de-la-nasa-a-des-pieces-fdm/>

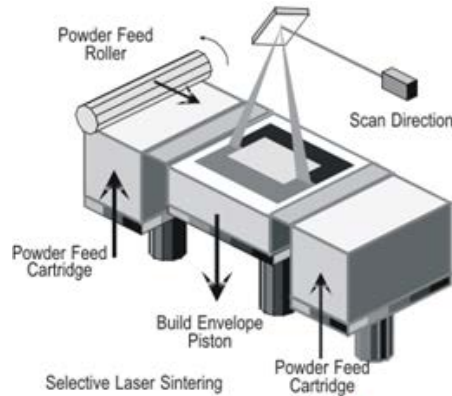
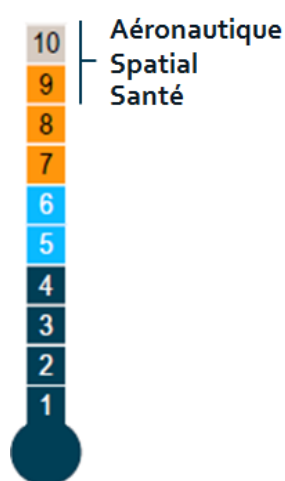


Figure 10 : Principe de fonctionnement de la technologie de procédé de Fusion Sélective par Laser (Source : Azom.com)

La capacité de fabrication des machines étant actuellement limitée, le LBM est aujourd'hui principalement utilisé pour la **fabrication de pièces de petites dimensions mais nécessitant une grande précision.**

Tableau 4 : Avantages et inconvénients de la technologie LBM

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Précision - Qualité de surface des pièces 	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de production (5 à 20 cm³/h)¹² - Présence de contraintes résiduelles - Nécessité d'avoir un support plan



La technologie SLM est la **technologie métallique la plus mature.** En effet, il existe déjà plusieurs exemples de réalisation à des niveaux avancés de maturité dans les secteurs aéronautique, spatial et de la santé. **Turbomeca**, motoriste leader pour hélicoptères, a lancé en 2015 la **production en série d'injecteurs de carburant du moteur Arrano ainsi que de tourbillonneurs de la chambre de combustion de l'Ardiden 3** avec le procédé de Fusion Sélective par Laser.¹³ La FA apporte plusieurs bénéfices : une économie de 15% de la consommation de carburant, à travers l'optimisation du design des pièces, et une simplification du processus de fabrication grâce à l'affranchissement de l'assemblage¹⁴. Le **CNES** utilise également le procédé SLM pour la **fabrication de pièces en aluminium sur la partie satellite et en base nickel sur la partie lanceur.**

Figure 11 : Niveau de maturité de la technologie SLM par secteurs

¹² file:///C:/Users/C3%Agline/Downloads/VAYRE_2014_archivage.pdf

¹³ http://www.safran-helicopter-engines.com/fr/media/20150109_turbomeca-introduit-la-fabrication-additive-dans-la-fabrication-de-ses-moteurs

¹⁴ <http://www.les-industries-technologiques.fr/actualite/limpression-3d-fait-decoller-linnovation-dans-lindustrie-aeronautique/>

▪ **Fusion par faisceau d'électrons (EBM pour Electron Beam Melting)**

Le **procédé de fusion par faisceau d'électrons (EBM)** est un procédé de fabrication additive dit à chaud, puisque la poudre de métallique est chauffée à une température entre 700 et 1000°C avant d'être fondue. Ces opérations sont effectuées par un faisceau d'électrons. Ce procédé utilise des chambres sous vide ou atmosphère contrôlée présentant ainsi l'avantage de protéger le matériau de l'oxydation pendant la fabrication de la pièce. Le niveau des contraintes résiduelles installées est ainsi réduit, ce qui diminue les risques de déformation ultérieurs lors d'opérations telles que l'usinage. Un seul fabricant commercialise aujourd'hui des machines fonctionnant selon ce procédé : **Arcam**.

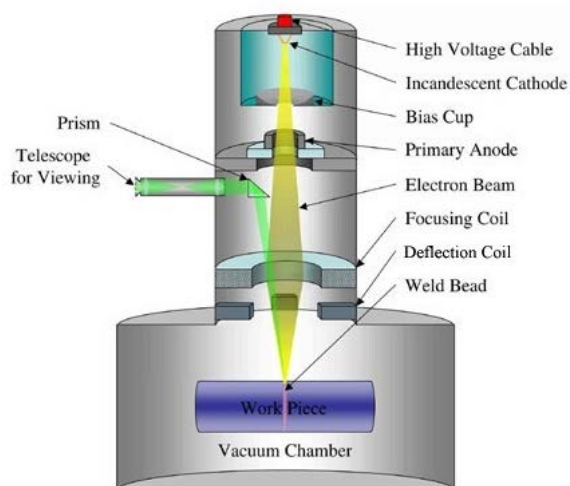


Figure 12 : Principe de fonctionnement de la technologie de procédé de fusion par faisceau d'électrons (Source : mechanicalengineeringblog.com)

Cette technique est généralement utilisée pour la **fabrication de pièces de taille comparable à ce qui se fait en LBM mais ne nécessitant pas une grande précision**. En effet, son point fort est sa vitesse de fabrication et son point faible le manque de précision.

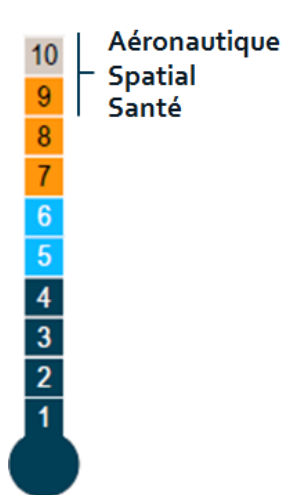
Tableau 5 : Avantages et inconvénients de la technologie EBM

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de fabrication (55 à 80 cm³/h)¹⁵ - Limitation des déformations - Réduction du besoin de renforts et de supports lors de la fabrication 	<ul style="list-style-type: none"> - Précision - Taille des pièces pouvant être fabriquées - Maîtrise de la métallurgie

Tout comme la technologie SLM, la technologie EBM est mature à la fois dans le secteur de l'aéronautique, du spatial et de la santé.

Dassault Aviation sous-traite la fabrication en série par EBM d'un **ensemble de pièces cellule en titane destinées au programme Falcon 5X**. En juin 2015, plus de 400 pièces avaient déjà été livrées à Dassault Aviation. Les avantages de ce procédé sont multiples pour Dassault Aviation : une

¹⁵ file:///C:/Users/C%C3%Agline/Downloads/VAYRE_2014_archivage.pdf



diminution des pertes matière de plus de 90 % par rapport au fraisage et une production simultanée jusqu'à 12 pièces de design différent dans la même cavité de fabrication, sans outillages¹⁶.

Le **CNES** s'intéresse également à ce procédé pour la fabrication de pièces en titane à la fois sur la partie lanceur et satellite. Des pièces sur la partie satellite volent déjà.

Figure 13 : Niveau de maturité de la technologie EBM par secteurs

▪ Dépôt de poudre sous flux d'énergie dirigé (DED)

Le **procédé de dépôt de poudre sous flux d'énergie dirigé** consiste à faire fondre des poudres métalliques à l'aide d'un laser et de déposer ces poudres couche après couche sur un substrat afin de construire le profil de pièce désiré. Plusieurs fabricants vendent actuellement des machines reposant sur cette technologie : l'entreprise française **BeAM** qui a développé le procédé **CLAD®** (Construction Laser Additive Directe), l'américain **Optomec** ou encore les allemande **Insteek** et **Trumpf**.

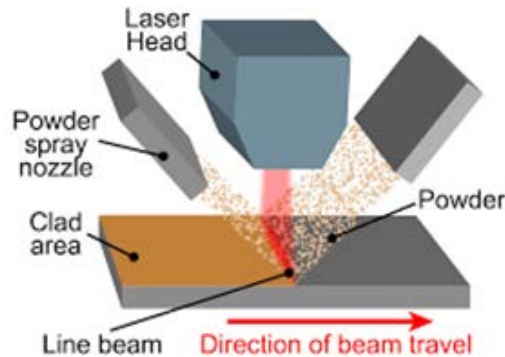


Figure 14 : Principe de fonctionnement de la technologie de procédé DED (Source : fabricatingandmetalworking.com)

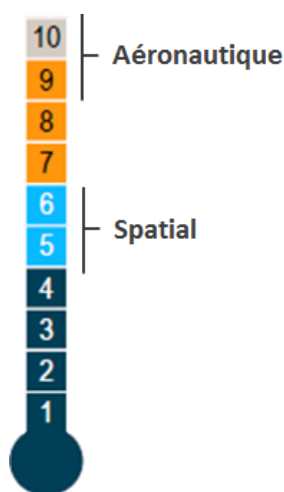
Le principal intérêt de ce procédé est la **possibilité de fabriquer des pièces de toute taille, contrairement aux autres procédés métalliques dont la taille des pièces est limitée par la taille de l'enceinte**. A titre d'exemple, la machine **CLAD® MAGIC** de Beam peut fabriquer des pièces de dimension 1500 x 800 x 800 mm. Cette technologie permet également de **rajouter de la matière sur des pièces existantes, dans le même matériau ou un matériau différent**. Une des opportunités découlant de cette possibilité de rajouter de la matière sur une pièce existante est de pouvoir

¹⁶ <http://www.applicationsadditivesavancees.fr/index.php/fr/notre-societe-2/3a-dans-les-medias?showall=1&limitstart=>

innover dans le domaine de la **réparation**. Cependant, les pièces fabriquées *via* ce procédé nécessitent de fortes reprises d'usinage, leur rugosité de surface étant importante.

Tableau 6 : Avantages et inconvénients de la technologie DED

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Rapidité de fabrication - Pas de limite de taille des pièces - Possibilité de rajouter des formes sur des pièces existantes - Possibilité de réaliser des pièces multi-matériaux - Réparation 	<ul style="list-style-type: none"> - Précision - Pièces présentant une rugosité de surface importante



Le procédé DED est **moins mature que les autres procédés métalliques en raison de son développement récent**. On peut tout de même citer l'exemple de **BeAM** qui en janvier 2015, avait déjà réparé plus de 700 pièces de turbines d'avion pour répondre à la demande de la société américaine **Chromalloy** de réparer des pièces pour **Pratt & Whitney**. Chromalloy, spécialiste de la réparation aéronautique, est à l'origine des qualifications obtenues auprès du fabricant de moteurs d'avion Pratt & Whitney en collaboration avec IREPA LASER pour la mise au point du procédé.

Figure 15 : Niveau de maturité de la technologie DED par secteurs

▪ Dépôt de fil fondu métallique (FDM pour Fused deposition modeling)

Le **procédé de dépôt de fil fondu métallique (FDM)** repose sur le même principe que le FDM plastique. Il consiste en effet à faire fondre une matière métallique à travers une buse chauffée à haute température. Un filament en fusion en sort, est déposé en ligne et vient se coller par fusion sur le matériau préalablement déposé. Tout comme pour le FDM plastique, les deux fabricants leaders de machines fonctionnant par ce procédé sont les américains **Sciaky** et le Norvégien **norsk titanium**.

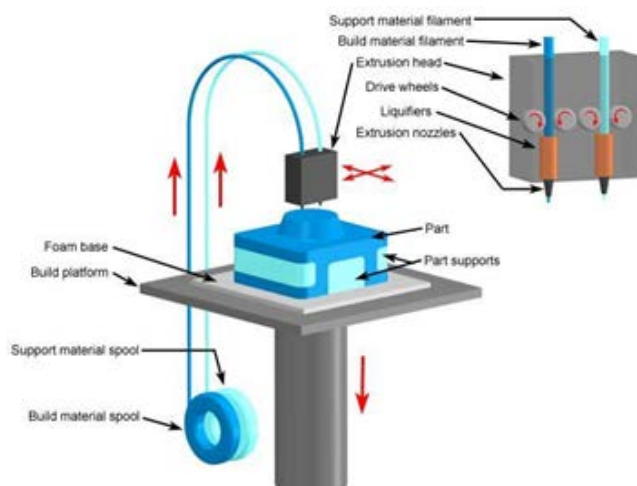


Figure 16 : Principe de fonctionnement de la technologie de procédé de dépôt de fil fondu (Source : 3dnatives)

Ce procédé présente l'avantage d'avoir de **grands volumes d'impression** et de permettre une **consolidation suffisante pour que les pièces présentent une bonne résistance** relativement au matériau utilisé. Mais la vitesse de fabrication est lente et l'état de surface des pièces mauvais, nécessitant le plus souvent une reprise d'usinage. Cette méthode permet d'obtenir des pièces près des côtes (near net shape).

Tableau 7 : Avantages et inconvénients de la technologie de dépôt de fil fondu

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Facilité d'utilisation et d'entretien - Grands volumes d'impression - Résistance des pièces 	<ul style="list-style-type: none"> - Etat de surface - Temps de fabrication

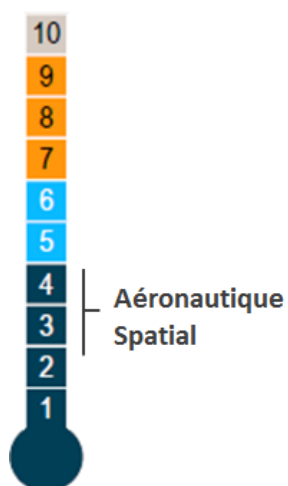


Figure 17 : Niveau de maturité de la technologie FDM par secteurs

Le procédé FDM métallique est encore peu mature, contrairement au FDM plastique. Quelques projets de recherche dans les secteurs aéronautique et spatial ont été identifiés, mais plusieurs limites techniques demeurent pour une utilisation à un stade industriel. Nous pouvons citer entre autre :

- Le procédé WAAM®, développé par l'université de Cranfield au Royaume-Uni, présente un intérêt pour des applications innovantes dans le domaine médical et spatial ;
- Sciaky, fabricant de machines américain, a également développé un procédé de dépôt de fil fondu métallique dont la source d'énergie est un faisceau d'électrons, nommée EBF3®¹⁷;
- Norsk Titanium, fabricant norvégien, a conçu une technique nommée DPM®¹⁸ consistant en un dépôt direct de fil par un procédé plasma ;¹⁹

¹⁷ Electron Beam Free Form Fabrication

¹⁸ Direct plasma manufacturing

¹⁹ Wohlers Report 2013

Ainsi, la FA métal est constituée de technologies ayant atteint des MRL relativement élevés mais avec un faible niveau de diffusion. Plusieurs limites d'ordre technologique freinent en effet son expansion :

- Les pièces ne sont pas utilisables directement en sortie de machine et nécessitent un post-traitement ;
- La taille des pièces est limitée par la capacité de la machine pour les technologies les plus matures ;
- La vitesse de fabrication est faible (20 cm³/h en 2015), rendant la FA envisageable jusqu'à 1 000 pièces par an ;
- Le coût de fabrication est élevé : 2,5 €/cm³ en 2015 ;
- Des investissements lourds : le prix d'une machine est situé entre 500 000 et 1 500 000 € (voir même 3 000 000 € pour les machines de dépôt de fil) ;
- Des contraintes HSE lourdes associées aux risques d'inhalation et d'explosion des poudres métalliques.

Des développements technologiques complémentaires sont donc nécessaires pour pouvoir disposer de machines à usage industriel. Un gain de productivité de 10 à 100 est attendu dans les prochaines années. On assiste notamment au développement de machines hybrides, associant une machine d'usinage (en générale fraiseuse) à un système de fabrication additive métallique, permettant d'obtenir des pièces avec un bon état de surface directement en sortie de machines.

3. Les technologies appliquées aux céramiques

Le procédé de **Stéréolithographie (SLA)**, repose sur la polymérisation couche par couche d'un monomère liquide photosensible par irradiation à l'aide d'un faisceau laser UV piloté par ordinateur. Une résine d'aspect liquide, composée d'un monomère et d'un photo-initiateur qui déclenche la réaction de polymérisation, est déposée sur le support de la pièce visible. L'épaisseur de la couche déposée peut être contrôlée par le réglage vertical de la profondeur du support. Selon les concepteurs, l'étape de fabrication suivante résulte d'un choix entre deux grandes familles de techniques²⁰.

²⁰ <http://epublications.unilim.fr/theses/2010/khalil-ali/khalil-ali.pdf>

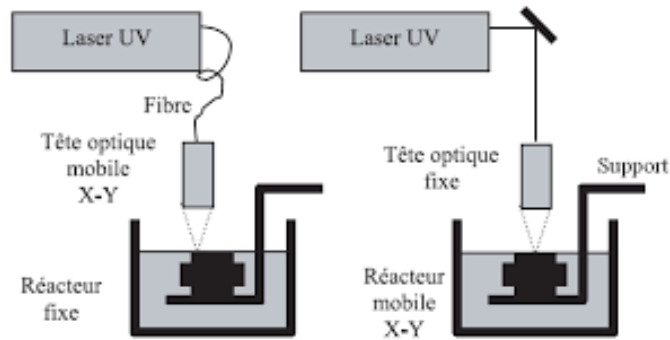


Figure 18 : Les deux grandes techniques de SLA 3D dans le cas de systèmes d'illuminations vectoriels (Source : Université de Limoges)

Ce procédé peut être utilisé pour produire des pièces en céramique en mélangeant des poudres céramiques (alumine, zircone, hydroxyapatite...) à une pâte composée de résine photosensible. La suspension une fois insolée forme un réseau polymère emprisonnant les particules minérales. Après polymérisation par laser, un traitement thermique (déliantage puis frittage) de l'objet permet d'obtenir une céramique dense²¹.

Tableau 8 : Avantages et inconvénients de la technologie de Stéréolithographie

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Réalisation de structures complexes comportant des parties très fines (0,005 mm) - Plusieurs matériaux céramiques disponibles - Faible rugosité (<1µm) 	<ul style="list-style-type: none"> - Difficultés pour fabriquer des volumes fermés



Figure 19 : Niveau de maturité de la technologie SLA par secteurs

La technologie SLA est actuellement la plus mature pour des **applications en médical**. Des **implants crâniens** et **maxillaires** ainsi que des **substituts osseux** (cages inter-vertébrales et cales d'ostéotomie-tibiale) sont en effet déjà fabriqués en petites séries par l'entreprise limougeaude **3DCeram**.

Les pièces obtenues par les procédés actuels présentent une **surface très poreuse**, ce qui limite la robustesse de l'objet final et donc les applications possibles dans les domaines du spatial et de l'aéronautique. Nous pouvons noter certains travaux de recherche récents qui pourraient permettre de surmonter cet écueil tels que ceux de chercheurs du laboratoire HRL, détenu par Boeing et General Motors et basé à Malibu en Californie, qui ont mis au point un procédé permettant d'imprimer par stéréolithographie

un matériau céramique, capable de résister à des températures allant jusqu'à 1 700 °C et présentant une solidité dix fois plus élevée que les autres céramiques imprimées en 3D.²²

4. Les technologies appliquées aux composites

²¹ <https://fr.wikipedia.org/wiki/St%C3%A9r%C3%A9olithographie>

²² <http://www.industrie-techno.com/impression-3d-une-ceramique-ultraresistante-pour-le-spatial.41928>

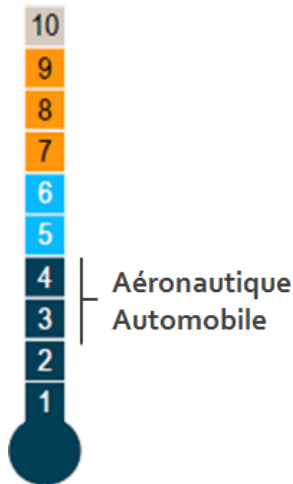


Figure 20 : Niveau de maturité des technologies appliquées aux composites

La première machine de fabrication de pièces en matériaux composites a été développée par l'entreprise américaine **MarkForged**. Il s'agit de l'imprimante **Mark One**.²³ Cette machine repose sur la technologie FDM et dispose de **deux têtes d'impression** : une pour le **plastique extrudé** et l'autre capable de **déposer un fil continu de fibre de carbone, de fibre de verre ou de Kevlar**.

Au sein des secteurs applicatifs visés par l'étude, quelques projets portant sur la FA de composites ont été identifiés en aéronautique et en automobile mais à des niveaux de maturité encore faibles :

- Premium Aerotec en partenariat avec Airbus Operations GmbH, Fraunhofer ICT-FIL et Coriolis Composites GmbH s'est lancé dans un projet de **fabrication et d'assemblage des cadres de portes et de soutes à partir de plastique à renfort fibre de carbone** ;
- Local Motors, Cincinnati Inc., Oak Ridge National Labs et SABIC (US) ont fabriqué des **pièces automobiles à partir de thermoplastique renforcées en fibres de carbonées**.

1.3.2. Les technologies d'impression appliquées aux tissus biologiques

Il existe **trois principales familles de technologies de bio-impression 3D**, qui peuvent être sous-segmentées du fait de l'adaptation de ces technologies aux besoins de la Recherche :

- **L'impression à jet d'encre (thermique et acoustique) ;**
- **L'impression à micro-extrusion (pneumatique et mécanique) ;**
- **L'impression assistée par laser.**

Les technologies **les plus utilisées actuellement sont l'impression à jet d'encre**, première méthode utilisée par adaptation d'une imprimante classique à jet d'encre à du biomatériau, et **l'impression à micro-extrusion**. L'impression assistée par laser est pour l'instant moins courante, potentiellement en raison de son coût plus élevé et du temps de préparation nécessaire.

Il faut noter que le domaine de la bio-impression 3D se complexifie *via* la mise au point de **bio-imprimantes hybrides pouvant posséder jusqu'à trois technologies au sein d'une même bio-imprimante** et pouvant ainsi répondre à tous les besoins de l'utilisateur, notamment concernant le type de bio-encre et cellules.

²³ CETIM

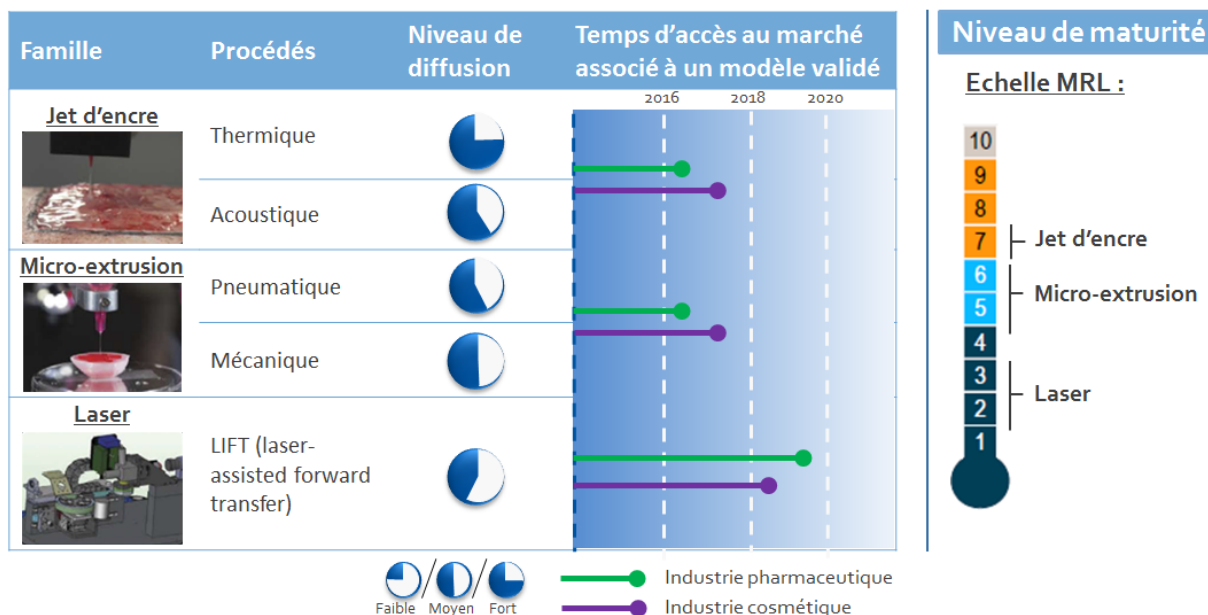


Figure 21 : Caractérisation des différentes technologies de bio-impression 3D (Source : D&Consultants, 2016)

Il existe encore **peu de tissus bio-imprimés commercialisés** pour pouvoir démarquer réellement une technologie plutôt qu'une autre. Le prix peut être un des critères de sélection, l'impression à jet d'encre étant l'une des moins onéreuses, suivi de l'impression à micro-extrusion puis de l'impression assistée par laser. Néanmoins **les prix tendent à s'homogénéiser**, en particulier entre les technologies à jet d'encre et à micro-extrusion. **L'utilisation finale est également un critère de sélection** : l'impression à micro-extrusion étant plus adaptée pour la bio-impression 3D de tissus complexes que celle à jet d'encre et l'impression assistée par laser permettant de bio-imprimer des architectures particulières de tissus de façon plus fine et précise. C'est pourquoi les **bio-imprimantes hybrides sont certainement la clé des futures applications de bio-impression 3D**.

1.3.3. Les technologies d'impression appliquées aux matières alimentaires

▪ Applications industrielles

Au cours de son étude documentaire et de ses entretiens, D&Consultants n'a pas identifié de technologie de FA permettant d'imprimer des matières alimentaires pour une utilisation industrielle. **Aucune des technologies développées n'a en effet atteint un niveau de maturité suffisamment élevé pour convenir aux cadences de production de l'industrie agro-alimentaire.**

Certains industriels ont tout de même intégré la FA au sein de leur stratégie de développement et/ou d'innovation à travers des applications autres que la fabrication de produits destinés à être vendus aux consommateurs.

Nous pouvons citer l'exemple de **Poult**, fabricant à Montauban de tartelettes, fourrés, etc. et spécialiste de la marque de distributeur et de la sous-traitance pour les grandes marques. Poult a acquis une imprimante 3D de la société MakerBot, machine reposant sur le même procédé que celui du FDM. **Poult intègre cette nouvelle technologie dans le cadre de sa démarche d'innovation pour la réalisation de prototypes avant de se lancer dans l'industrialisation à grande échelle.**

L'objectif est alors de gagner du temps : la FA permet à l'entreprise de passer d'un mois d'attente à quelques heures pour la création d'un prototype.²⁴

La plupart des industriels ont engagé une démarche **de veille marketing afin d'anticiper les besoins et attentes des consommateurs et ainsi de se préparer aux nouvelles habitudes de consommation du grand public**. Le but est de pouvoir répondre à la question suivante : **les consommateurs sont-ils prêts à acheter des formes déjà réalisées ou préféreraient-ils les réaliser eux-mêmes ?**











Certains grands acteurs de l'industrie agroalimentaire misent plutôt sur la deuxième solution et se sont lancés dans des projets dont la finalité est la **vente de machines et/ou de cartouches de consommables**. **Barilla**, leader international des pâtes alimentaires, travaille ainsi avec l'entreprise néerlandaise **TNO Eindhoven** pour développer des machines capables d'imprimer des pâtes aux formes souhaitées à une cadence élevée : une vingtaine de pièces en 2 minutes. L'objectif est d'offrir au consommateur l'opportunité **d'imprimer des pâtes personnalisées**. Le modèle commercial pour Barilla devrait reposer principalement sur la **vente des cartouches de consommables**.²⁵

La FA présente également un intérêt pour l'industrie agroalimentaire sur la **conception d'outillages industriels (moules, emballages, etc.)** ainsi que la **fabrication de pièces de rechange sur les lignes de production**. L'un des équipementiers de Poult fabrique en effet déjà certaines pièces de rechange en FA.

▪ Applications grand public

Contrairement au secteur industriel, plusieurs entreprises se sont lancées sur le **marché des imprimantes 3D spécialisées dans l'alimentaire et destinées aux particuliers et aux professionnels** tels que les artisans et les restaurateurs. Ces entreprises vendent à la fois les machines et les cartouches de matières premières. Parmi les fabricants, on distingue de nombreuses start-ups et quelques leaders des machines de fabrication additive comme le montre le Tableau 9 ci-dessous.

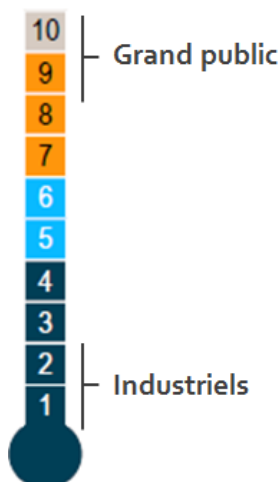
Tableau 9 : Exemples de machines pour l'impression de matières alimentaires

Fabricant	Imprimante	Aliments	Prix	Illustration
3D Systems 	3D CocoJet	Chocolat	Elevé → Peu accessible au grand public	
Natural Machines + Hersheys 	Foodini (intégration de la cuisson)	Sucreries, des gâteaux, des pizzas, des pâtes ou des amuse-gueules	~ 1 000 €	
XYZPrinting 	Food 3D Printer	Chocolat, pâtes...	1 800 \$	
Structur3D 	Discov3ry	Matières tendres et pâteuses (pâtes à tartiner, glaçages...)	249 \$	
StoreBound 	Pancakebot	Pâte à pancake	~ 150 \$	

²⁴ <http://www.lequotidienlesmarches.fr/le-biscuitier-poult-mise-sur-l-imprimante-3d-art373248-81.html>

²⁵ <http://food.zominutes-blogs.fr/tag/poult>

■ **Niveaux de maturité des secteurs industriels et grand public**



Ainsi, les niveaux de maturité diffèrent en fonction des secteurs visés :

- **Les machines destinées à des applications industrielles sont à de très faibles niveaux de MRL.** Aucune technologie n'a en effet été développées pour atteindre des vitesses de fabrication suffisamment élevées pour répondre aux problématiques de ce secteur ;
- **Les machines pour des applications grand public sont déjà disponibles sur le marché et présentent donc un niveau de MRL élevé.**

Figure 22 : Niveau de maturité de la FA en agro-industrie

1.3.4. Synthèse sur l'état des lieux technologique de la FA

L'investigation réalisée au travers de l'analyse des différents matériaux pouvant être imprimés et des technologies utilisées et/ou prometteuses pour l'industrialisation associées ont permis de caractériser les horizons de temps de leurs déploiements commerciaux comme indiqué Figure 23. A noter que les prix indiqués sont des prix moyens constatés, pouvant varier en fonction des technologies, des fournisseurs, des volumes de commande, etc. :

Polymère	Métal	Céramique
<ul style="list-style-type: none"> • Technologies matures avec encore des gisements de création de valeur à capter • Machines à 30-40k€ 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologies moins matures avec faible déploiement commercial. Un gain de productivité de 10 à 100 attendu • Machines à 500-1500k€ 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologies matures pour les applications en santé • Néanmoins, immatures pour les transports (notamment spatial)
Marché développé	Déploiement 2018/20	Déploiement 2018/20

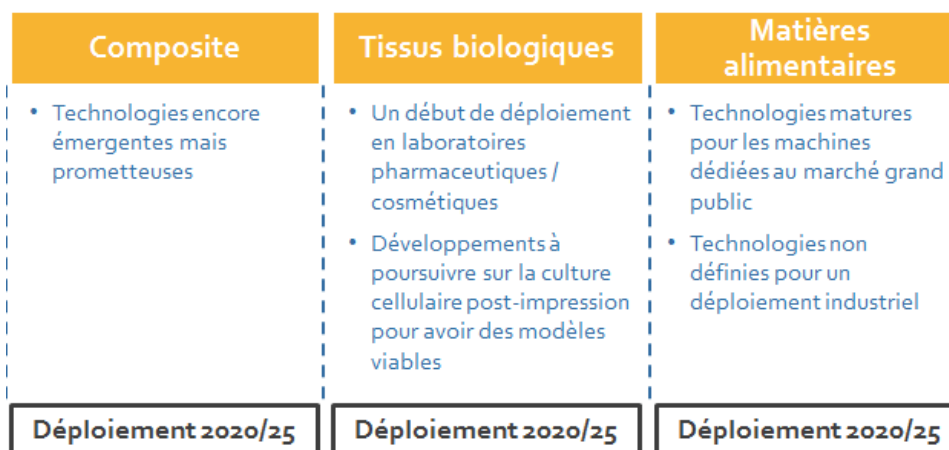


Figure 23 : Déploiements commerciaux des technologies de FA par types de matériaux (Source : D&Consultants, 2016)

1.4. Les usages de la FA

▪ Les typologies de fabrication

On distingue quatre typologies d'usages pour des applications industrielles de la FA comme décrit dans la Figure 24 ci-dessous :



Figure 24 : Les quatre typologies de fabrication de la FA (Source : D&Consultants, 2016)

Le **prototypage rapide** est l'application commerciale la plus développée à l'heure actuelle. D'après le cabinet d'étude américain Wholers Associates, cette application couvre près de **70% des transactions marchandes totales de la FA**. Les prototypes sont principalement réalisés en polymères. L'utilisation de la FA pour la réalisation des prototypes permet de réaliser des économies de temps et d'argent. Ainsi, par rapport aux techniques conventionnelles, les **coûts de fabrication peuvent être réduits d'un facteur dix et le cycle de production raccourci de quelques semaines à quelques heures**.

L'**outillage rapide** désigne les technologies permettant de fabriquer un outil, plus rapidement (entre **20% et 40% plus rapide**) qu'avec un procédé conventionnel, à partir d'un modèle numérique en 3D. La FA peut par exemple être utilisée pour la **fabrication de moules ou de noyaux pour l'injection ou la fonderie**.

La **fabrication directe** consiste à **produire des pièces ou des sous-ensembles finis et fonctionnels**. Ces pièces sont directement implantées dans le produit ou l'environnement d'usage définitif. Au cours des dernières années, la FA était plutôt économiquement appropriée pour la fabrication de pièces uniques, voire de petites séries (jusqu'à quelques dizaines de pièces). Les récents développements technologiques ont permis la montée en cadence des productions, rendant la **fabrication de moyennes séries (jusqu'à plusieurs milliers de pièces par an) viable**.

économiquement. La taille des séries est généralement fonction de la complexité et de la taille des pièces à fabriquer : plus la pièce à fabriquer est complexe et sa taille est importante, plus la série sera réduite. Cet usage connaît aujourd'hui une **très forte croissance**.

Enfin, la FA peut être utilisée pour la **réparation de pièces**, *via* les techniques de «rechargement» de pièces abîmées par **projection de poudre (DED)**.

▪ Les typologies de pièces

La conception des pièces en FA se fait généralement en **trois temps** comme indiqué Figure 25 :



Figure 25 : Les trois typologies de pièces pouvant être produites en FA (Source : D&Consultants)

Tout d'abord, **l'iso-design correspond à la substitution des procédés conventionnels par la FA, sans modification du design initial de la pièce.** Dans la majeure partie des cas, la FA n'est pas avantageuse économiquement par rapport aux procédés conventionnels. Mais dans certains cas tels que pour la **production de pièces unitaires voire de petites séries**, ou lorsque les **procédés conventionnels sont coûteux en outillage**, la FA de pièces à iso-design peut présenter un intérêt économique.

Dans un deuxième temps, **l'intégration de fonctions consiste à réaliser de petites modifications de conception sur des pièces existantes afin d'intégrer des fonctions supplémentaires jusque-là impossibles à obtenir en fabriquant la pièce *via* les procédés conventionnels.** Ce principe peut ainsi permettre de s'affranchir de l'assemblage de plusieurs sous-ensembles par exemple.

Enfin, **l'optimisation topologique consiste à éliminer la matière là où les efforts ne transitent pas à l'aide d'un logiciel dédié.** L'optimisation topologique peut permettre d'atteindre un **gain de masse de 70% tout en conservant une résistance mécanique** répondant au cahier des charges. Cette technique apporte en conséquence un avantage économique pouvant être très important dans le cas de matériaux à coût élevé tel que le titane.

1.4.1. Les usages dans le secteur du transport

▪ Aéronautique

Dans le secteur aéronautique, la **FA couvre déjà l'ensemble des quatre typologies de fabrication** :

- **Tous les donneurs d'ordre interrogés** au cours de l'étude par D&Consultants (équipementiers, constructeurs et motoristes) **réalisent ou sous-traitent la réalisation des prototypes en FA** ;
- **Certains acteurs fabriquent actuellement leurs outils pour leurs besoins internes**, tels que des préhenseurs de robots, avec la technologie FA ;

- **Quelques donneurs d'ordre ont déjà des pièces fabriquées en FA qui volent ou en cours de qualification.** Il s'agit actuellement de pièces de catégorie 3 en petites séries, mais on se dirige petit à petit vers des pièces de fatigue de catégorie 2 telles que des pièces de mât réacteur ;
- **Seuls les motoristes utilisent la FA à des fins de réparation actuellement.** Les constructeurs et équipementiers envisagent de se positionner sur cette application à court ou moyen termes.

A titre d'exemple, chez les motoristes, le **canadien Pratt & Whitney fabrique en série depuis plus d'un an des composants pour le moteur PurePower**. 500 pièces par an seraient ainsi produites en FA, principalement en alliage de titane et en alliage de nickel. Ces pièces ne sont pour l'instant que des pièces non tournantes et non exposées à de fortes températures (pièces de fixation, buses d'injection ou collecteurs de carburant).²⁶ **Son concurrent américain General Electric et le français Safran ont conjointement développé l'injecteur de carburant du moteur LEAP en FA.** La production de cet injecteur a débuté dès 2015 à un volume de 30 000 buses par an.²⁷ Les avantages affichés par l'utilisation de la FA comparativement à un procédé conventionnel sont entre autre l'affranchissement de l'assemblage d'une vingtaine de pièces différentes, la multiplication de la durée de vie des pièces par cinq grâce à la nouvelle conception.²⁸

Parmi les constructeurs, **Airbus et son concurrent Boeing utilisent déjà la FA pour la fabrication de certaines pièces de l'A350, de l'A320 et du Boing 787 Dreamliner.**²⁹

Dans le secteur aéronautique, **la grande majorité des pièces produites en FA sont à iso-design ou avec intégration de fonctions. C'est le coût qui aujourd'hui drive le choix de réaliser une pièce en FA ou non.** L'optimisation de la conception (géométrie et fonctions) participe également largement à l'équation économique.

Les technologies de FA étant encore peu matures, l'optimisation topologique implique aujourd'hui des coûts supplémentaires pour une pièce remplissant la même fonction. Or, les clients ne sont pas prêts à payer plus cher, même si l'optimisation topologique pourrait apporter un gain de masse/performance important. Il faudra donc miser sur les futures démarches d'amélioration continue des programmes en vigueur et surtout attendre **l'arrivée des nouveaux programmes aéronautiques d'ici 2025 pour passer à l'intégration de fonctions et à l'optimisation topologique.** D'ici là, les coûts liés aux machines et aux matières premières auront diminué et les technologies auront gagné en maturité industrielle.

▪ Spatial

Dans le secteur spatial, **la FA est utilisée actuellement pour le prototypage rapide et pour la fabrication directe.** La FA permet de réaliser des maquettes afin de visualiser l'encombrement

²⁶ <http://www.3dnatives.com/pratt-whitney/>

²⁷ CETIM

²⁸ <http://www.industrie-techno.com/ge-vise-les-100-000-pieces-imprimees-en-3d.39876>

²⁹ <http://www.ouest-france.fr/economie/entreprises/airbus/airbus-presente-un-avion-de-4-metres-imprime-en-3d-4280398>

d'une pièce par exemple. Cette technique se prête bien à la production de pièces dans ce secteur. **Les volumes de production sont en effet généralement faibles (au maximum 1 000 pièces / an environ) voire unitaires et les pièces sont peu soumises aux problèmes de fatigue et de certification** que l'on retrouve dans le secteur aéronautique.

La **sonde Juno** lancée en 2011 à destination de Jupiter et construite par l'industriel américain **Lockheed Martin** était constituée d'une **douzaine de pièces fabriquées en FA**. Il s'agissait principalement de **pièces de support**. Lockheed Martin continue les développements dans ce domaine. Il a ainsi testé des réservoirs de carburant en FA pour son satellite A2100 il y a 2 ans et prévoit que, d'ici quelques années, **la moitié des pièces constituant ses satellites soient produites par FA métallique**.³⁰

Le français **Airbus Defense and Space** s'est également lancé sur la FA depuis 2008. Le **satellite Atlantic Bird 7**, lancé en 2011, embarquait un élément de **support d'antenne en titane produit en FA**. En 2014, une pièce intégrant un **réseau capillaire en aluminium permettant de dissiper la chaleur**, ne pouvant être produite *via* les procédés conventionnels, a été mise en vol.

Altran Italia, Thales Alenia Space et l'Institut Italien de Technologies, sous l'égide de l'Agence Spatiale Italienne ont conçu une machine permettant d'imprimer du PLA baptisée « Portable Onboard Printer 3D » qui a été envoyée dans l'espace en 2016. La mission européenne a consisté à **réaliser une impression 3D avec les conditions gravitationnelles de la Station Spatiale Internationale : le 0 gravité**. L'objet produit dans l'espace sera ensuite comparé sur Terre avec des objets géométriques identiques.³¹

Les acteurs du spatial ont commencé à **réaliser des pièces à iso-design en FA à compter de 2011-2013**. Plusieurs pièces sont en vol actuellement. **L'intégration de fonctions fait déjà partie des réalités de ce secteur**. La pièce intégrant un réseau capillaire en aluminium conçue par Airbus Defense and Space fait en effet partie de cette typologie de pièces. **L'allègement étant un fort enjeu pour l'industrie spatiale, des projets de recherche intégrant l'optimisation topologique de pièces sont en cours**.

▪ **Automobile**

Le secteur automobile **utilise depuis déjà plusieurs années la FA dans le cadre du prototypage rapide**. La FA est également utilisée pour **fabriquer des outils spécifiques et adaptés pour une utilisation sur les lignes d'assemblage afin d'optimiser la productivité**. Au regard du niveau de maturité des technologies, des vitesses de production et des coûts de production associés, la FA ne peut rivaliser avec les procédés conventionnels pour les productions en grande quantité de pièces relativement simples (les séries pouvant atteindre un ordre de grandeur du million de pièces par an). La FA reste néanmoins une méthode bien adaptée aux productions en petite série de pièces complexe. Ainsi, **la personnalisation et les éditions limitées, les voitures de grand luxe et le sport automobile** sont des applications envisageables par la FA.

³⁰ <http://www.usinenouvelle.com/article/l-impression-3-d-deja-en-production.N285820>

³¹ <https://www.thalesgroup.com/fr/worldwide/espace/magazine/impression-3d-dans-lespace-succes-de-la-premiere-mission-europeenne>

A titre d'exemple, le constructeur allemand **BMW fabrique déjà certaines pièces mécaniques complexes en FA** telle que la **roue de la pompe à eau de sa voiture de course Z4 GT3**, ou encore sur la version **Z4 GTR** commercialisée.³²

La **grande majorité des pièces est actuellement réalisée à iso-design**. L'optimisation topologique pourrait permettre de réduire les coûts directs à travers l'économie de matières premières associée aux tailles de séries. Mais les cadences de production de l'automobile étant trop élevées pour la FA qui est encore faiblement industrialisée, certains constructeurs estiment que **la FA ne pourra pas être utilisée pour les grandes séries avant 20 ou 30 ans**.

▪ Ferroviaire

L'utilisation de la FA dans le secteur ferroviaire reste émergente. Nous pouvons citer l'exemple de la **SNCF** qui a intégré la FA pour suppléer **sa supply chain**, lorsque les délais d'approvisionnement sont trop longs. Elle a ainsi produit en FA des pièces de visserie pour ses matériels roulants ainsi que des supports en matériaux polymères.

1.4.2. Les usages dans le secteur de la santé (hors bio-impression)

Le **secteur de la santé étant très demandeur de personnalisation**, la FA constitue une technologie bien adaptée à ce domaine. On distingue trois typologies de fabrication dans ce secteur :

- Le **prototypage rapide** : des **maquettes d'éléments du corps humain à taille réelle et personnalisées sont réalisées pour permettre aux étudiants de se former et aux chirurgiens de s'exercer avant une opération**. Le CHU de Montpellier réalise dans le cadre des FIV des impressions 3D d'embryons modélisés afin d'observer plus facilement la « santé » de l'embryon et de sélectionner ceux qui ont le plus de chances de s'implanter dans l'utérus et donc de donner lieu à une grossesse.³³ Un autre exemple imprimé par le CIRIMAT de l'Université de Toulouse III : la reconstitution mandibulaire 3D en polymère, réplique exacte de celle de la patiente, sur laquelle la plaque en titane utilisée pour la reconstruction a ainsi pu être préformée plusieurs jours avant l'intervention³⁴;
- **L'outillage rapide** à travers la **fabrication d'instruments chirurgicaux sur mesure tels que des kits de coupe ou kits de forage**. Imascap, société fondée en 2009 et basée dans le Finistère, propose ainsi la réalisation d'un guide chirurgical pour le forage de l'humérus spécialement adapté au patient pour permettre au chirurgien de respecter l'angle optimal de forage³⁵;
- La **fabrication directe de dispositifs médicaux sur mesure**, implantables et non implantables, à partir des caractéristiques anatomiques du patient obtenues par imagerie médicale. Il est ainsi possible d'imprimer des **implants crâniens, dentaires, orthopédiques**

³² <http://www.additive.com/l-impression-3d-et-l-industrie-automobile/>

³³ <http://www.midilibre.fr/2016/05/17/impression-3d-les-avancees,1333665.php>

³⁴ <http://www.univ-tlse3.fr/l-impression-3d-au-service-des-chirurgiens-ori-une-premiere-a-toulouse--629764.kjsp>

³⁵ <http://www.sciencesetavenir.fr/sante/20140605.OBS9635/imascap-pour-une-chirurgie-augmentee-de-l-epaule.html>

ainsi que des appareils auditifs, des semelles ou encore des exosquelettes. Une part importante du marché des prothèses dentaires et auditives a déjà adopté la technologie FA.

La fabrication additive a ainsi **déjà largement remplacé les méthodes de production conventionnelles pour les couronnes / bridges dentaires et les implants personnalisés.**

1.4.3. Les usages dans le secteur de l'agro-industrie

Comme présenté en partie 1.3.3, aucune des technologies développées pour l'impression de matières alimentaires n'a atteint un niveau de maturité suffisamment élevé pour convenir aux cadences de production de l'industrie agro-alimentaire. **La seule typologie de fabrication pouvant être appliquée à l'impression de matières alimentaires est donc le prototypage rapide,** déjà utilisé par certains industriels tel que le biscuitier Poulit.

Il a également été indiqué plus haut que la FA présente également un intérêt pour la **conception d'outillages industriels (moules, emballages, etc.) ainsi que la fabrication de pièces de rechange sur les lignes de production.**

A noter que l'intégration de fonctions et l'optimisation topologique ne présentent pas d'intérêt au sein de ce secteur. **Seules des pièces à iso-design sont réalisées pour le dépannage des lignes de production.**

1.4.4. Synthèse sur les usages de la FA

Les secteurs associés au transport, c'est-à-dire l'aéronautique, le spatial, l'automobile et le ferroviaire, présentent un intérêt pour toutes les typologies de fabrication identifiées comme le montre la Figure 26 ci-dessous.

On peut classer les secteurs en trois catégories selon leur niveau de maturité actuel et à venir vis-à-vis des typologies de fabrication :

- Les **secteurs aéronautique, spatial et de la santé** se démarquent au regard de leur niveau de maturité déjà avancée sur les typologies de fabrications visées ;
- **Le secteur du ferroviaire** n'en est pas moins prometteur, mais à moyen terme sur certaines typologies de fabrications ;
- Les **secteurs de l'automobile et de l'agro-industrie** sont les secteurs les moins adaptés à la FA au regard de leurs tailles de séries.

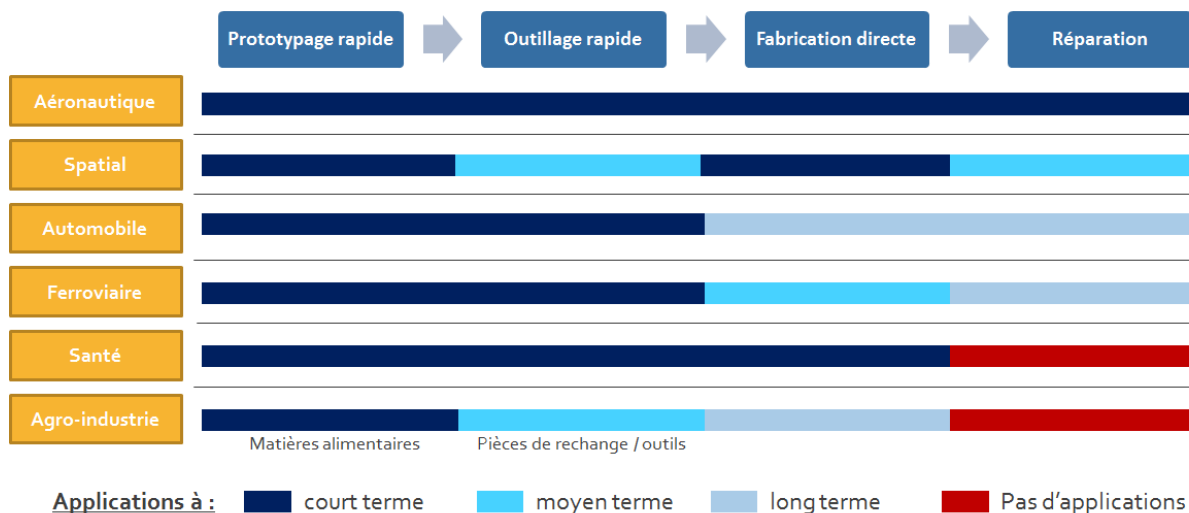


Figure 26 : Synthèse des perspectives des typologies de fabrications par secteur applicatif (Source : D&Consultants, 2016)

La santé et le spatial sont les secteurs les plus matures pour des usages de fabrication rapide, l'aéronautique étant freiné par des problématiques de qualification/certification longues et coûteuses.

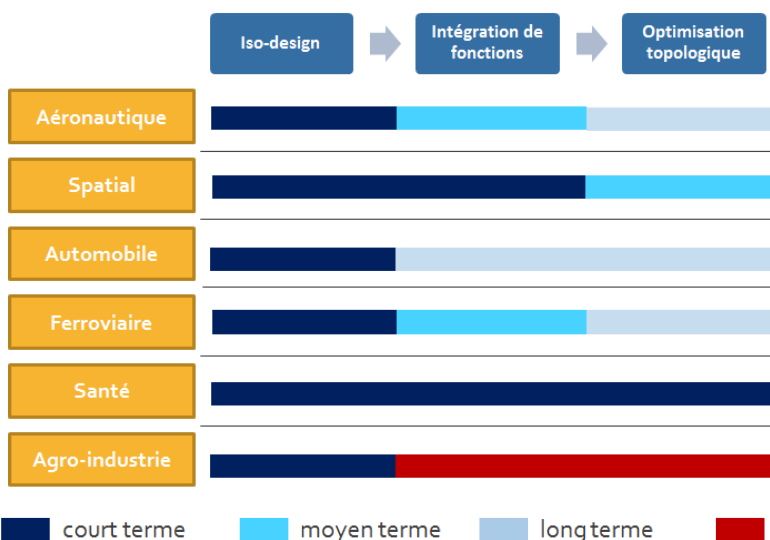


Figure 27 : Synthèse des perspectives des typologies de pièces par secteur applicatif (Source : D&Consultants, 2016)

2. LE MARCHE DE LA FA

2.1. Les données clés du marchés

2.1.1. Le marché mondial de la FA

Selon le rapport Wohlers de 2016, le marché mondial de la FA pesait **5,165 milliards de dollars en 2015 (4,75 Mds€)**, avec un taux de **croissance annuel de 25,9 %**. On constate un léger ralentissement du marché qui enregistrait ces trois dernières années une croissance annuelle moyenne de 34%.³⁶ La firme américaine A.T. Kearney estime que le marché mondial devrait continuer à croître avec un taux de croissance annuel moyen (TCAM) de 25% d'ici 2020 pour atteindre la somme de 17,2 milliards de dollars.³⁷

Les segments les plus porteurs seront la FA métallique, marché à forte valeur ajoutée, et les machines d'impression 3D.³⁸ Néanmoins, pour l'instant, le métal reste minoritaire par rapport aux polymères, dont l'impression 3D dispose d'une maturité et d'un historique nettement plus significatifs. Le CETIM estime qu'en 2013, la **FA métallique représentait 20% du marché mondial** soit 340 millions d'euros et devrait peser 1 360 millions d'euros en 2023, soit un **TCAM de 15%**. Selon ces prévisions, le marché mondial de la FA métallique vaudrait environ **450 millions d'euros en 2015**.

La vente de pièces représentera la source de revenus majoritaire en 2023 avec une part de marché de 50%.

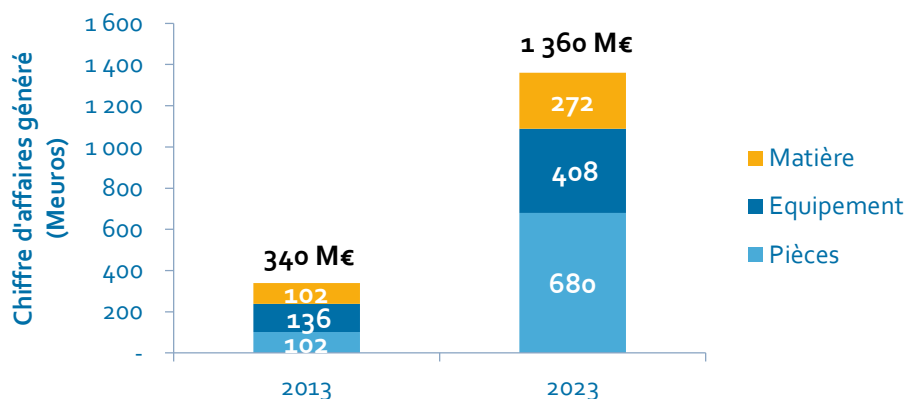


Figure 28 : Répartition du marché mondial de la FA métallique par typologie de revenus (Source : CETIM, 2015)

Toujours selon le CETIM, les **principaux secteurs d'application de la FA sont les biens de consommation et l'électronique ainsi que l'automobile**, suivis du médical puis de l'aérospatial.

³⁶ <http://www.3dnatives.com/marche-de-limpression-3d-2015-06042016/>

³⁷ <http://www.3dnatives.com/impression-3d-marche-2020-26082015/>

³⁸ <http://www.plasticsnews.com/article/20160405/NEWS/160409919/global-additive-manufacturing-market-tops-5-billion>

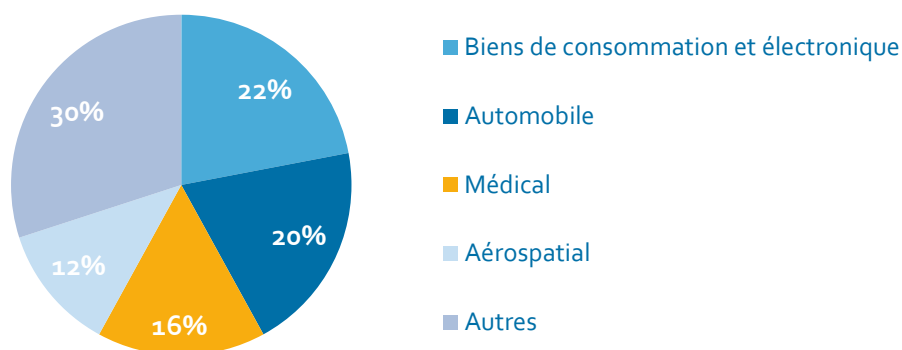


Figure 29 : Répartition du marché mondial de la FA par secteurs d'application (Source : CETIM, 2015)³⁹

2.1.2. Le marché national de la FA

Selon le cabinet Wohlers, **les États-Unis dominent largement le marché mondial de la FA** avec plus de 38 % du nombre total des imprimantes 3D installées dans le monde. **La France se trouve au 7^{ème} rang mondial**, derrière le Japon, la Chine, l'Allemagne, le Royaume-Uni et enfin l'Italie.

Le marché français est estimé à environ **250 millions d'euros en 2015**. Tout comme au niveau mondial, la FA polymère représente une forte part de ce marché :

- Le **marché FA polymère est estimé à 220 millions d'euros** ;
- Le **marché FA métallique à 25 millions d'euros** ;
- Les autres matériaux tels que les céramiques ou encore les composites constituent un marché encore naissant avec seulement 5 millions de chiffre d'affaires.

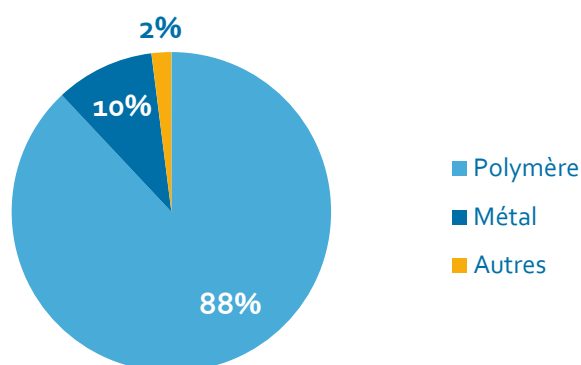


Figure 30 : Répartition du marché français par typologies de matériaux en 2015 (Source : D&Consultants, 2016)

En France, le marché de la **FA métallique est** aujourd'hui minoritaire mais a de **fortes perspectives de déploiement** comparé au marché plastique qui est beaucoup plus mature.

³⁹ Les usages dans le secteur automobile concernent principalement le sport, le luxe et la personnalisation

2.2. La chaîne de valeur et les acteurs leaders en France

La chaîne de valeur de la FA est constituée de 7 maillons, comme indiqué Figure 31.



Figure 31 : Chaîne de valeur de la FA (Source : D&Consultants, 2016)

D&Consultants s'est attaché à caractériser chacun de ces maillons en termes d'acteurs, d'enjeux et de mutations pressenties.

2.2.1. Les matériaux

Le maillon des matériaux rassemble les **fournisseurs de matières premières** (polymères, métaux, céramiques, etc.). La majorité des matériaux se trouvent sous forme de poudres, mais les polymères peuvent également être vendus sous forme de bobines de filaments ou sous forme liquide. **Les utilisateurs se fournissent rarement auprès des producteurs directement pour des raisons de volumes, mais plutôt auprès des fabricants de machines.**

Ce maillon est constitué de **grandes entreprises du secteur de la chimie pour les polymères et du secteur de la métallurgie pour les métaux**. En France, on trouve relativement peu d'acteurs.

La grande majorité des matériaux métalliques est importée et le marché est partagé entre le suédois Hoganas, l'anglais LPW, le canadien Tekna et le **français Erasteel**. Ce dernier produit des poudres de nickel, de cobalt et prochainement de titane dans le cadre du projet Titan, porté par le groupement d'intérêt public Metafensch dont Eramet est membre.⁴⁰ A noter également le **futur partenariat entre le sous-traitant montalbanais Prismadd et l'un de ses acteurs majeurs pour l'élaboration et la caractérisation de matériaux dédiés à la FA.**

Concernant les **matériaux plastiques**, Arkema possède une expertise dans la fabrication de polymères haute-performance. Son offre s'articule autour de deux types de matériaux : des poudres thermoplastiques Orgasol et Rilsan adaptées au procédé LBM et des résines acryliques Sartomer pour le SLA.⁴¹

L'entreprise limougeaude **3DCeram**, spécialisée dans la fabrication additive de céramiques développe des **formulations de pâtes céramiques**.

Enfin, nous pouvons citer **Prodways**, un **acteur multi-matériaux**, positionné à la fois sur les matériaux d'impression hybrides, composites – résines, résines céramiques et poudres plastiques

De forts enjeux persistent sur la **diminution des prix de ces matériaux, la problématique de recyclage des poudres et leur certification**.

Ces matériaux peuvent être vendus à des **prix 10 à 40 fois plus élevés que les matériaux traditionnels équivalents**. A titre d'exemple, la poudre de titane coûte environ 300 €/kg contre

⁴⁰ <http://www.usinenouvelle.com/article/la-france-ne-doit-pas-rater-le-cap-de-la-fabrication-additive-metallique.N333435>

⁴¹ <http://www.industrie.com/chimie/arkema-detaillle-son-offre-pour-l-impression-3d,69827>

8\$/kg pour le produit brut.⁴² De plus, le marché des matériaux reste opaque. Pour une même typologie et qualité de matériau, les prix peuvent aller du simple au double « voire au triple lorsque les poudres sont vendues par le fournisseur de machine » selon un acteur du marché.

Plusieurs des acteurs interrogés au cours de l'étude ont indiqué ne pas pouvoir réutiliser indéfiniment les poudres. Leur **qualité serait en effet dégradée avec le nombre d'impressions par oxydation pour les poudres métalliques et/ou par contamination.**

Dans le domaine aéronautique et spatial principalement, il est nécessaire de suivre des étapes de qualifications de certification. Par ailleurs, **des normes sont en cours de mise en place afin de figer les spécifications ou les façons de qualifier les fournisseurs et les poudres.**⁴³

2.2.2. Les machines

Les fabricants de machines de FA sont de plus en plus intégrés verticalement sur la chaîne de valeur. Ils couvrent en effet également les maillons des **matériaux** et des **logiciels** à travers la fourniture de matières premières et le développement de solutions logicielles adaptées à leurs systèmes. On observe une tendance au **verrouillage des matériaux et des logiciels** utilisables avec leur machine. Cette stratégie, basée sur le modèle des imprimantes 2D, oblige les utilisateurs à acheter les matériaux et les logiciels de la marque qui leur a vendu la machine, sous peine de ne plus bénéficier de la garantie. Les fabricants proposent également des prestations de formations et des services après-vente nécessaires pour une bonne exploitation du potentiel de leurs machines par les utilisateurs.

Le marché mondial des machines de FA est dominé par deux entreprises, **Stratasys (US-Israël) et 3D Systems (US)**, qui couvrent une large gamme de technologies « standard » à la fois métalliques et polymères. Stratasys détenait 51,9% des parts de marché en 2014 avec plus de 41 000 machines vendues, conservant ainsi pour la 13^{ème} année consécutive sa place de leader mondial. 3D Systems est positionné à la deuxième place avec 16,5% de part de marché.

Le marché des fabricants de machine est également constitué **d'acteurs de plus petite taille spécialisés sur une technologie spécifique et innovante dont ils prennent le monopole.** On peut citer la PME française **BeAM** qui a développé la technologie DED ainsi que l'entreprise suédoise **Arcam** qui vend des machines basées sur la technologie EBM.

En France, en plus de BeAM, on retrouve :

- **Prodways**, filiale du groupe Gorgé, qui fabrique des imprimantes SLA et SLS pour l'impression de polymères, céramiques et prochainement métaux ;
- **Phenix Systems**, qui s'est fait racheter il y a 2 ans par 3D Systems, produit des systèmes par frittage laser pour l'impression de métaux et de polymères ;

⁴² Entretien Michel PIRRONNET, Erasteel

⁴³ Entretien Thomas Thierry, Safran Additive Manufacturing

- La joint-venture entre Fives et Michelin baptisée **Fives Michelin Additive Solutions** commercialisera ses premières machines, fonctionnant par la technologie SLM, sous la marque « AddUp ». Ces machines, qui seront produites en France sur le site Fives Machining de Saint-Céré (Lot), offriront une robustesse et une vitesse de fabrication jusqu'alors inégalée sur le marché. L'objectif de cette JV est de livrer des ateliers d'impression 3D métal clés en main aux acteurs industriels.⁴⁴

Avec les nombreux rachats par les leaders du marché observés, le maillon des fabricants de machines est **en mutation vers une concentration des acteurs**. A travers ces acquisitions, la stratégie des acteurs leaders est de **proposer une offre multi-technologies et intégrée verticalement sur la chaîne de valeur**. A titre d'exemple, le groupe Gorgé qui avait fait l'acquisition en 2013 de Prodways, a racheté en 2015 Initial, un sous-traitant en production FA métal et plastique, ainsi que Norge Systems, une start-up britannique spécialisée dans la conception de machines utilisant le procédé SLS. Ces deux dernières acquisitions lui permettent ainsi d'avoir une gamme de machines plus large et de pouvoir proposer à ses clients la fabrication « à façon » de pièces en plastique et en métal.⁴⁵

A noter que pour l'impression de métaux, **les machines actuellement disponibles sur le marché ne sont pas totalement compatibles pour une utilisation en atelier industriel**. Plusieurs limites demeurent en effet :

- Un **coût de fabrication encore relativement élevé** par rapport aux procédés conventionnels ;
- Une **capabilité non maîtrisée** entraînant des écarts entre la géométrie théorique attendue par le cahier des charges des pièces et la géométrie réellement fabriquée ;⁴⁶
- Une mauvaise répétabilité des machines ;
- Une vitesse de production trop faible ;
- La nécessité de parachèvement des pièces ;
- Des **contraintes HSE lourdes** notamment liées aux poudres.

2.2.3. Les logiciels

On distingue **trois niveaux de logiciels** spécifiques à la FA :

- Le **niveau de la conception appliquée à la FA**. Ce niveau renvoie d'une part à la complexité géométrique des modèles permise par l'absence de contrainte liée au procédé de fabrication, et d'autre part à l'optimisation de la géométrie et des matériaux afin de maximiser les performances de la pièce finale (allègement, résistance...). Les outils de CAO classiques sont utilisés, ainsi que des outils spécifiques développés par les fabricants de machine ou les fournisseurs de services.

⁴⁴ <http://www.usinenouvelle.com/editorial/fives-michelin-veut-prendre-20-du-marche-mondial-de-l-impression-3d-metallique.N394647>

⁴⁵ <http://www.industrie-techno.com/gorge-renforce-ses-activites-d-impression-3d.37468>

⁴⁶ https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00916534/file/manuscrit_these.pdf

- Le **niveau de la simulation du processus de fabrication**. A ce niveau, on s'intéresse par exemple aux interactions entre le procédé de dépôt de matière et les caractéristiques finales de la matière. Ceci renvoie aux enjeux cruciaux de caractérisation des matériaux en FA, de la connaissance des transformations métallurgiques au cours du procédé et de la normalisation des matériaux en FA.
- Le **niveau du pilotage de la machine de FA**. A ce niveau, on s'intéresse à l'optimisation du pilotage de la machine : déplacement de la (ou des) têtes, intensité laser, faisceau d'électron, température, vitesse de refroidissement, etc. Ce niveau est important d'une part pour optimiser les performances du procédé, et d'autre part pour assurer les interactions entre les deux niveaux présentés ci-dessus. A noter que certains logiciels sont verrouillés par les fournisseurs de machines.

Le marché mondial des logiciels est **dominé par des acteurs leaders du prototypage virtuel**. Les leaders, le français **Dassault Systèmes** et l'américain **Altair**, préparent actuellement le **lancement de nouvelles solutions intégrées, maîtrisant l'ensemble des compétences et couvrant tous les secteurs d'application**.

La France dispose d'un autre acteur également actif dans le développement de solutions logicielles spécifiques à la FA : **ESI Group**. Il a en effet ouvert en 2015 un Centre d'Excellence pour soutenir la FA grâce à des solutions de simulation spécialisées.⁴⁷ Les solutions développées soutiennent également le projet d'Airbus « Aerospace Factory » consistant à créer un centre d'impression 3D qui se consacrera à la recherche sur des méthodes de production innovantes pour l'industrie aéronautique, et les amènera à maturité.⁴⁸

Les enjeux relèvent essentiellement :

- Du **coût des logiciels** ;
- De la **prévision des propriétés mécaniques ou thermiques des pièces produites en FA**.

2.2.4. La conception

La conception des pièces peut être réalisée par les donneurs d'ordres, les bureaux d'études et sociétés d'ingénierie, les fabricants de machines ou encore les éditeurs de logiciels.

Les **grands donneurs d'ordres ont tendance à internaliser cette compétence**. La **demande vient en réalité surtout des donneurs d'ordres de petite taille (TPE, PME) et du secteur médical** qui n'ont généralement pas les moyens de s'équiper en logiciels spécialisés ou pas les compétences pour réaliser les calculs d'optimisation géométrique et d'utilisation des matériaux nécessaires pour réaliser la conception des implants ou prothèses.

On distingue trois typologies d'acteurs sur ce maillon :

⁴⁷ <http://www.esi-group.com/fr/entreprise/propos-desi/esinsider-newsletter/esi-soutient-des-projets-innovants-portant-sur-la-fabrication-additive>

⁴⁸ https://www.esi-group.com/sites/default/files/resource/news_release/5111/esi_presents_its_virtual_prototyping_solution_at_farnborough_international_airshow_2016-fr.pdf

- Les **grandes sociétés d'ingénierie non spécialisées sur la FA ou sur un secteur en particulier**. En France, on peut citer **Assystem** qui a récemment développé une offre de service intégrant de l'aide à la conception, des études technico-économiques, un support de qualification des matériaux et fournisseurs pour le compte de donneurs d'ordre ainsi que du conseil auprès des PME et ETI ;
- Les **acteurs spécialisés dans un secteur d'activité**. Cette typologie constitue la majeure partie des bureaux d'études et sociétés d'ingénierie en FA. En aéronautique, **Sogeclair Aerospace**, société d'ingénierie spécialisée en aéronautique, a créé un pôle en FA actuellement composé d'une dizaine d'ingénieurs ;
- Les **entreprises spécialisées en FA**, telles que **Fusia et Prismadd**, au sein desquelles existe un pôle de conception permettant de designer les pièces avant de commencer la fabrication dans les machines dédiées.

Le territoire français **manque aujourd'hui de bureaux d'études spécialisés pour aider les petites et moyennes entreprises** à gérer des modèles complexes par nature liés à la FA, tant au niveau de la CAO ⁴⁹ que de la traduction en langage STL. ⁵⁰

2.2.5. La production FA

La production en FA peut être réalisée soit par les donneurs d'ordres directement, soit par les sous-traitants spécialisés. En France, la sous-traitance est un **maillon atomisé en de nombreux acteurs, souvent de petite taille**. De ce fait, l'offre de sous-traitance est très locale, souvent déterminée par la localisation d'un donneur d'ordre à proximité.

On distingue deux typologies de sous-traitants :

- Les **entreprises « traditionnelles » qui ont diversifié leur offre avec la FA**. Ces entreprises bénéficient de l'avantage d'avoir une bonne connaissance des secteurs sur lesquels elles sont positionnées, ce qui peut constituer un critère important pour les donneurs d'ordre, particulièrement sur le secteur aéronautique. Ces entreprises sont généralement des **usineurs**. On retrouve par exemple **Farella, qui a créé Prismadd, et Estève, qui a créé son pôle de FA : Fusia ;**
- Les **« nouveaux entrants » qui ont récemment été créés et dont l'offre est entièrement structurée autour de la FA**. **Poly-Shape**, créée en 2007 et positionnée sur les secteurs de l'aéronautique, l'automobile, le médical et l'énergie, en est un exemple.

L'ensemble des sous-traitants français proposent **une offre complète en couvrant pratiquement toutes les typologies de matériaux**. Nous pouvons citer notamment :

- Les **polymères** : Aurore Arka, Atlantik 3D, etc.

⁴⁹ Conception Assistée par Ordinateur

⁵⁰ Standard Template Library

- Les **métaux** : Spartacus3D (Farinia Group), Applications Additives Avancées (3A), BeAM, 3D&P, ADDITECH Mont-Blanc, Fusia, Poly-Shape, *etc.*
- Les **multi-matériaux (polymères et métaux)** : Erpro&Sprint, Volum-e, Sculpteo, Initial, Prismadd, *etc.*
- Les **céramiques** : 3DCeram
- Les tissus biologiques : Poietis.

Ce maillon est encore en structuration avec une réelle tendance de ces acteurs sous-traitants vers **l'intégration verticale de la chaîne de valeur**. Les acteurs cherchent en effet à proposer aux donneurs d'ordres une **offre de services complète et adaptée aux spécifications des donneurs d'ordres**. Poly-Shape s'est ainsi associé avec LISI AEROSPACE, entreprise française spécialisée dans la fabrication de fixations, de composants d'assemblage et de sous-ensemble de structure pour l'industrie aérospatiale, pour créer une co-entreprise. L'objectif de cette association est de porter le procédé de FA à une échelle industrielle compatible avec les exigences technico-économiques des donneurs d'ordres.⁵¹ Peut également être cité l'exemple de **Prismadd** qui intègre l'ensemble de la chaîne de production FA de pièces métalliques et polymères à travers ses 3 sociétés partenaires :

- **Creatix3D**, spécialisée dans le conseil en FA, fournit des machines et les consommables de la marque 3D Systems, des logiciels de simulation et d'optimisation topologique ainsi que les savoir-faire associés ;
- **Farella**, spécialisée dans l'usinage et l'assemblage mécanique de précision, apporte son savoir-faire sur les problématiques de reprises d'usinage, de traitements de surface et de contrôle non destructif ;
- **Rhonatec**, spécialisée dans la distribution d'aciers spéciaux, fournit des poudres de certains alliages métalliques.

L'enjeu principal de ce maillon est **d'atteindre la taille critique nécessaire pour répondre aux besoins des donneurs d'ordre**. La stratégie de regroupement des acteurs à travers la mise en place de partenariats ou de fusions peut constituer l'une des solutions pour atteindre cette taille critique.

2.2.6. Le post-traitement

L'étape de post-traitement correspond à la **finition et au parachèvement d'une pièce réalisée en FA**. Elle concerne très majoritairement les **pièces métalliques**. C'est une étape déterminante, 20% à 50% du coût de la pièce étant actuellement lié au post-traitement et au contrôle.⁵²

Cette étape peut se décomposer en plusieurs phases :

- Le nettoyage, l'enlèvement des supports, le polissage, le sablage, le grenailage ;

⁵¹ <http://www.electronique-mag.com/article10744.html>

⁵² Thierry Thomas, SAFRAN Additive manufacturing, https://www.researchgate.net/publication/287996154_Fabrication_additive_metallique_les_acteurs_Parachevements_finitions_traitements_thermiques_et_de_surface_Metal_additive_manufacturing_the_actors_Post_processing_finishing_heat_and_surface_treatments

- Les traitements thermiques ;
- La reprise d'usinage ;
- Les traitements de surface ;
- Etc.

Le post-traitement est en général sous-traité par les donneurs d'ordre à des entreprises spécialisées sur une de ces technologies. Les **sous-traitants français ont aujourd'hui du mal à répondre à la demande croissante au regard de leur faible nombre**. On observe en effet un phénomène de **goulot d'étranglement sur certaines technologies**, notamment sur la technique de **compression isostatique à chaud** (HIP).⁵³ **Bodycote** est en situation de monopole sur cette technologie en France et est quasiment saturé.

Le marché du post-traitement est encore **immature**. Les traitements thermiques et les traitements de surface ne sont pas encore totalement adaptés aux pièces réalisées en FA : **des développements sont nécessaires**. Il existe en effet encore de nombreux verrous technologiques :

- Il y subsiste un manque de technologies capables de finir les pièces dans toutes les conditions et dans toutes les configurations avec des états de surfaces spécifiques. La complexité des pièces réalisées en FA rend l'accès à certaines zones très compliqué, notamment au niveau des trous et des cavités ;
- Le **détensionnement**, technique utilisée pour éviter des déformations post-FA, **commence seulement à être intégré en sortie de certaines machines**. A noter que cette opération a plutôt tendance à être réalisée par l'entreprise qui fabrique la pièce, car elle doit être faite rapidement à la sortie de la machine ;
- Les **gammes de parachèvement appliquées aux techniques de FA sont très peu formalisées à travers la mise en place de normes**. Quelques initiatives ont été lancées au sein des IRT et du CETIM mais elles restent insuffisantes selon plusieurs acteurs interrogés.

2.2.7. Le contrôle

Le contrôle en FA peut être appliqué à **trois niveaux** :

- Le **contrôle des matières premières**. Ce contrôle concerne actuellement essentiellement les poudres neuves et recyclées. De nombreux paramètres peuvent être mesurés : la taille, la forme, la distribution en taille et en forme, la forme cristallographique, la composition chimique, l'homogénéité chimique, la masse volumique ou encore la coulabilité ;
- Le **contrôle de matériau**. Il consiste à analyser ses propriétés mécaniques sur des éprouvettes. Ce type de contrôle est notamment utilisé pour étudier le post-traitement thermique d'une pièce ;

⁵³ Forme de traitement thermique qui utilise une pression élevée pour améliorer les propriétés d'un matériau

- Le **contrôle du procédé de FA**. Il permet d'évaluer quantitativement les performances de la machine à travers soit le contrôle direct et individuel des différentes composantes et caractéristiques de la machine, soit le contrôle d'un échantillon témoin. C'est la seconde méthode qui est actuellement privilégiée, la première nécessitant l'instrumentation de la chambre de fabrication avec des capteurs appropriés, ce qui n'est pas toujours possible.⁵⁴

Ainsi, **la majorité des pratiques consiste à contrôler les pièces en sortie de machine**. La technique actuellement la plus aboutie et donc la plus utilisée est la **tomographie à rayons X**. Cette technique de contrôle non destructif consiste à analyser des pièces par interaction Rayonnement-Matière. Elle permet de réaliser une reconstruction numérique en 3D de la pièce par collection de données suivant de multiples orientations.⁵⁵ Elle est particulièrement bien adaptée aux pièces réalisées en FA dans la mesure où elle est **capable de contrôler la structure interne des pièces**.

D'après certains acteurs, le contrôle représenterait actuellement entre 30 et 40% du coût de la pièce. A noter que le coût de ces prestations à l'unité diminue avec la fréquence des contrôles. Pour un prototype, le contrôle est systématique dans le secteur spatial tandis que pour les pièces en série, un prélèvement (1 pièce sur 20 en moyenne⁵⁶) est effectué pour les pièces non critiques et un contrôle systématique est réalisé pour les pièces critiques. **La tomographie à rayons X restant une technique coûteuse et chronophage, les donneurs d'ordre souhaiteraient que des méthodes alternatives soient proposées.**⁵⁷ Les développements s'orientent sur des techniques de **contrôle in situ en temps réel, réalisées au fur et à mesure de la fabrication des couches de matières**.

Le contrôle des pièces est externalisé par les donneurs d'ordres et par les sous-traitants en FA à des entreprises spécialisées. Il s'agit généralement d'acteurs positionnés sur le contrôle non destructif des pièces par tomographie à rayons X et ayant adapté leur offre à la FA. A titre d'exemple, Prodways a mis en place un partenariat avec des entreprises voisines pour des prestations portant à la fois sur la métrologie traditionnelle et sur la tomographie à rayons x.

2.2.8. Synthèse sur les acteurs leaders en France

Sont présentés Figure 32 **les acteurs français les plus cités lors des entretiens réalisés avec les donneurs d'ordres** positionnés sur les secteurs d'applications visés par l'étude.

⁵⁴ <http://www.a3dm-magazine.fr/contrôles-et-mesures-un-nouvel-enjeu-pour-la-fabrication-additive/>

⁵⁵ <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/cnd-methodes-globales-et-volumiques-42585210/tomographie-a-rayons-x-p950/>

⁵⁶ Entretien Clovis LATASTE, ELEMCA

⁵⁷ http://www.metrologie-francaise.fr/publications/revue_francaise_metrologie/2015-01/RFM37-1503.pdf

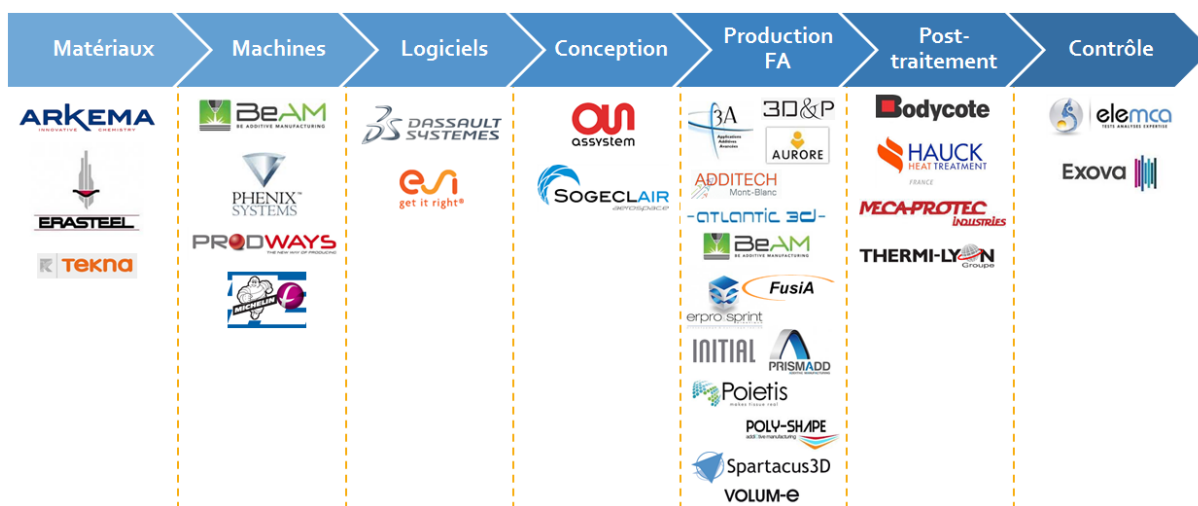


Figure 32 : Acteurs leaders en France (Source : D&Consultants, 2016)⁵⁸

3. L'IMPACT DE LA FA SUR LA FILIERE DE SOUS-TRAITANCE

Compte-tenu de la prédominance du tissu industriel sous-traitant sur le secteur des transports, et notamment de l'aéronautique et du spatial en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée, la suite du présent document est largement focalisée sur ces marchés.

3.1. Les enjeux de la FA pour la filière de sous-traitance

Les entreprises sous-traitantes souhaitant intégrer la FA au sein de leur stratégie de développement doivent être conscientes des enjeux associés. Ils sont multiples : économiques, techniques, réglementaires et liés aux savoir-faire.

▪ Les enjeux économiques

L'intégration de la FA au sein des entreprises nécessite des ressources financières importantes :

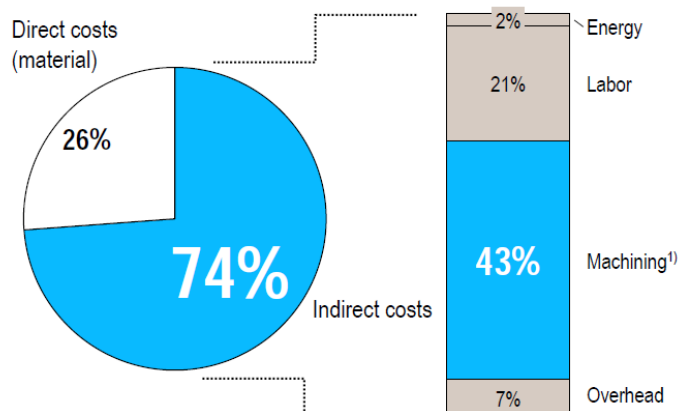
- **De lourdes dépenses d'investissements (CAPEX) liées à l'achat des machines et à la mise en place d'un environnement sécurisé.** L'investissement financier dépend principalement du type de machines et de matériaux. Les machines métalliques valent en effet en moyenne 1 million d'euros (+/- 500 000€) contre 40 000 € pour les machines plastiques ;
- **Des dépenses d'exploitation (OPEX) élevées associées aux matières premières, aux consommables nécessaires pour faire fonctionner les machines, au contrôle qualité, au post-traitement et à la main d'œuvre qui doit être qualifiée.**

Au regard des niveaux de maturité des technologies et des contraintes HSE, les enjeux économiques sont nettement plus forts pour la FA métallique. Le cabinet Roland Berger a réalisé en 2013 une étude afin d'estimer la répartition des coûts liés à la cette typologie de fabrication. **La plus grande**

⁵⁸ Liste non exhaustive

source de dépenses est liée à l'investissement machine intégrant également la maintenance et les consommables.

AM costs of EUR 3.14/cm³



1) AM system and wire eroding machine incl. depreciation, maintenance, consumables 2) For stainless steel powder

Figure 33 : Répartition des coûts liés à la FA métal en conditions de production série (Source : Roland Berger, 2013)

COMMENTS

- > Cost estimation assumes maximum utilization of capacity
- > Actual costs may differ – Costs are highly dependent on selected material, object geometry and chamber utilization
- > Only production costs considered – Product design and CAD file creation plus finishing steps such as heat treatment, shot peening and polishing are not considered

KEY ASSUMPTIONS

- > Machine cost: EUR 500,000
- > Operating time: 8 years
- > Machine utilization: 83%
- > Build rate: 10 cm³/h
- > Material: Stainless steel
- > Powder price²⁾: EUR 89/kg

Les enjeux techniques

Comme précisé dans la partie 2.2.2, les machines actuellement sur le marché ne sont pas encore totalement arrivées à maturité pour une utilisation en milieu industriel, notamment les machines métal. **Celles-ci butent encore sur plusieurs obstacles :**

- **L'impression de pièces dont la surface est rugueuse** nécessitant une étape supplémentaire de post-traitement pour finaliser les pièces ;
- **La vitesse d'impression qui peut durer des heures, voire des jours.** Ce rythme peut convenir pour la fabrication d'un prototype, mais beaucoup moins pour la production en série ;
- **La capacité non maîtrisée** entraînant des écarts entre la géométrie théorique attendue et la géométrie réellement fabriquée ;
- **La mauvaise répétabilité des machines ;**
- **La taille des pièces qui est limitée par la capacité de la machine** (en général 300 x 300 x 300 mm) ;
- **Un contrôle qualité non intégré** au sein du procédé ;
- **Les poudres non fusionnées ne pouvant être recyclées indéfiniment.** Les poudres reconditionnées peuvent en effet dégrader la qualité structurelle des pièces.

La FA est une technique encore en plein développement. Les fabricants de machines cherchent continuellement à améliorer leurs offres afin de s'affranchir des limites citées ci-dessus, sortant ainsi de nouvelles machines parfois tous les 2 ans. De plus, depuis quelques années, de nombreux brevets

tombent dans le domaine public, entraînant une prolifération rapide des machines et impactant directement leur coût.

Cette explosion dans le nombre de modèles sur le marché entraîne des conséquences d'obsolescence accélérée comme le précise Philippe Rivière, président de Prismadd : « Rien qu'en 2015, nous avons acheté pour 8 millions d'euros de machines qui seront dépassées d'ici à deux ans ». ⁵⁹

▪ Les enjeux réglementaires

L'environnement réglementaire, incluant le droit de propriété intellectuelle, la standardisation et la certification, est en constante évolution. Des règles claires à l'échelle internationale sont nécessaires pour le développement de la FA.

Les entreprises sous-traitantes de secteurs de pointe tels que l'aéronautique, le spatial ou encore le médical **doivent se conformer aux exigences de certification et d'homologation de leurs clients en termes de procédés et matériaux.** Les nombreux matériaux, machines et procédés rendent l'élaboration de standards pour la qualification et la certification compliquée. L'élaboration de normes au préalable permettra de faciliter cette certification. Au niveau international, le comité ASTM F 42 en charge des technologies de fabrication additive gère le processus de normalisation. ⁶⁰

En termes de propriété intellectuelle, la FA soulève des problématiques liées à la contrefaçon. La sécurisation des échanges et la protection des fichiers numériques et des objets créés en FA constituent en effet un enjeu fondamental. Afin de s'affranchir de tout risque lié à cette problématique, il est recommandé aux sous-traitants d'insérer une clause au contrat de services stipulant que le donneur d'ordre dispose des droits requis. ⁶¹

Les entreprises utilisatrices de technologies de FA doivent **prendre en compte l'ensemble des risques liés aux contraintes d'hygiène et de sécurité, particulièrement pour la FA métallique.** Les principaux risques rencontrés en FA sont notamment :

- **Les risques chimiques.** L'exposition, par inhalation ou par contact cutané, aux matières premières utilisées, organiques ou inorganiques, aux produits de dégradation thermique émis lors du chauffage ainsi qu'aux produits de post-traitement peut avoir des effets sur la santé (irritations, allergies, atteintes du système nerveux, cancers, effets sur la reproduction, etc.). **Des installations spécifiques de captage des poussières, des aérosols, des gaz doivent donc être prévues avec une évacuation à l'extérieur des locaux** afin de réduire ces risques liés à l'exposition à des produits dangereux. Les pratiques et les moyens à mettre en place pour l'évaluation du risque chimique sont similaires à ceux recommandés pour toute activité exposant à des agents chimiques dangereux ;

⁵⁹ <http://www.usinenouvelle.com/article/impression-3d-quel-modele-pour-la-sous-traitance.N375800>

⁶⁰ <http://technologies-cles-2020.entreprises.gouv.fr/assets/pdf/technologies/technologie-og.pdf>

⁶¹ <https://www.jesuisentrepreneur.fr/informations-sectorielles/services/impression-3d/la-reglementation-de-l-impression-3d.html> <http://www.a3dm-magazine.fr/reglementation-de-la-fabrication-additive-et-de-l'impression-3d/>

- Les **risques d'explosion**. Ce risque est causé par les poussières de matières imprimées (poudres métalliques, plastiques, bois, etc.) qui forment en mélange avec l'air des atmosphères explosives. Il convient donc de **prendre en considération ces risques lors de la conception de la machine et de son implantation** ;
- Les **risques liés à l'utilisation de machines**. L'entreprise utilisatrice doit veiller au **maintien en état de conformité des machines et mettre en œuvre des mesures pour assurer la sécurité de son personnel et sa formation**.⁶²

▪ Les enjeux de savoir-faire

Les machines industrielles n'étant pas disponibles sous forme de solutions « Plug&play », **les opérateurs doivent avoir un niveau de qualification élevé afin d'être capable de paramétrer les machines**. La formation des opérateurs est donc essentielle. Elle est actuellement réalisée par les fabricants de machines directement.

En recroisant l'ensemble des enjeux cités ci-avant, le principal risque auquel s'expose la filière de sous-traitance est d'investir dans des technologies qui demandent des ressources financières importantes mais qui deviennent obsolètes en quelques années, ne laissant pas le temps aux entreprises de les amortir. Or, ces investissements sont dès aujourd'hui nécessaires pour obtenir des marchés auprès des donneurs d'ordres.

3.2. Stratégie des donneurs d'ordres vis-à-vis de la FA

Au cours de son enquête, D&Consultants a interrogé plus d'une vingtaine de donneurs d'ordres sur les secteurs aéronautique, spatial, automobile et santé. L'objectif de ces entretiens a été d'identifier leurs stratégies concernant la nature et la quantité de marchés qui seront confiés aux sous-traitants en FA.

3.2.1. Une démarche FA en trois temps chez les donneurs d'ordres

La stratégie de sous-traitance des donneurs d'ordres en FA est décomposée en trois étapes.

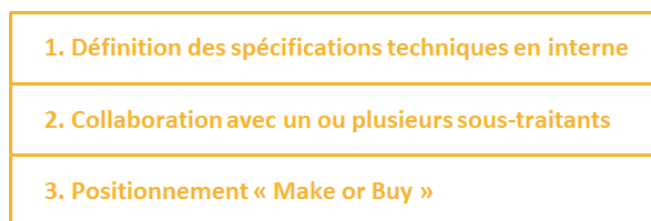


Figure 34 : Les trois étapes constituant la stratégie de sous-traitance en FA des donneurs d'ordres (Source : D&Consultants, 2016)

⁶² *La fabrication additive, un empiement de risques ?*, Michèle Guimon, INRS

1. La définition des spécifications techniques en interne

Durant cette première étape, les donneurs d'ordres **mettent au point le cahier des charges technique afin de pouvoir supporter les achats ainsi que le développement de la supply chain**. Pour cela, ils disposent, la plupart du temps, d'une machine en interne. Cette machine, à faible cadence de production, n'est pas destinée à la production en série mais plutôt au prototypage rapide.

2. La collaboration avec un ou plusieurs sous-traitants pour la montée en compétence

L'immaturation des technologies vis-à-vis de l'industrialisation et l'obsolescence rapide des machines sont deux éléments qui contribuent au fait que les donneurs d'ordres sont peu enclins à internaliser la production actuellement. **Les donneurs d'ordres mettent en place des partenariats privilégiés avec un ou plusieurs sous-traitants ayant déjà investi dans un parc machine conséquent et correspondant aux spécifications techniques définies lors de la première étape**. Le passage par la sous-traitance permet ainsi une phase d'essai dans une démarche d'intégration, comme le précise Georges Taillandier, président de l'AFPR : « Aujourd'hui, l'intérêt est d'utiliser les sociétés de services qui sont connues et reconnues. Certaines ont des qualifications dans des domaines spécifiques : automobile, aéronautique ou autres. Je conseillerais l'utilisation de ces sociétés avant d'intégrer la fabrication soi-même ». ⁶³

Durant cette étape, les donneurs d'ordres accompagnent les sous-traitants dans la montée en compétence. Il s'agit d'un réel travail de collaboration dans lequel les **donneurs d'ordres incitent les sous-traitants à considérer la technologie, à identifier la création de valeur et à la partager**. En échange, **les sous-traitants accompagnent et éduquent le donneur d'ordres**. A l'issue de cette étape, **les technologies seront suffisamment matures et maîtrisées pour le lancement de la production industrielle à grande échelle**.

Les donneurs d'ordres sélectionnent leurs sous-traitants selon plusieurs critères :

- **Le niveau d'expérience dans le secteur industriel**. Un acteur avec plusieurs années d'expériences aura une meilleure vision des enjeux propres au secteur et donc une bonne connaissance des contraintes (réglementaires, temporelles, etc.) des donneurs d'ordres. L'expérience souhaitée ne doit pas nécessairement être en FA, elle peut être en usinage par exemple pour le secteur aéronautique ;
- **La capacité à être force de proposition (cotraitance)**. Les donneurs d'ordres souhaitent que leurs sous-traitants aient une vision vis-à-vis de la FA et qu'ils la partagent ;
- **Des capacités d'investissement suffisantes** pour pouvoir répondre aux besoins des donneurs d'ordres. Les sous-traitants doivent être capables d'augmenter leur capacité de production dans le cas où les donneurs d'ordres souhaiteraient augmenter les cadences de production en passant sur de la production industrielle en série ;
- Les donneurs d'ordres souhaitant **limiter le nombre d'interlocuteurs** sur leurs projets souvent à niveau de confidentialité élevé, les sous-traitants doivent avoir la taille critique pour :

⁶³ <http://www.a3dm-magazine.fr/fabrication-additive-quelles-solutions-pour-les-entreprises/>

- **Maîtriser une diversité de technologies et de matériaux ;**
- **Produire des pièces de tailles variées ;**
- **Proposer un large panel de compétences grâce à une intégration verticale sur la chaîne de valeur.** A noter que les donneurs d'ordres n'attendent pas une intégration des sous-traitants sur l'ensemble des maillons de la chaîne de valeur. Ils disposent en général d'un bureau d'étude en interne, des compétences en conception ne sont donc pas systématiquement nécessaires. Le contrôle devant être réalisé par un acteur impartial, il n'est pas non plus réalisé par le sous-traitant. **La compétence complémentaire à la fabrication la plus attendue concerne le post-traitement ;**



Figure 35 : Compétences des sous-traitants en production FA attendues par les donneurs d'ordres (Source : D&Consultants, 2016)

- **La proximité géographique.** La localisation géographique constitue un critère, non prioritaire, uniquement durant la phase de développement. Cette phase nécessite en effet de nombreux échanges entre donneurs d'ordres et sous-traitants. Une fois que les technologies seront bien mures et maîtrisées pour de la production industrielle à grande échelle, les échanges seront moins fréquents et pourront se faire de façon dématérialisée.

Nous pouvons constater qu'une partie de ces critères est en phase avec les stratégies actuelles des sous-traitants consistant en une intégration de la chaîne de valeur, la proposition d'une offre de service multi-technologies et locale.

Nous pouvons citer les exemples de collaboration ci-dessous dans les secteurs aéronautique et spatial :

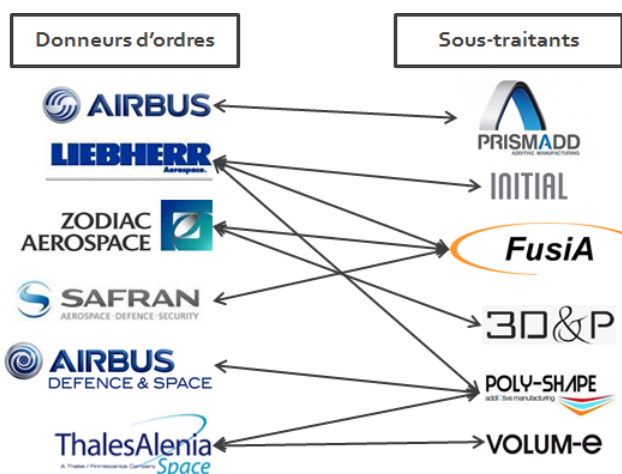


Figure 36 : Exemples de collaborations entre donneurs d'ordres et sous-traitant dans le secteur aérospatial (Source : D&Consultants, 2016)

3. Positionnement « Make or Buy » pour la production en série

Suite à la montée en compétence grâce à leur collaboration avec les sous-traitants, les donneurs d'ordres peuvent choisir de prolonger ce partenariat pour de la production industrielle en série, ou bien d'internaliser la totalité ou seulement une partie de cette production. Il s'agit du positionnement « Make or Buy » :

- « Make » : internalisation de l'ensemble de la production en FA ;
- « Buy » : sous-traitance de l'intégralité de la production en FA auprès du ou des sous-traitants avec le(s)quel(s) le donneur d'ordres a collaboré ;
- « Make & Buy » : internalisation de la production de certaines typologies de pièces. Le choix concernant la répartition des pièces à internaliser ou externaliser se fait en général selon la nature du matériau, le volume de production, le niveau de confidentialité ou encore la criticité des pièces :
 - La fabrication des pièces confidentielles ainsi que des pièces critiques (de classe 1 ou 2 en aérospace) sera internalisée ;
 - Tandis que la production des pièces d'une haute complexité, produites en petites séries et ne justifiant donc pas l'achat d'une machine, ou encore composées d'un matériau n'étant pas le cœur de métier du donneur d'ordres, seront confiées à la sous-traitance.

La majorité des feuilles de route des donneurs d'ordres quant à leur positionnement « Make or Buy » est en cours d'élaboration mais des premières orientations se dessinent. **Dans le secteur aéronautique et spatial, une majorité d'acteurs sera positionnée sur du « Make & Buy » et sur du « Buy »** comme le montre la Figure 37.



Figure 37 : Répartition des positionnements "Make or Buy" des donneurs d'ordres en aéronautique et spatial
(Source: D&Consultants, 2016)

Nous pouvons citer l'exemple de **Prismadd** qui a récemment remporté l'un des plus importants contrats de sous-traitance en FA en France. Il a en effet **signé un contrat de 6 millions d'euros avec Airbus**. Les premières productions en série ont été lancées sur son site de Montauban à l'été 2016.

Au cours de sa précédente collaboration dans le cadre de la montée en compétence (étape 2), des pièces de structure en titane destinées à être intégrées sur l'A350 ont été référencées.⁶⁴

Dans le secteur médical, le positionnement dépend de la typologie de matériau imprimé. Les entreprises développant des implants, prothèses, de maquettes ou encore d'outils chirurgicaux envisagent majoritairement le positionnement « Buy ». Tandis que l'industrie pharmaceutique et cosmétique internalisera certainement les compétences en bio-impression à terme.

Les industriels des secteurs automobile et ferroviaire sont à la première étape d'élaboration des cahiers des charges techniques. Leur feuille de route quant à leur positionnement « Make or Buy » n'est donc pas encore établie.

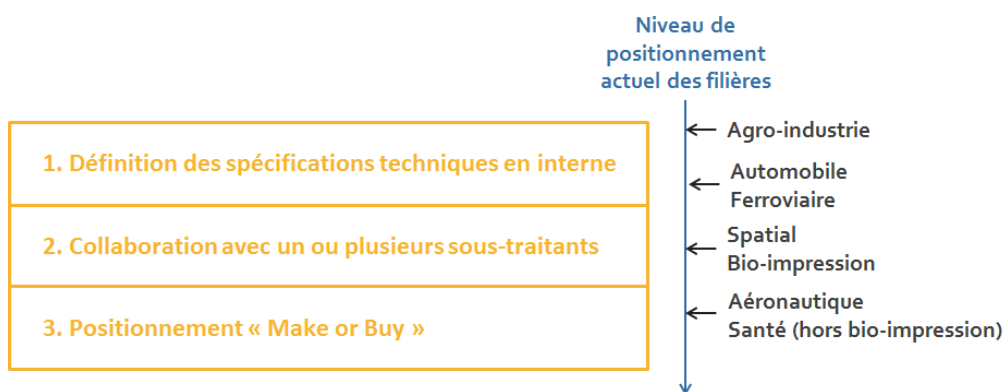


Figure 38 : Niveau de positionnement des filières (Sources : D&Consultants, 2016)

3.3. Roadmap prévisionnelle des pièces produites en FA

Afin d'établir sa feuille de route FA le pôle de compétitivité Aerospace Valley a identifié des enjeux et des besoins des donneurs d'ordre, des équipementiers ainsi que des acteurs de spécialité dans la fabrication additive à court et moyen termes a été réalisée. Il en ressort l'échéancier suivant :

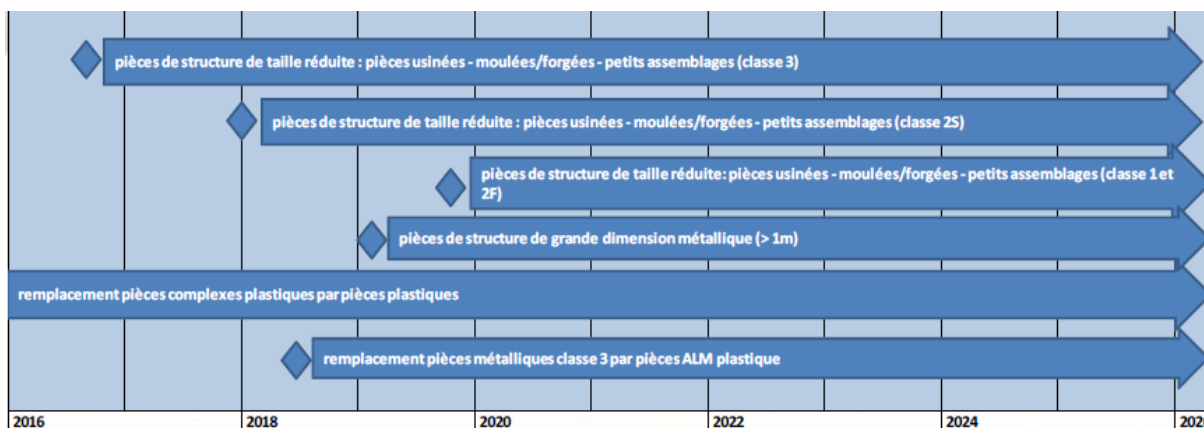


Figure 39 : Feuille de route FA du secteur aéronautique (Source : Aerospace Valley, 2016)

⁶⁴ <http://www.usinenouvelle.com/article/comment-prismadd-se-lance-dans-l-impression-3d-de-serie.N385016>

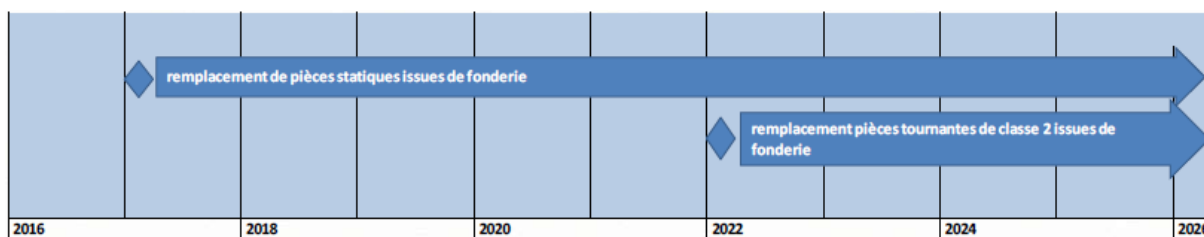


Figure 4.0 : Feuille de route FA des motoristes (Source : Aérospatiale Valley, 2016)

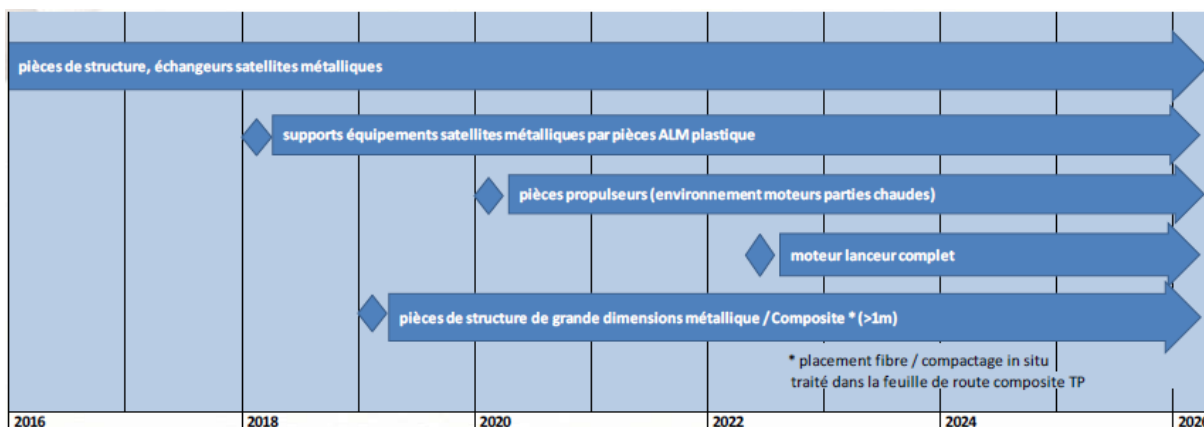


Figure 4.1 : Feuille de route FA du secteur spatial (Source : Aérospatiale Valley, 2016)

Ainsi, d'après cette feuille de route, nous devrions assister à un remplacement progressif de certaines typologies de pièces réalisées actuellement en fonderie, en usinage ou encore en injection plastique.

Le remplacement des pièces complexes en plastique est déjà amorcé en aéronautique. Pour les pièces métalliques, le remplacement concernera uniquement certaines typologies de pièces et se fera petit à petit dès cette année :

- **Chez les constructeurs aéronautiques, la grande majorité des pièces remplacées seront des pièces de structure.** Parmi ces pièces, les acteurs sélectionneront celles à réaliser en FA selon deux paramètres :
 - **Le niveau de criticité.** Jusqu'en 2018, les constructeurs se limiteront aux pièces de faible niveau de criticité (catégorie 3), puis intégreront les pièces de classes 2. Les pièces de classe 1 en FA ne verront pas le jour avant fin 2019 ;
 - **La taille.** Seules les pièces de taille réduite seront réalisées en FA avant 2020. Ensuite, de nouvelles machines avec des plateaux de dimension plus importante auront été développées et les technologies présentant de grands volumes de production telles que le DED et le FDM métal auront atteint un MRL suffisamment élevé pour l'industrialisation, permettant ainsi la production de pièces de grandes dimensions ;
- **Chez les motoristes, seules les pièces aujourd'hui réalisées en fonderie seront transposées en FA dès 2017.** Les premières pièces remplacées seront les **pièces statiques**, moins soumises à des contraintes et des températures extrêmes que les **pièces tournantes** qui seront réalisées en FA seulement à partir de 2022. Selon certains donneurs d'ordre du secteur, **20% des pièces des moteurs seront réalisées en FA d'ici 2025 ;**

- Dans le **secteur spatial**, certaines pièces de structure sont déjà en vol. Tout comme dans le secteur aéronautique, la réalisation de pièces de grandes dimensions se fera à partir de 2019. **Les acteurs envisagent la fabrication de pièces de propulseurs dès 2020 et du moteur complet du lanceur en 2022.** A noter que les contraintes de qualification et de certification des pièces étant moins lourdes sur ce secteur, pour un même niveau de maturité des technologies, une utilisation de la FA dans le spatial pourra se faire plus rapidement qu'en aéronautique.

Au regard de la taille des séries, le spatial représente un volume de pièces pouvant être réalisées en FA négligeable par rapport à l'aéronautique. Dans le spatial, les pièces sont généralement unitaires tandis qu'en aéronautique, les acteurs envisagent une production en FA au cours des prochaines années de plusieurs milliers de pièces par an et par référence. **C'est donc le secteur aéronautique qui va driver le marché de la FA.** En dehors de démarches d'amélioration continue des programmes actuels, **il faudra attendre l'arrivée des nouveaux programmes aéronautiques pour voir l'arrivée massive de pièces intégrant des fonctions et optimisées topologiquement.** L'utilisation de pièces redesignées sur les programmes actuels représente en effet une contrainte pour les constructeurs au regard des longs procédés de certification nécessaires.

La rampe de lancement de la FA en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranées, portée par le secteur aéronautique, se fera donc en 2 temps :

- En 2018 – 2020, date d'arrivée à maturité industrielle de machines FA métal ;
- A compter de 2025, date à laquelle pourra être lancé un(de) nouveau(x) programme(s).

3.4. Impact sur la filière de sous-traitance conventionnelle

3.4.1. Menaces de la FA sur la filière de sous-traitance conventionnelle

La feuille de route FA en cours de finalisation d'Aerospace Valley montre que plusieurs pièces aujourd'hui issues de l'usinage, de la fonderie ou du moulage seront remplacées par des pièces en FA dans les prochaines années. **Les métiers conventionnels sont donc à priori concurrencés.**

Pour rappel, **la FA est une technique de fabrication bien adaptée pour la production en petites séries (à court terme) voire en moyenne série (à moyen terme) de pièces à géométries complexes et/ou de composants assemblés.** Elle est aujourd'hui limitée à la fabrication de pièces de petites tailles mais sera capable d'imprimer des pièces de grandes dimensions d'ici 2020 environ.

D&Consultants s'est attaché ci-dessous à caractériser les techniques de fabrication conventionnelles permettant de fabriquer des pièces en métal et en plastique afin **d'identifier celles qui sont les plus menacées par la FA à court et moyen termes.**

1. Les procédés conventionnels plastique

On distingue quatre familles de techniques de fabrication conventionnelles de pièces en plastiques qui sont le **moulage, l'usinage, le formage et l'assemblage** et dont la description est présentée dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Tableau comparatif des procédés conventionnels plastique (Source : Sculpteo)⁶⁵

Procédé	Description	Détails (mm)	Avantages	Inconvénients	Applications
Injection plastique	Injection du matériau dans un moule	Surface : lisse Tolérance : 0.050	Grande variété de matériaux Quantités importantes Tolérance élevée Très bon état de surface	Coût initial élevé Délais importants Pièces à parois fines uniquement	Automobile Aerospatial Electronique Packaging Contenants
Usinage	Retrait de matière	Surface : lisse Tolérance : 0.025 um	Tout types de matériaux Tolérance élevée Délais de production raisonnables	Peu adapté pour des pièces complexes Coût des équipements élevé Taux de rebus important	Dispositifs et appareillages Automobile Aerospatial
Formage	Etirements et mises en forme de fines feuilles de matière	Surface : lisse Tolérance de l'ordre de 1mm	Pièce de grande taille Prix abordable	Uniquement thermoplastiques Formes limitées Pièces à parois fines uniquement Contrôle unilatéral	Packaging Contenants Paneaux
Assemblage	Soudures et fixation de pièces	Dépend des produits semi-finis	Tous types de matériaux	Délais importants Coûts élevés	Automobile Electronique Médical

Parmi ces quatre procédés, la technologie la plus adaptée à la fabrication de pièces :

- complexes est l'injection plastique ;
- en petites séries est le formage ainsi que l'usinage ;
- de composants assemblés est l'assemblage.

Ainsi, la FA ne représente pas une technologie concurrente à un procédé conventionnel en particulier mais à l'ensemble de ces procédés en fonction de la typologie de pièce à produire.

1. Les procédés conventionnels métal

Parmi les procédés conventionnels permettant la production de pièces en métal, les feuilles de routes présentées en partie 3.3 mettent clairement en avant que les procédés qui vont être remplacés par la FA sont **l'usinage et la fonderie**.

▪ La fonderie

La fonderie est une technique qui rassemble des procédés dans l'ensemble bien adaptés à la réalisation de pièces complexes de dimensions assez importantes, **les techniques les plus**

⁶⁵ <https://www.sculpteo.com/fr/impression-3d/impression-3d-et-procedes-de-fabrication-traditionnels-comparaison/>

menacées par la FA sont principalement celles utilisées pour la production de pièces unitaires et de petites séries, de dimensions modestes.

On distingue deux typologies de moulage : le moulage en moule permanent et le moulage en moule non permanent. Chacune de ces techniques est sous-segmentée en plusieurs procédés.

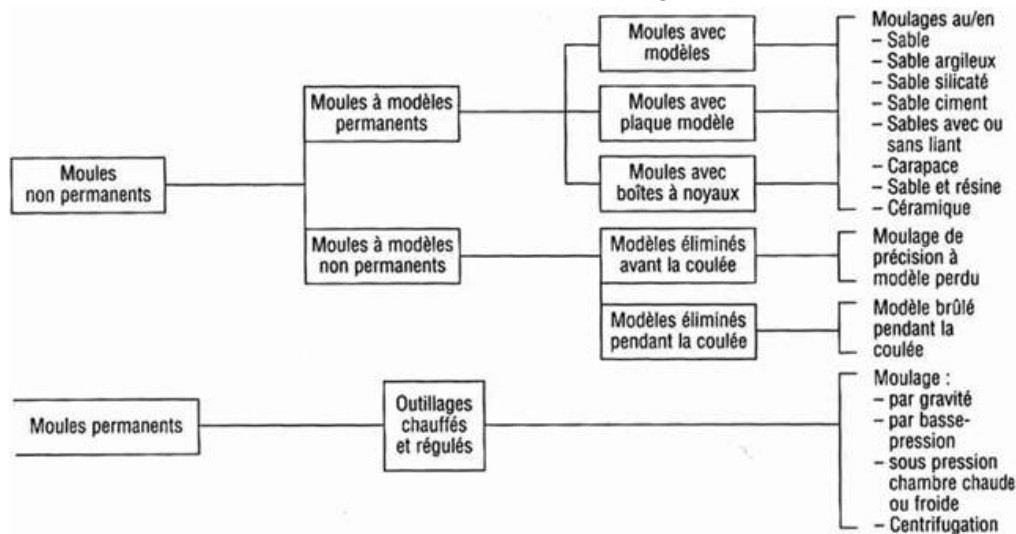


Figure 42 : Les types de moulage⁶⁶

Lors du moulage permanent, le moule est réutilisable plusieurs fois. Cette technique rassemble des procédés ayant un coût d'outillage élevé. Le prix du moule à réaliser est en effet important. Ce type de procédé est donc principalement utilisé pour la production de moyennes ou grandes séries et est donc difficilement substituable par la FA, même si le procédé par centrifugation peut convenir pour de la production unitaire.

Tableau 11 : Comparaison des tailles de séries minimum par procédés de moulage en moule permanent⁶⁷

Procédés	Par gravité	Par basse pression	Sous pression	Centrifugation
Série minium	2 000 pièces	2 000 pièces	5 000 pièces	Pièce unitaire possible

Le moulage en moule non permanent est le procédé le plus classique. Le moule dit « non permanent » est détruit lors de la phase de fabrication de la pièce pour l'extraction de la pièce moulée. Il est très utilisé pour les pièces de grandes dimensions et permet la production de petites unitaires jusqu'au grandes séries.

Tableau 12 : Comparaison des tailles de séries minimum par procédés de moulage en moule permanent⁶⁷

Procédés	Moules à modèles permanents							
	Sable	Sable argileux	Sable silicaté	Sable ciment	Sable avec ou sans liant	Carapace	Sable et résine	Céramique
Série minium	1	1	1	1	1	500	1	1

⁶⁶ <http://tsaucray.free.fr/2%20moulage/21%20les%20différents%20procédes/cours.moulage.htm>

⁶⁷ <http://slideplayer.fr/slide/520147/>

Moules à modèles non permanents		
Procédés	Moulage de précision à modèle perdu	Moulage brûlé pendant la coulée
Série minium	100	1

De nombreux procédés parmi les techniques de moulage en moule non permanent permettent la production de pièces unitaires. **Ce sont ces procédés qui sont les plus menacés par la FA : le moulage par sable, par céramique et le moulage brûlé pendant la coulée.**

- **L'usinage**

L'usinage rassemble plusieurs procédés basés sur le principe d'enlèvement de matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues. Cette technique permet d'obtenir des pièces de grande précision. Elle est bien adaptée à la production de pièces de petites tailles. Les tailles de séries peuvent aller de la pièce unitaire à la moyenne série. Tout comme pour l'usinage plastique, l'usinage métal est peu adapté pour la **réalisation de pièces complexes. Dans ces cas, la FA pourrait permettre de s'affranchir des limites liées à l'outillage et donc remplacer l'usinage.**

Ainsi, la FA représente une menace pour les métiers suivants :

- **L'injection, l'usinage, le formage et l'assemblage pour les pièces en plastiques ;**
- **L'usinage, le moulage par sable, par céramique et le moulage brûlé pendant la coulée pour les pièces en métal.**

Précisons que ces métiers ne sont pas voués à être entièrement remplacés par la FA. Ils ne vont pas disparaître. Ces technologies permettent en effet de fabriquer des pièces en matériaux qui ne sont pas imprimables par la FA, de nombreux alliages notamment. De plus, pour certaines pièces nécessitant une très bonne qualité de surface, les procédés conventionnels restent plus adaptés que la FA. Et pour les séries de plus de 1 000 pièces pour le métal et 10 000 pièces pour le plastique, la FA restera difficilement économiquement viable.

3.4.2. Opportunités de la FA sur la filière de sous-traitance conventionnelle

Bien que la FA puisse présenter une menace pour certains métiers de la sous-traitance conventionnelle, elle constitue également une opportunité. Elle nécessite en effet certaines techniques issues de la sous-traitance traditionnelles pour la finition des pièces. L'outillage rapide peut aussi permettre aux sous-traitants traditionnels de gagner en productivité et donc en compétitivité.

1. La FA : un complément de revenu pour plusieurs métiers conventionnels

Comme nous l'avons vu en partie 2.2.6, les pièces métalliques réalisées en FA ne sont pas utilisables directement en sortie de machine et nécessitent une étape de post-traitement. **Les compétences des usineurs sont souvent sollicitées pour la finition des pièces afin d'obtenir un état de surface satisfaisant.** Parmi les sous-traitants en FA métal, plusieurs ont d'ailleurs des activités historiques en usinage :

- Farella, l'une des trois sociétés dont est issu le fabricant Prismadd est un usineur ;
- Fusia est une société sœur de l'usineur Esteve ;
- 3D&P est une « spin-off technologique » du groupe industriel Aubry Finance, dont l'entreprise COMEFOR est un acteur historique en usinage.

Et pour les entreprises sous-traitantes en FA ne disposant pas de compétences en usinage en interne, des partenariats sont généralement mis en place.

La FA fait également appel aux compétences des entreprises spécialisées sur les **techniques de traitement de surface, de traitement thermique et de contrôle.**

2. La FA : un outil de gain en productivité pour les moulistes

La FA permet la réalisation **rapide d'outillages dédiés aux métiers de la plasturgie et de la fonderie**. Elle permet en effet la fabrication de **maîtres modèles**, c'est-à-dire une pièce qui va être réutilisée pour produire d'autres pièces.

L'utilisation de la FA comme technique de production de maîtres modèles présente deux principaux avantages : **un gain de temps et d'argent**. Le fabricant peut ainsi mettre plus tôt le produit réalisé sur le marché et être plus réactif en cas de pièces cassées ou de moules défectueux. Il est en effet possible de concevoir un nouveau moule rapidement, voire apporter des modifications topologiques sur le moule existant.⁶⁸ La précision des machines permet au modèle réalisé d'être utilisé dans de nombreux procédés allant du modèle pour cire perdue en fonderie au surmoulage silicone.

▪ Fabrication de moules pour la fonderie

La FA peut être utilisée par les moulistes et les fondeurs pour la **fabrication de moules et noyaux pour la fonderie**. Les principaux usages de la FA en fonderie concernent la fabrication de **moules et/ou noyaux en sable ou en cire perdue**.

▪ Moules en sable

La FA permet de réaliser rapidement le maître modèle, permettant ainsi de s'affranchir de l'étape d'usinage à commande numérique qui est contraignante et coûteuse. Les coûts de fabrication et les délais sont ainsi considérablement réduits. **Les coûts sont généralement divisés par deux.**⁶⁹

Quelques fondeurs français ont déjà franchi le pas. Le premier est la **Fonderie Boutté**, dans la Somme, qui s'est dotée depuis novembre 2015 d'une machine permettant d'imprimer du sable. Cette machine est utilisée pour la **fabrication de prototypes et de petites à moyennes séries pour des applications dans l'aéronautique**, secteur représentant un tiers de son activité, principalement. Cette acquisition lui a permis de réduire considérablement ses coûts et ses délais. **Le délai de fabrication est en effet passé de 5 à 2 semaines.**⁷⁰

⁶⁸ <http://www.3dclickshape.com/comment-ca-marche-2/les-applications-de-l-impression-3d-par-industrie/moulage-fonderie.html>

⁶⁹ <http://www.creatix3d.com/contents/imprimantes-3d-professionnelles-1/choisir-par-besoin/moules-modeles-et-coulees-sous-vide>

⁷⁰ http://www.linformateur-leclaireur.fr/une-imprimante-3d-hors-norme-a-la-fonderie-boutte_21208/

Le groupe **Ventana** a également investi dans une machine au sein de son usine à **Arudy** (Pau). Les avantages affichés quant à l'adoption de cette technologie sont nombreux : **la possibilité de fabriquer des formes plus complexes, une limitation des imprécisions dues à l'assemblage et au collage des pièces, un gain en qualité et un raccourcissement des délais de trois mois sur la fabrication de la première pièce.** ⁷¹

- Moules en cire perdue

Le moulage à la cire est une technique utilisée pour la réalisation de pièces uniques et complexes en verre ou en métal. Elle est décomposée en 6 étapes majeures :

- La réalisation d'un moule en silicone basée sur le modèle final ;
- La réalisation d'une ou plusieurs copies du modèle en cire ;
- La réalisation d'un moule en céramique par revêtement autour des modèles en cire ;
- Après solidification du revêtement, la cire est évacuée en chauffant le moule en céramique ;
- Le métal ou le verre fondu est coulé dans le moule en céramique ;
- Le moule en céramique est détruit pour récupérer l'objet. ⁷²

La FA est utilisée pour imprimer directement le modèle en cire. Elle permet donc de s'affranchir de la première étape consistant à réaliser le moule en silicone.

Cette technique offre des perspectives intéressantes pour l'industrie aéronautique pour la **fabrication de pales de turbine de réacteur**. Classiquement, des moules d'injection sont utilisés pour l'obtention de ces pales par fonderie à la cire perdue. D'après Prodways, l'impression de ce maître modèle en FA permet d'apporter de nombreux avantages par rapport au procédé classique :

- Une **géométrie du maître modèle plus complexe** permettant d'améliorer les propriétés aérodynamiques de la pièce et d'envisager de meilleures perspectives de refroidissement du moteur ;
- Une **réduction du poids de la pièce finale** avec une amélioration notable de l'efficacité de la pale de turbine ;
- Un **état de surface et une précision dimensionnelle maximisés** ;
- Une **souplesse de modification du moule maître.** ⁷³

Les motoristes aéronautiques réfléchissent ainsi au remplacement des moules en cire perdue pour les aubes car la 3D permet de concevoir des canaux de refroidissement de ces aubes plus complexes et plus efficaces.

Une technique développée par le CIRTES, Centre Européen de Développement Rapide de Produit, présente des applications à la fois dans le moulage sable et cire perdue. Il s'agit de **procédé nommé Stratoconception®**. Ce procédé consiste en la décomposition automatique de l'objet à réaliser en

⁷¹ <http://www.fonderie-piwi.fr/post/2016/04/20/Ventana-investit-dans-la-fonderie-en-B%C3%A9arn>

⁷² <https://auxmerveilles.wordpress.com/2014/04/01/technologie-la-cire-perdue-version-3d-printing/>

⁷³ <http://www.prodways.com/fr/fonderie-a-la-cire-perdue-de-pale-de-turbines/>

une série de couches appelées strates. Chacune de ces strates est fabriquée par moyens de découpe à partir de matériaux en plaques (microfraisage rapide, découpe laser, découpe au fil, etc.). Les strates sont ensuite assemblées afin de reconstituer la pièce finale. Ce procédé présente de nombreuses applications parmi l'outillage rapide en fonderie comme le montre la Figure 43.

Fonderie en moule non permanent (fonderie sable et à modèle perdu)		Fonderie en moule permanent (moule métallique)
Modèle permanent	Modèle non permanent	
Modèle nature	Modèle en cire	Modèle pour la fonderie gravité
Plaque modèle	Modèle en PS	Modèle pour la fonderie basse pression
Boîte à noyau		Modèle pour la fonderie sous pression

■ Industrialisé
■ En phase actuelle de R&D

Figure 43 : Les différents types d'outillages de fonderie réalisables par le procédé de Stratoconception®

(Source : CETIM)⁷⁴

La société **Ferry Capitain** en Haute-Marne, spécialisée dans la réalisation de pièces de fonderie en fonte et en acier de grandes dimensions (jusqu'à 10 m de diamètre), utilise depuis décembre 2012 cette technique. Grâce à cette acquisition, Ferry Capitain a **réduit en moyenne de trois à une semaine le délai d'obtention de ces grands modèles. Le retour sur investissement était, en 2013, estimé à une année et demie.**⁷⁴

▪ Fabrication de moules pour la plasturgie

La FA permet la fabrication de moules pour des usages en :

- **Injection plastique.** Un moule en FA peut permettre la fabrication de 100 à 200 pièces par la technique d'injection plastique ;
- **Thermoformage.** Cette technique consiste à appliquer une fine feuille chauffée sur un moule, souvent en aluminium, pour lui donner une forme. Le moule réalisé en FA peut remplacer le moule en aluminium pour des séries de moins de 1000 pièces, ce qui est suffisant pour une pré-série ou une série "spéciale" ;
- **Surmoulage silicone.** Ce procédé consiste à couler du silicone liquide sur un maître modèle. Le silicone permet un démoulage rapide sans problème de plan de joint complexe. La FA permet la fabrication d'un moule en matière plastique à base de polyuréthanes pour la réalisation de 1 à 100 pièces dans une vaste gamme de matériaux pour un coût inférieur à l'usinage. L'économie réalisée par rapport à un processus d'usinage classique est de l'ordre de 70%.⁶⁹

⁷⁴ http://www.cetim-certec.com/wp-content/uploads/2013/11/Certec_infos_decembre_2013.pdf

L'entreprise japonaise **Swany Company Ltd.**, spécialisée dans la fabrication et la conception de nouveaux produits, **utilise la technologie de FA pour l'impression de ses moules d'injection plastique durant la phase de prototypage**. Lorsqu'un nouveau produit se rapproche de la phase de production, Swany Company fabrique un moule en FA, qui est placé sur une machine de moulage par injection pour créer un nombre limité de prototypes avec les matériaux d'utilisation finale. **La FA a ainsi permis la réalisation de prototypes ayant des résultats fidèles à la réalité tout en diminuant le temps et le coût nécessaires par rapport aux techniques conventionnelles**. L'utilisation de la FA s'arrête cependant au prototypage : **les moules réalisés en FA ne peuvent pas remplacer les moules d'injection en métal**. Ils ne peuvent pas résister à la chaleur ni à la pression constante nécessaires pour les longs cycles de production. Ainsi, pour Hashizume, directeur de Swany, **les métiers de moulage conventionnel ne sont pas menacés par la FA**. Il précise en effet que : « Certaines personnes disent que l'impression 3D vole le travail des entreprises de moulage. Mais ici, chez Swany, l'impression 3D crée du travail pour elles. »⁷⁵

Un autre exemple d'utilisation de la FA pour des applications en moulage par injection est celui de la société allemande **Hasco, le géant mondial de la fabrication de moules**. Hasco utilise la FA pour **fabriquer des inserts de moule**. Cette fabrication, qui ne prend que quelques heures, permet aux fabricants de moules de **produire et d'échanger les inserts plus rapidement qu'avec les méthodes d'usinage conventionnelles**. La FA a ainsi permis à Hasco de gagner en productivité.⁷⁶

Ainsi, la FA constitue une réelle opportunité pour les acteurs de la filière de sous-traitance conventionnelle. Grâce à l'outillage rapide, la FA peut permettre aux moulistes, tant en plasturgie qu'en fonderie, de lever un certain nombre de freins liés aux délais et aux coûts de fabrication. Ces utilisations ont apporté un gain de compétitivité aux entreprises qui ont franchi le pas.

3.5. Evolution prévisionnelle des besoins en compétences sur la chaîne de valeur

Des mutations sont également à prévoir au sein de la filière de sous-traitance en FA. Cette dernière a en effet besoin d'être structurée et visible afin d'être en capacité de répondre aux besoins des donneurs d'ordres. Même si la rampe de lancement de la FA en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranées aura lieu de manière graduelle jusqu'à 2025, **la filière de sous-traitance doit d'ores et déjà se structurer afin d'anticiper les changements que la FA entraînera**. D&Consultants s'est attaché à identifier ces besoins sur chacun des maillons de la chaîne de valeur.

▪ Les matériaux

Les donneurs d'ordres ont besoin de la **mise sur le marché d'une diversité de matériaux et dans de plus forts volumes**. La gamme de matériaux imprimable doit ainsi être élargie et les fournisseurs de

⁷⁵ <http://www.cadvision.fr/etude-cas/limpression-3d-accelere-fabrication-moules-dinjection/>

⁷⁶ <http://www.cao.fr/actu/6368/HASCO-innove-dans-la-fabrication-de-moules-grace-a-limpression-3D-de-Stratasy.html>

matières premières doivent anticiper les futurs besoins de donneurs d'ordres pour éviter les ruptures de stock.

▪ Les machines

Les acteurs ont besoin de **machines plus performantes** en termes de vitesse de production, de taille de pièces pouvant être fabriquées, de fiabilité, de répétabilité et de contrôle *in-situ*. Le développement de ces machines améliorées sera nécessaire pour que la FA puisse être utilisée à l'échelle industrielle. Le prix des machines devra également diminuer afin **de réduire les coûts de revient** et par conséquent rendre la FA économiquement viable pour la fabrication en série. Enfin, une **simplification d'utilisation des machines pour une prise en main par des opérateurs de production** et non plus d'ingénieurs, voire de docteurs actuellement, est nécessaire.

Plusieurs développements par les fabricants de machines seront donc nécessaires tant au niveau technologique, économique qu'ergonomique pour permettre une montée en cadence de la production.

▪ Les logiciels

Les acteurs, aussi bien les donneurs d'ordres que les sous-traitants, ont besoin d'une **meilleure interopérabilité entre les logiciels de conception, de pilotage et simulation**. A noter que les leaders du marché, Altair et Dassault Systèmes, vont *a priori* prochainement sortir de telles solutions logicielles.

▪ La conception

Les grands donneurs d'ordres ayant tendance à internaliser cette compétence au sein de leur bureau d'études en interne, ce sont **principalement les donneurs d'ordres de petites tailles (PME et ETI) qui (aur)ont des besoins relatifs à ce maillon**. Les sociétés d'ingénieries devront donc développer des offres adaptées à ces entreprises afin de les aider à gérer des modèles par nature complexes liés à la FA.

▪ La production FA

Au cours de notre enquête, plusieurs acteurs interrogés se sont accordés pour dire que **ce n'est pas le nombre d'acteurs mais leur taille qui aujourd'hui constitue un frein pour la filière de sous-traitance en FA**. Il y aurait en effet aujourd'hui suffisamment d'acteurs positionnés sur ce maillon de la chaîne de valeur en France. De plus, sur les secteurs de l'aéronautique, du spatial et du médical, les sous-traitants actuels ont déjà acquis un retour d'expérience avec les donneurs d'ordres, ce qui leur donne une longueur d'avance par rapport aux nouveaux entrants. **Les acteurs actuels doivent donc capitaliser sur cette expérience et atteindre une taille critique pour être en capacité de répondre à la prochaine montée en cadence industrielle sur les pièces en série**. Les sous-traitants doivent également poursuivre **leur intégration de la chaîne de valeur et leur diversification** afin de proposer aux donneurs d'ordres une offre complète intégrant notamment des compétences en parachèvement et sur plusieurs technologies et matériaux.

A noter qu'il peut tout de même encore y avoir de la place pour de nouveaux entrants sur des technologies innovantes sur lesquelles aucun des sous-traitants actuels n'est actuellement positionné et/ou sur des marchés de niche.

▪ **Le post-traitement**

Contrairement au maillon de la production FA, le maillon de post-traitement souffre d'un manque d'acteurs sur certaines technologies de traitement de surface ou de traitement thermique. **Les sous-traitants français doivent donc s'organiser et se multiplier afin d'être en capacité suffisante pour pouvoir répondre à la demande croissante des donneurs d'ordres.**

Outre le manque d'acteurs, ce maillon souffre également d'une immaturité technologique. **Des développements sont donc nécessaires pour lever les verrous technologiques** des techniques de traitement de surface et de traitement thermique sur les pièces réalisées en FA.

▪ **Le contrôle**

Les techniques actuelles de contrôle des pièces en FA sont considérées comme coûteuses et chronophages par les donneurs d'ordres. **Les développements de méthodes alternatives doivent donc se poursuivre afin de faciliter la certification et la qualification des pièces**, l'un des principaux freins actuels du secteur aéronautique et spatial, et donc d'accélérer leur mise sur le marché.

3.6. Synthèse de l'impact de la FA sur la filière de sous-traitance globale

Cette partie 3 a permis de démontrer que la FA constitue davantage une opportunité qu'une menace pour la filière de sous-traitance globale. La Figure 44 montre clairement **qu'il y reste beaucoup de compétences à développer et de marchés à saisir pour les acteurs de la filière de sous-traitance :**

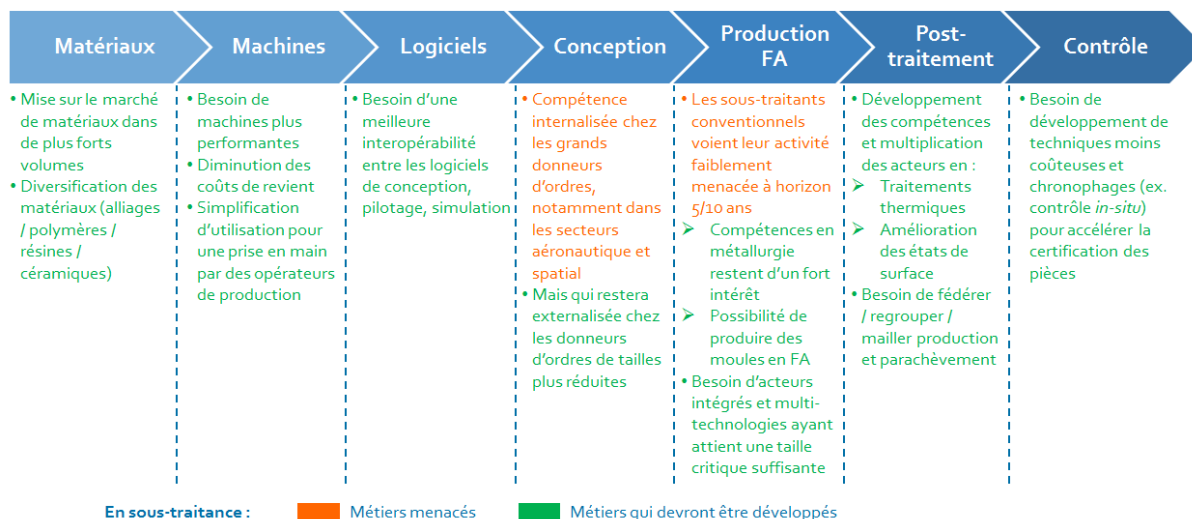


Figure 44 : Besoins prévisionnels en compétences sur la chaîne de valeur de la sous-traitance globale (Source : D&Consultants, 2016)

4. CARTOGRAPHIE DE LA FA EN REGION OCCITANIE / PYRENEES-MEDITERRANEE POSITIONNES SUR LA FA

L'ensemble des acteurs positionnés sur la FA en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranées ont été recensés grâce à l'utilisation de plusieurs ressources complémentaires :

- Un sondage en ligne lancé auprès de plus de 2 750 entreprises localisées en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranées ;
- Les entretiens qualitatifs approfondis réalisés auprès des donneurs d'ordres, experts et sous-traitants de la filière ;
- Les retours des membres du comité de pilotage composé de Madeeli, du Conseil Régional de la région Occitanie / Pyrénées-Méditerranées, de la DIRECCTE, du pôle de compétitivité Aerospace Valley et de l'IRT Saint Exupéry ;
- Des prises de contact complémentaires auprès de structures institutionnelles : CCI Aveyron, Transferts LR, Mecanic Vallée, Eurobiomed, Club leader, région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée, DIRECCTE Gard et Aude ;
- Les annuaires dédiés à la FA disponibles en ligne, notamment ceux édités par « 3D natives »⁷⁷ et « Ze small factory »⁷⁸.

4.1. Résultats du sondage en ligne

Les industriels positionnés sur au moins l'une des trois filières (transport, santé, agro-industrie) et localisés dans la région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée ont été interrogés *via* un questionnaire en ligne afin de connaître leur positionnement vis-à-vis de la fabrication additive. L'enquête s'est déroulée sur 2 mois, de mai à juillet 2016. Sur les 2 750 entreprises contactées, 92 ont répondu au questionnaire, soit un taux de retour de 3,3%.

Sur les 92 entreprises répondantes, 55 ont indiqué que la FA présentait un intérêt vis-à-vis de leur activité.

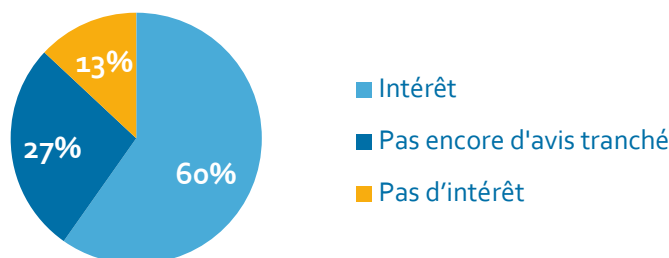


Figure 45 : Positionnement des entreprises vis-à-vis de la FA (Source : D&Consultants, 2016)

⁷⁷ <http://www.3dnatives.com/annuaire-impression-3d/>

⁷⁸ <http://www.zesmallfactory.com/annuaire>

Parmi les entreprises ayant répondu « Pas d'intérêt », la principale raison évoquée est que les entreprises ne se sentent pas concernées par ce sujet. Les autres réponses évoquées sont liées au fait que « le marché est déjà attaqué » et qu'il n'y a donc pas de place pour un nouvel entrant, ou encore au fait que la FA n'a pas une cadence de production suffisante pour les grandes séries.

Parmi les entreprises ayant répondu « Pas encore d'avis tranché », la raison évoquée à 52% est le manque d'informations sur les possibilités offertes par la technologie. La raison arrivant en deuxième position est que les acteurs disposent d'une visibilité insuffisante sur les marchés pouvant être visés par la FA.

Enfin, parmi les entreprises ayant répondu « Intérêt », près de la moitié des répondants utilisent ou s'intéressent à la FA pour la fabrication de pièces destinées à être vendues. 25% des répondants s'y intéressent pour un usage en interne (prototypage, outillage rapide).



Figure 46 : Usages de la FA des acteurs intéressés (Source : D&Consultants, 2016)

4.2. Acteurs en présence

Le recensement présenté ci-dessous est un état des lieux des acteurs localisés en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée⁷⁹ et ayant une activité lancée ou en phase pré-commerciale en FA à date du 30 juin 2016. Les projets en cours ont été identifiés sur la base des entreprises qui ont répondu à la sollicitation via le sondage en ligne et les demandes d'entretiens.

⁷⁹ Acteurs ayant leur siège social ou au moins une structure (usine, bureaux, etc.) localisé en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée

4.2.1. Les donneurs d'ordres

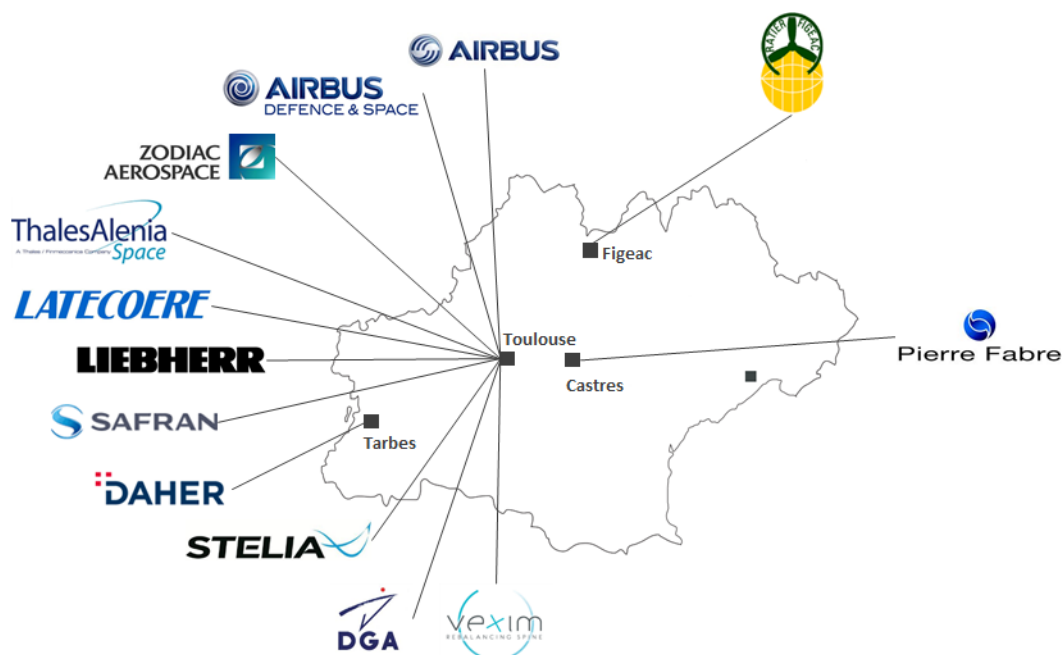


Figure 47 : Cartographie des donneurs d'ordres travaillant sur la FA (Source : D&Consultants, 2016)

La grande majorité des donneurs d'ordres identifiés appartient au secteur aérospatial. On retrouve en effet :

- Le constructeur **Airbus** à la fois en aéronautique et en spatial ;
- Le fabricant de satellites **Thales Alenia Space** ;
- Les équipementiers **Daher, Latécoère, Liebherr Aerospace, Ratier-Figeac, Stelia et Zodiac Aerospace** ;
- Le motoriste Safran à travers sa filiale **Safran Power Units** (anciennement Microturbo).

Seuls deux acteurs ont été identifiés dans la santé : **Pierre Fabre** et **Vexim** au sein de la filière santé.

4.2.2. Les organismes de recherche et les plateformes

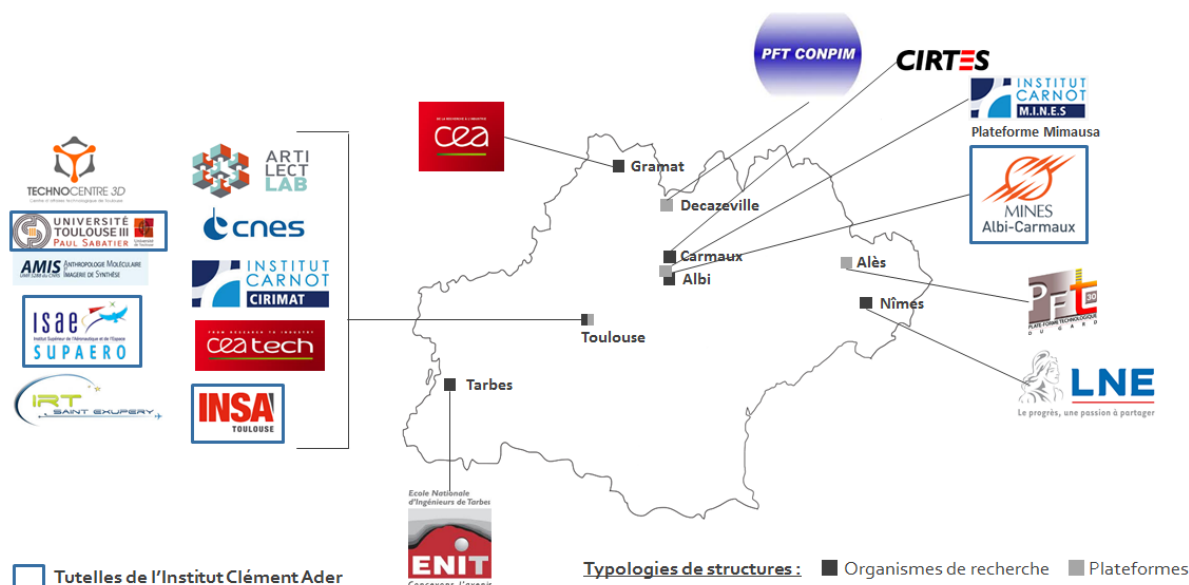


Figure 4.8 : Cartographie des organismes de recherche et des plateformes ayant des activités en FA (Source : D&Consultants, 2016)

Cette cartographie recense les organismes de recherche menant des travaux sur la FA ainsi que les plateformes, publiques ou privées, dotées de moyens technologiques sur ce sujet.

Parmi les **instituts de recherche**, on retrouve :

- L'**Institut Clément Ader**, laboratoire de recherche qui s'attache à l'étude mécanique des structures, systèmes, procédés et matériaux pour l'aéronautique et le spatial, et associant quatre établissements d'enseignement supérieur et de recherche, les **Mines d'Albi**, l'**ISAE-SUPAERO**, l'**INSA Toulouse** et l'**Université Paul Sabatier** ;
- L'**Institut Carnot CIRIMAT**, qui possède une machine de fabrication additive et travaille avec des acteurs des secteurs de l'aéronautique et du médical ;
- Le **CEA**, à travers ses deux structures en région : le CEA Tech à Toulouse qui mène des activités de recherche, notamment sur la technique SLA céramique, et le CEA Gramat qui est en phase de réflexion sur des projets de recherche en FA ;
- Le **CNES** qui mène des travaux de recherche sur la FA pour des applications à la fois sur les lanceurs et les satellites ;
- L'**ENIT** qui s'est doté d'une machine FA ;
- Le **laboratoire AMIS** au sein de l'Université Paul Sabatier utilise la FA pour reconstituer des morceaux de fossiles ;
- Le **LNE** qui a des activités de recherche dans le domaine du contrôle en FA ;
- Le **CIRTES**, société labellisée Structure de Recherche Contractuelle (SRC), qui dispose d'un savoir-faire en Stratoconception®.

Parmi les **plateformes**, on distingue :

- Les plateformes publiques ou partiellement publiques :
 - L'**IRT Saint-Exupéry** qui prépare une plateforme dédiée à la fabrication additive dont les objectifs sont de faire monter en maturité les technologies à travers des projets de recherche pouvant regrouper : Grands Groupes, PME et Universitaires, disséminer les technologies au niveau des PME et soutenir / proposer des actions de formation ;
 - La **PFT du Gard 3D INNOV**, plateau technique au service des TPE et PME équipé de machines pour l'impression de plastiques et de résines. Un partenariat a été mis en place avec une plateforme en région PACA sur la partie FA métallique ;
 - La **plateforme MIMAUSA**⁸⁰ au sein de l'Institut Carnot M.I.N.E.S qui s'est équipée en 2015 d'une machine de FA basée sur la fusion laser de lits de poudres pour :
 - L'étude de la fabrication de matériaux métalliques (alliages d'aluminium, de titane, aciers, superalliages) par ce procédé ;
 - L'étude de leur comportement mécanique et de leur microstructure.
 - La **PFT CONPIM**, intégrée au lycée Alexis Monteil et en association avec d'autres établissements (La Découverte, Jean Jaurès, Paul Ricquet et Gaston Monnerville), dispose en interne, de plusieurs machines FA pour des usages en prototypage rapide.
- Les plateformes privées :
 - Le **Centre d'Affaires Technologique de Toulouse (Technocentre 3D)** destiné à l'accueil de porteurs de projet souhaitant se développer sur la FA. Des scanners 3D et machines plastiques sont mis à leur disposition ;
 - Le **Fablab de Toulouse, Artilect Lab**, qui propose des ateliers, des formations et met à disposition des utilisateurs des machines numériques.

4.2.3. Les acteurs positionnés sur la chaîne de valeur de la FA

D&Consultants a recensé 29 entreprises ayant une activité lancée et/ou pré-commerciale en FA. La répartition par maillon de la chaîne de valeur est présentée ci-dessous. A noter que nous avons placé ces acteurs sur le maillon principalement adressé. Comme nous l'avons vu, les entreprises ont tendance à être intégrées sur cette chaîne et peuvent donc proposer des offres sur plusieurs maillons.

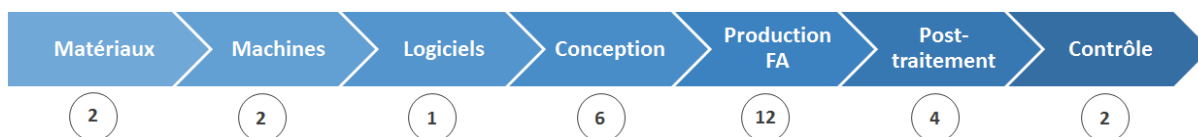


Figure 49 : Répartition des sous-traitants régionaux sur la chaîne de valeur FA (Source : D&Consultants, 2016)

Parmi ces 29 entreprises, **21 ont leur siège social localisé en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée**. La grande majorité de ces sous-traitants sont des entreprises de petite taille : **36%**

⁸⁰ Mise en œuvre de matériaux aéronautiques et surveillance active

sont des TPE et 40% des PME. 27 de ces sous-traitants adressent le secteur des transports, dont 96% l'aéronautique.

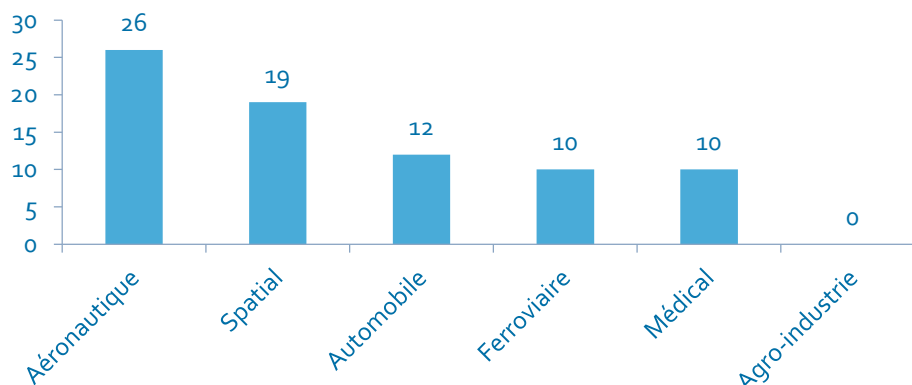


Figure 50 : Répartition des sous-traitants régionaux en FA par secteur d'application (Source : D&Consultants, 2016)⁸¹

D&Consultants s'est attaché à identifier dans la suite de l'étude l'ensemble des compétences régionales disponibles sur chacun de ces maillons dans la filière de sous-traitance FA.

1. Les fournisseurs de matériaux

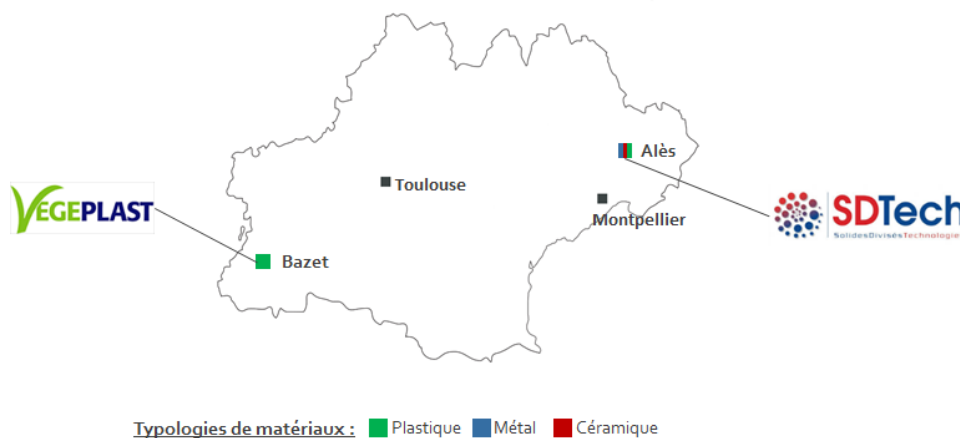


Figure 51 : Les fournisseurs de matériaux destinés à des usages en FA (Source : D&Consultants, 2016)

La région Occitania / Pyrénées-Méditerranée dispose de deux fournisseurs couvrant l'ensemble des principaux matériaux pouvant être imprimés aujourd'hui (plastique métal et céramique) :

- **Vegeplast** développe et commercialise des filaments d'un polymère composé d'acide polylactique, 100% d'origine végétale, issu d'amidon de céréales produits en France (blé, maïs, etc.) ;
- **SDTech** fabrique une diversité de poudres à façon : des oxydes minéraux (céramiques), des oxydes métalliques et des polymères.

⁸¹ Une entreprise peut être positionnée sur plusieurs secteurs d'application

2. Les fabricants de machines et les éditeurs de logiciels

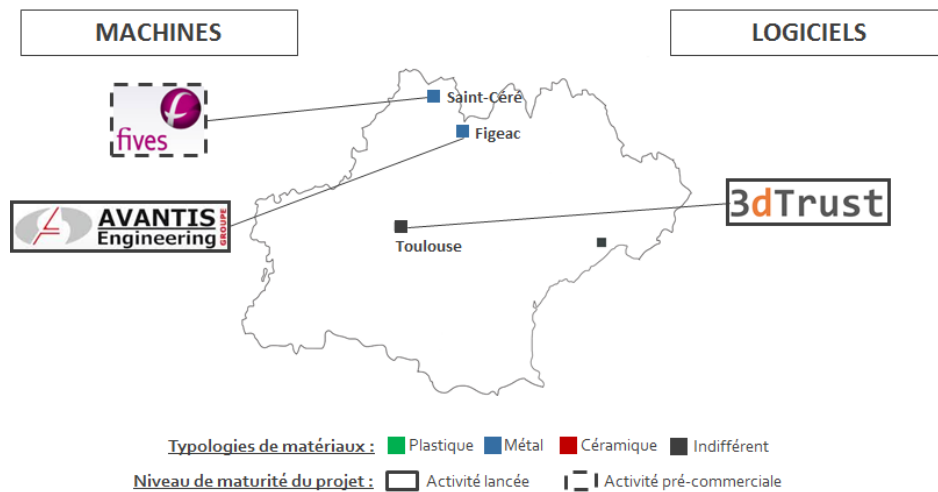


Figure 52 : Les fabricants de machines FA et les éditeurs de logiciels (Source : D&Consultants, 2016)

Nous avons identifié trois entreprises aujourd'hui intervenant sur le maillon des fabricants de machines :

- Une partie des machines de la joint-venture AddUp est en production dans les sites **Fives** de Saint-Céré. Le site de CapdeNac sera sollicité si besoin de plus de capacité ;
- **Avantis Engineering** a mis en place un partenariat avec Beam pour la conception et la réalisation du bâti des machines de petites dimensions ;

Une unique entreprise a été identifiée sur le maillon des éditeurs de logiciels. Il s'agit de la start-up **3dTrust**. Actuellement incubée au sein de l'accélérateur de business pour l'industrie aéronautique et spatiale Airbus Bizlab, cette entreprise a développé une méthode innovante pour sécuriser les flux de données d'impression vers des imprimantes 3D à distance, et garantir la traçabilité et la qualité des pièces produites.

3. Les bureaux d'études et sociétés d'ingénieries

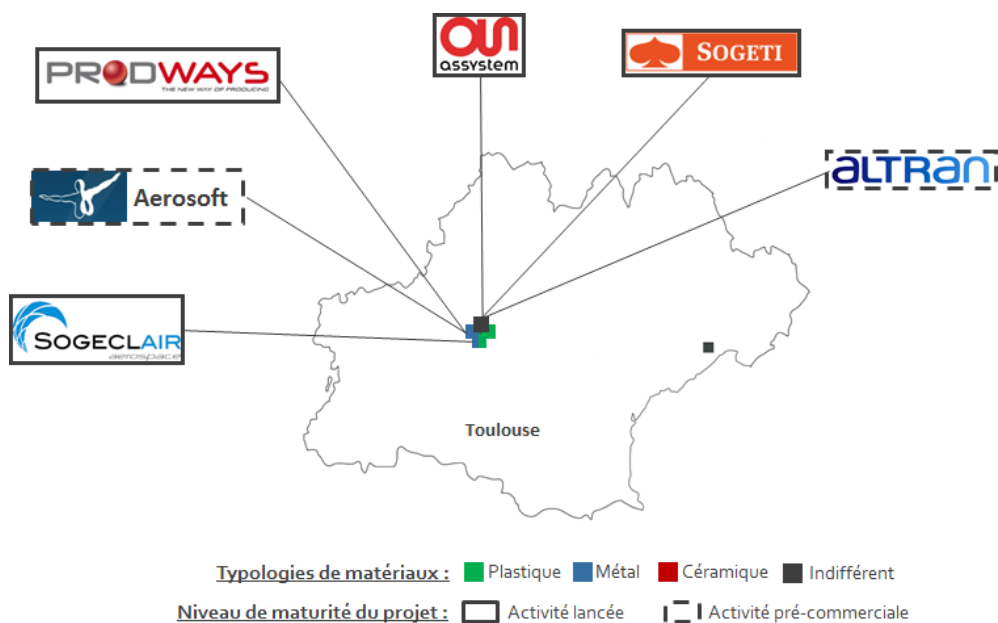


Figure 53 : Les entreprises proposant des services en conception sur la FA (Source : D&Consultants, 2016)

Quatre sociétés proposent déjà une offre de services dans la FA aux donneurs d'ordres :

- **Prodways** qui, à travers **ECA Group**, également filiale du Groupe Gorgé, conçoit des outillages à destination des donneurs d'ordres dans les secteurs aéronautiques et ferroviaires ;
- **Assystem** fournit des offres :
 - En conception pour les grands donneurs d'ordres et les équipementiers de rang 1 ;
 - De conseil pour les PME et ETI ;
 - De support à la qualification de pièces et/ou de poudres pour les donneurs d'ordres.
- **SOGETI** propose quatre offres de services en FA :
 - Une offre de conseil principalement destinée aux donneurs d'ordres consistant en une analyse technico-économique afin d'identifier les pièces pouvant être réalisées en FA en fonction de la maturité des technologies et du retour sur investissement ;
 - Une offre liée au design, destinée aux donneurs d'ordres et sous-traitants ;
 - Une offre liée aux logiciels à travers des partenariats avec les éditeurs ;
 - Une offre de formation en e-learning et en présentiel destinée aux bureaux d'études
- **Sogeclair** a créé un pôle dédié à la FA en aéronautique avec une dizaine de collaborateurs. Par ailleurs le groupe est fournisseur direct de pièces conçues et supervisées par la société et fabriquées en sous-traitance.

Deux entreprises vont prochainement proposer une offre de services sur cette activité :

- **Aerosoft** qui est actuellement en phase de prospection en France pour une activité de conception au sein de leur BE à Colomiers. La fabrication pourrait ensuite être réalisée sur son site en Italie qui dispose d'une machine EBM ;
- **Altran** qui est en cours de création d'une business unit sur la FA.

4. Les sous-traitants pour la production FA

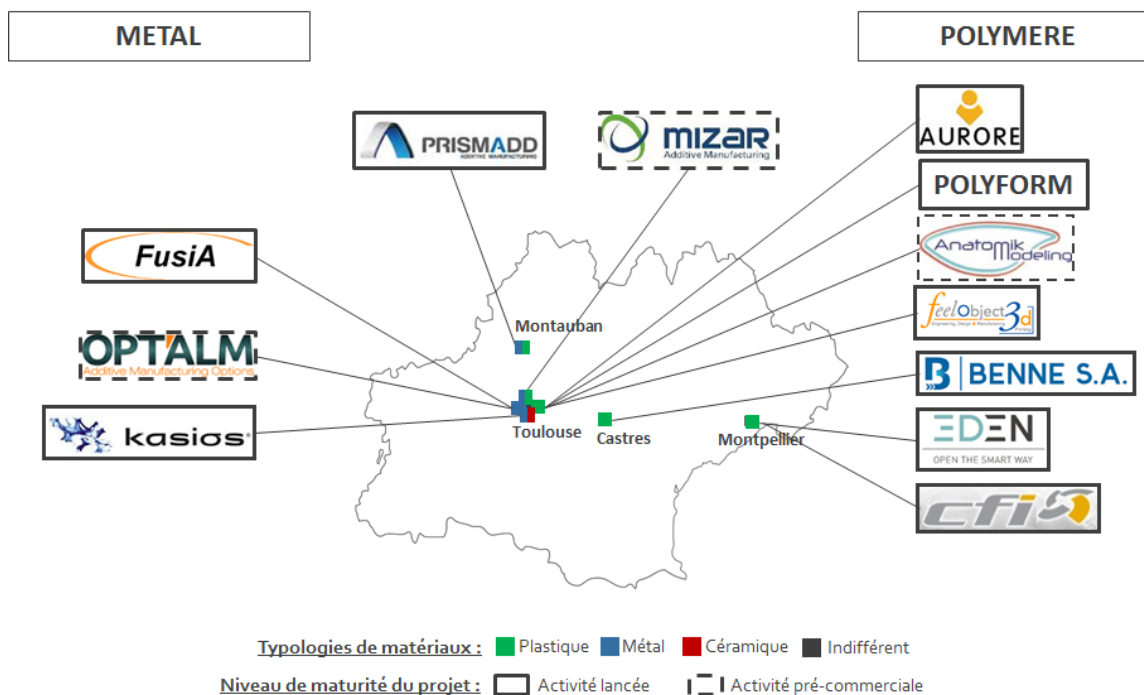


Figure 54 : Les sous-traitants en production FA (Source : D&Consultants, 2016)

La région Occitania / Pyrénées-Méditerranée dispose d'un nombre important de sous-traitants en production FA. Ces sous-traitants couvrent l'ensemble des typologies de matériaux.

- Trois entreprises sont positionnées sur une **offre multi-matériaux** :
 - **Prismadd** qui est un prestataire à la fois sur le plastique et le métal. A noter que le site de Montauban sera davantage positionné sur le métal. La FA plastique sera localisée sur le site de Nantes. Les procédés utilisés sont :
 - En plastique : le LBM, le FDM, et le MJP (Modelage à Jets Multiples) ;
 - En métal : le SLM. A noter que Prismadd va prochainement investir dans l'EBM et le DED.
 - **Mizar Additive Manufacturing** qui est en cours d'installation à Toulouse avec 2 machines en procédé de lit de poudre plastique (LBM) et métal (SLM) ;
 - **Kasios** qui conçoit des substituts osseux en céramique ainsi que des implants en titane. La production est réalisée au sein de ses unités de production en Belgique par SLA et EBM.
- Deux entreprises sont positionnées **exclusivement sur la FA métallique** :

- **Fusia** qui est prestataire sur la technologie fusion laser de poudre métal auprès des donneurs d'ordres du secteur aéronautique et spatial ;
- **Opt'Alm** qui réalise actuellement la conception et sous-traite la fabrication, va prochainement investir dans une machine DED pour trois typologies de fabrication : la réparation de pièces, l'ajout de matière et de fonctions sur des pièces existantes et la fabrication de pièces à façon.
- Sept entreprises sont positionnées **exclusivement sur la FA plastique** :
 - **Aurore Arka** qui est prestataire dans la conception, la modélisation et la fabrication de pièces en FA, des prototypes aux séries (jusqu'à la centaine de pièces), avec les techniques de stéréolithographie, du frittage laser et de coulée sous vide ;
 - **Polyform** qui fabrique des prototypes et des petites séries par les mêmes technologies qu'Aurore Arka ;
 - **Benne S.A.** qui a investi dans une machine FDM pour la fabrication de pièces complexes de petites et moyennes dimensions ne pouvant être fabriquées en usinage standard. Ces pièces réalisées en FA sont intégrées dans les systèmes de convoyeurs qu'elle commercialise mais également pour d'éventuels besoins clients ;
 - **Eden** qui propose une solution complète et intégrée d'acquisition d'empreintes du pied du patient par scan 3D, de façonnage numérique et d'impression 3D d'orthèse plantaire à destination des podologues :
 - La location d'un scanner 3D pour numériser le pied du patient ;
 - La location d'un ordinateur contenant un logiciel CRM ainsi qu'une application de modélisation ;
 - L'impression de l'orthèse avec le procédé de dépôt de fil.
 - **CFI** qui propose des prestations liées au prototypage rapide et en conception basées sur les technologies FDM, LBM et SLA. CFI propose également la production de petites séries par duplication sous vide à l'aide de résines polyuréthanes ;
 - **Anatomik Modeling**, qui conçoit et fabrique des implants 3D sur mesure en silicone, se sert de la FA pour le prototypage rapide ainsi que pour la fabrication de certains implants ;
 - **FeelObject3d** est une société spécialisée dans la fabrication en petites séries de pièces plastiques et composites.

Ce recensement a permis d'identifier l'ensemble des compétences en sous-traitance FA en région. Le tableau met en perspective ces compétences par rapport aux technologies identifiées comme les plus prometteuses pour une industrialisation en partie 1.3.

Tableau 13 : Les procédés les plus prometteurs pour une utilisation industrielle chez les sous-traitants en région (Source : D&Consultants, 2016)

Entreprises	Métal				Plastique		Céramique
	SLM	EBM	FDM	DED	LBM	FDM	SLA
Aurore Arka					X		
Benne S.A.					X	X	
CFI					X	X	X
Eden						X	
Fusia	X						
Mizar	X				X		
Opt'Alm				X			
Prismadd	X	X*		X*	X	X	
Polyform					X		

* : Prochainement disponible

Ce tableau montre que la région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée possède de solides compétences sur la FA plastique et notamment la technologie LBM. Le volume d'entreprises positionnées sur FA métal est plus faible mais le parc machine ne l'est pas pour autant. En effet, **les entreprises telles que Fusia ou Prismadd sont de plus grande taille et ont des capacités de production plus importantes que les entreprises positionnées sur la FA plastique.**

Parmi les technologies identifiées comme les plus prometteuses pour une industrialisation, deux manquent en région : le FDM métal et le SLA céramique. La première technologie étant encore à un faible niveau de maturité, un investissement dans cette technologie aurait été prématuré. Concernant la deuxième technologie et au regard de la taille réduite du marché que représentent les technologies céramique, il y a aujourd'hui suffisamment d'acteurs en France pour répondre à la demande. Nous pouvons tout de même noter la présence de compétences en SLA céramique en région : le CEA Tech à Toulouse qui mène actuellement des projets de recherche sur ce sujet. Dans les prochaines années, des besoins en investissement sur ces deux technologies se feront certainement ressentir.

5. Les prestataires en post-traitement et en contrôle

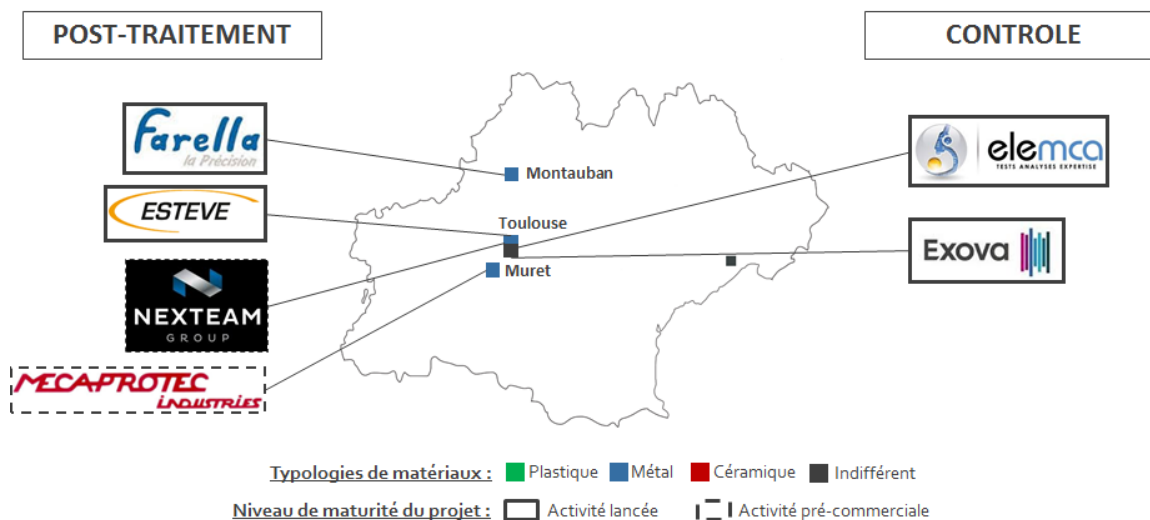


Figure 55 : Les prestataires en techniques de post-traitement et de contrôle adaptées aux pièces réalisées en FA (Source : D&Consultants, 2016)

Nous avons identifié quatre entreprises réalisant des **reprises d'usinage de pièces métalliques réalisées en FA** en région :

- **Farella** qui parachève notamment les pièces réalisées par Prismadd ;
- **Esteve** qui traite principalement les pièces fabriquées par sa filiale Fusia ;
- **Nexteam** qui travaille un partenariat avec Prodways ;

La région dispose également de compétences en **parachèvement** pouvant être mises au service de la FA à travers les entreprises telles que :

- **ATECA** à Montauban qui possède des compétences en traitement thermique sous-vide et/ou sous pression partielle ;
- **Thermi-Garonne** à Roques sur Garonne qui dispose d'un atelier de traitement thermique à façon visant principalement l'industrie aéronautique et spatiale ;
- **Mecaprotec** à Muret qui est engagé dans quelques projets R&D aux côtés de Fusia. Nous pouvons citer par exemple le projet PIPO visant à définir un pilote de polissage spécifique aux pièces complexes en FA et également les projets DEFI 3D (Aerosat) et CUMIN (Corac)⁸² ;
- **PRODEM** à Cornebarrieu qui met à la disposition des acteurs en aéronautique ses compétences en traitement de surface sur des alliages légers ainsi que des métaux durs.

Deux structures offrent quant à elles des **prestations liées au contrôle** :

- Le **laboratoire français ELEMCA** qui contrôle les pièces par tomographie à rayons x ;

⁸² <http://www.aerospace-valley.com/actualites/fabrication-additive-r%C3%A9sultats-de-l%E2%80%99appel-%C3%A0-manifestation-d%E2%80%99int%C3%A9r%C3%AAt-sur-des-%C3%Agtudes-de>

- Le **groupe anglais Exova** qui a une implantation à Toulouse et qui a développé de nouveaux services pour la FA :
 - La caractérisation des poudres ;
 - La caractérisation chimique de la matière ;
 - L'accompagnement des fabricants de pièces pour la qualification aéronautique.

6. Synthèse des compétences présentes en région

La Figure 56 montre que les acteurs identifiés en région couvrent l'ensemble de la chaîne de valeur ainsi que l'ensemble des matériaux. Des manques ont été identifiés au sein du maillon de la production FA mais justifiés par une immaturité technologique et des besoins émergents. Les seules compétences manquantes en région et dont le besoin est remonté de la part des donneurs d'ordres interrogés concernent le maillon du post-traitement : le traitement de surface et le traitement thermique.

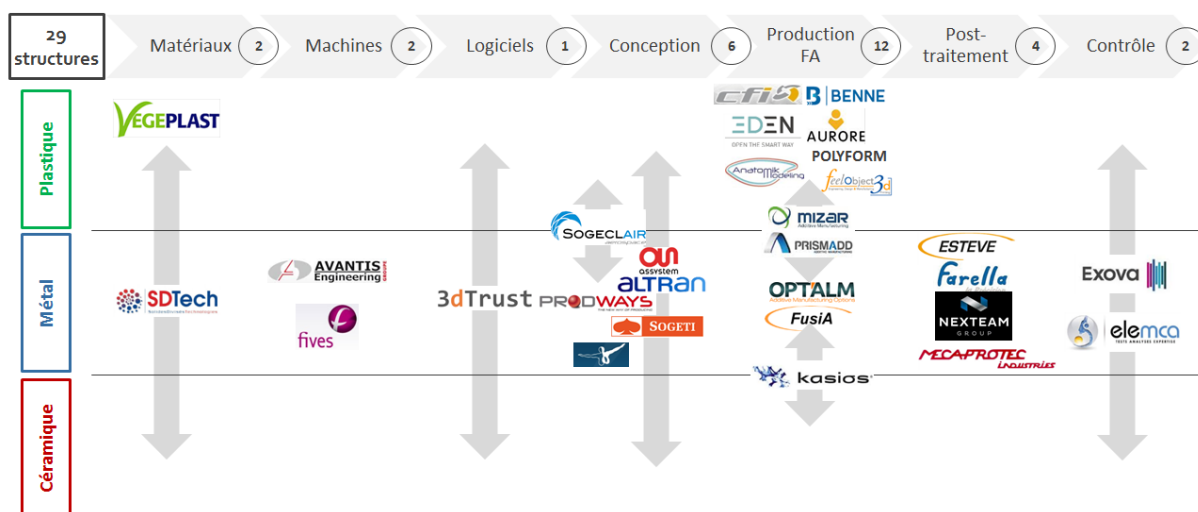


Figure 56 : Répartition des acteurs régionaux sur la chaîne de valeur et par typologie de matériau (Source : D&Consultants, 2016)

Le marché de l'offre en FA est encore naissant mais présente de fortes dynamiques de développement. En effet, les réponses au sondage en ligne ainsi que les entretiens auprès des entreprises régionales nous ont permis d'identifier de nombreux acteurs impliqués dans des projets R&D ou en phase de pré-étude sur la FA comme indiqué ci-dessous.

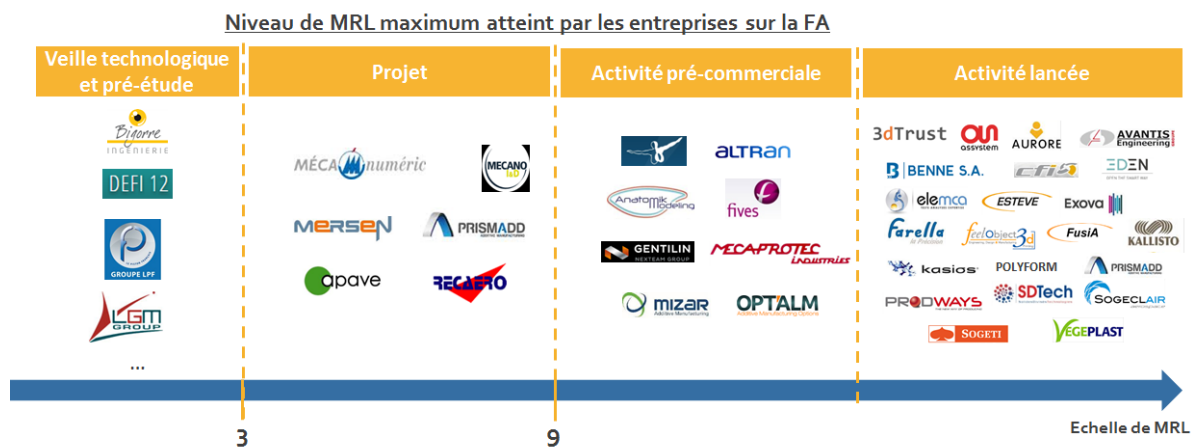


Figure 57 : Répartition des acteurs par niveau de MRL maximum atteint par les projets en FA (Source : D&Consultants, 2016)

5. PRECONISATIONS POUR LES ENTREPRISES DU TERRITOIRE

A travers cette étude, nous avons pu établir que la **FA peut constituer une réelle opportunité pour les acteurs de la filière de sous-traitance** en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranées. Cependant, **D&Consultants ne recommande pas aux entreprises sous-traitantes d'investir massivement dès maintenant** dans cette technologie pour deux principales raisons :

- **L'immaturation technologique des machines** qui risquent de devenir rapidement obsolètes, particulièrement sur l'impression 3D métal, ne laissant pas le temps aux entreprises ayant investi dans l'une ou plusieurs d'entre elles de les amortir ;
- **La nécessité de présenter en amont une feuille de route claire et convaincante qui doit être approuvée par des donneurs d'ordres**, cette approbation étant le plus souvent un préalable au lancement de co-développements et à la fourniture de pièces

Les besoins du marché en FA sont encore insuffisants pour justifier l'arrivée de nombreux acteurs. Mais ces besoins devraient augmenter fortement d'ici 10 ans. **La rampe de lancement de la FA** en région Occitanie / Pyrénées-Méditerranées, principalement portée par le secteur aéronautique, devrait en effet **avoir lieu en deux temps**.

D'ici 2018-2020, l'arrivée à maturité des technologies, notamment métal, devrait permettre de déclencher une **première phase de montée en puissance**. Cette échéance doit donc être anticipée par des actions à court terme telles que :

- **Une veille technologique ;**
- **Une participation aux journées techniques et/ou tables rondes organisées sur la thématique ;**
- **Une familiarisation avec les technologies au sein de plateformes technologiques ;**
- **Une formation du personnel ;**
- **Des montages de projets R&D collaboratifs (ou non) sur cette thématique ;**
- **Des investissements limités dans des machines dédiées au prototypage et à l'outillage rapides.**

Ces actions permettront de définir une **stratégie technologique et industrielle permettant d'accompagner la seconde phase de montée en puissance attendue pour 2025** (date hypothétique de lancement de nouveaux programmes). Les investissements industriels en parcs machines / ateliers de production 3D pourraient donc être réalisés à compter de 2020.

L'intégration de la FA au sein des entreprises sous-traitantes au sein de leur stratégie de développement doit ainsi se faire progressivement et prudemment. D&Consultants propose une intégration en **six étapes** :

1. Etude d'opportunité

Les entreprises sous-traitantes doivent identifier l'ensemble des atouts pouvant être apportés par la FA vis-à-vis des activités de leurs clients. Pour cela, une veille technologique est nécessaire afin de pouvoir déterminer si la FA est une technologie avantageuse par rapport aux techniques actuelles. Plusieurs paramètres sont à prendre en compte : secteur(s) applicatif(s) visé(s), matériaux utilisés, tailles des séries, niveau de complexité des pièces, taille des pièces, coût de fabrication, etc.

2. Démarche client

Une fois l'ensemble de ces atouts identifiés, une roadmap technologique doit être établie et présentée au(x) client(s). Cette démarche fait en effet partie des critères de sélection des sous-traitants en FA ; les donneurs d'ordres étant à la recherche de sous-traitants qui sont force de proposition.

Cette démarche permet également d'éviter tout investissement prématuré. Le sous-traitant doit en effet s'assurer de l'intérêt de son ou ses clients pour la FA avant d'acquérir des machines industrielles qui peuvent être très coûteuses, notamment en FA métal.

3. Sélection de la technologie

Deux cas de figure peuvent ensuite se présenter :

- Le client n'est pas convaincu par la roadmap présentée. Même si la FA ne présente alors pas d'intérêt pour un usage en fabrication rapide, le sous-traitant a tout intérêt à étudier l'opportunité d'utiliser la FA pour un usage interne tel que l'outillage rapide ou le prototypage rapide. Une nouvelle étude d'opportunité doit alors être réalisée ;
- Le client est convaincu par la roadmap présentée. Le sous-traitant a alors le choix entre continuer seul ou à travers un projet collaboratif impliquant le client.

Dans ces deux cas, des collaborations avec des structures déjà équipées sont nécessaires avant l'acquisition de machines FA. Ces collaborations permettront de sélectionner la technologie FA la plus pertinente pour les applications envisagées. Plusieurs essais doivent ainsi être réalisés au sein de structures qui peuvent être des plateformes, des bureaux d'études ou encore des sous-traitants actuels en FA.

A noter que si la technologie la plus adaptée aux applications envisagées n'a pas encore atteint un niveau de maturité suffisant, la mise en place d'un projet R&D collaboratif intégrant un donneur d'ordre et un laboratoire de recherche est fortement conseillée. Le sous-traitant peut également attendre l'arrivée à maturité de la technologie et investir au bon moment. Une veille technologique est alors nécessaire pour anticiper cette arrivée à maturité.

4. Montée en compétence

Une fois la technologie FA sélectionnée, le sous-traitant doit acquérir les compétences nécessaires pour une internalisation de la technologie FA. Cette montée en compétence peut passer par des formations délivrées par des bureaux d'études, les plateformes technologiques ou bien même les

fabricants de machines. Des journées techniques ainsi que des tables rondes sur ce sujet peuvent également être l'occasion pour les acteurs de partager leurs retours expériences.

5. Investissement

Une fois la technologie sélectionnée et bien maîtrisée, le sous-traitant peut investir dans une ou plusieurs machines pour lancer les premiers essais sur des prototypes. A travers toutes les étapes préalables, le sous-traitant s'est normalement assuré que la technologie est bien arrivée à maturité et qu'il n'y a donc pas de risque d'obsolescence rapide de la machine acquise.

6. Déploiement

La phase d'industrialisation peut ensuite être lancée. Le déploiement a alors lieu soit pour un usage interne, soit pour une commercialisation de pièces réalisées en FA. Dans ce deuxième cas, les sous-traitants devront acquérir progressivement les compétences complémentaires à la production FA dans le but de s'intégrer verticalement sur la chaîne de valeur et de répondre aux besoins des donneurs d'ordres. Cela peut se faire par la mise en place de partenariats, le rachat d'entreprises ou encore la fusion avec des entreprises proposant des offres de services en usinage, traitement de surface, traitement thermique, *etc.* A noter que les sous-traitants doivent avoir des capacités d'investissement suffisantes pour pouvoir acquérir un parc machines plus conséquent si un ou plusieurs de ses clients souhaite(nt) monter en cadence de production.

A noter que toute collaboration avec un donneur d'ordre s'accompagne d'une clause au contrat de services stipulant que ce dernier dispose des droits requis.

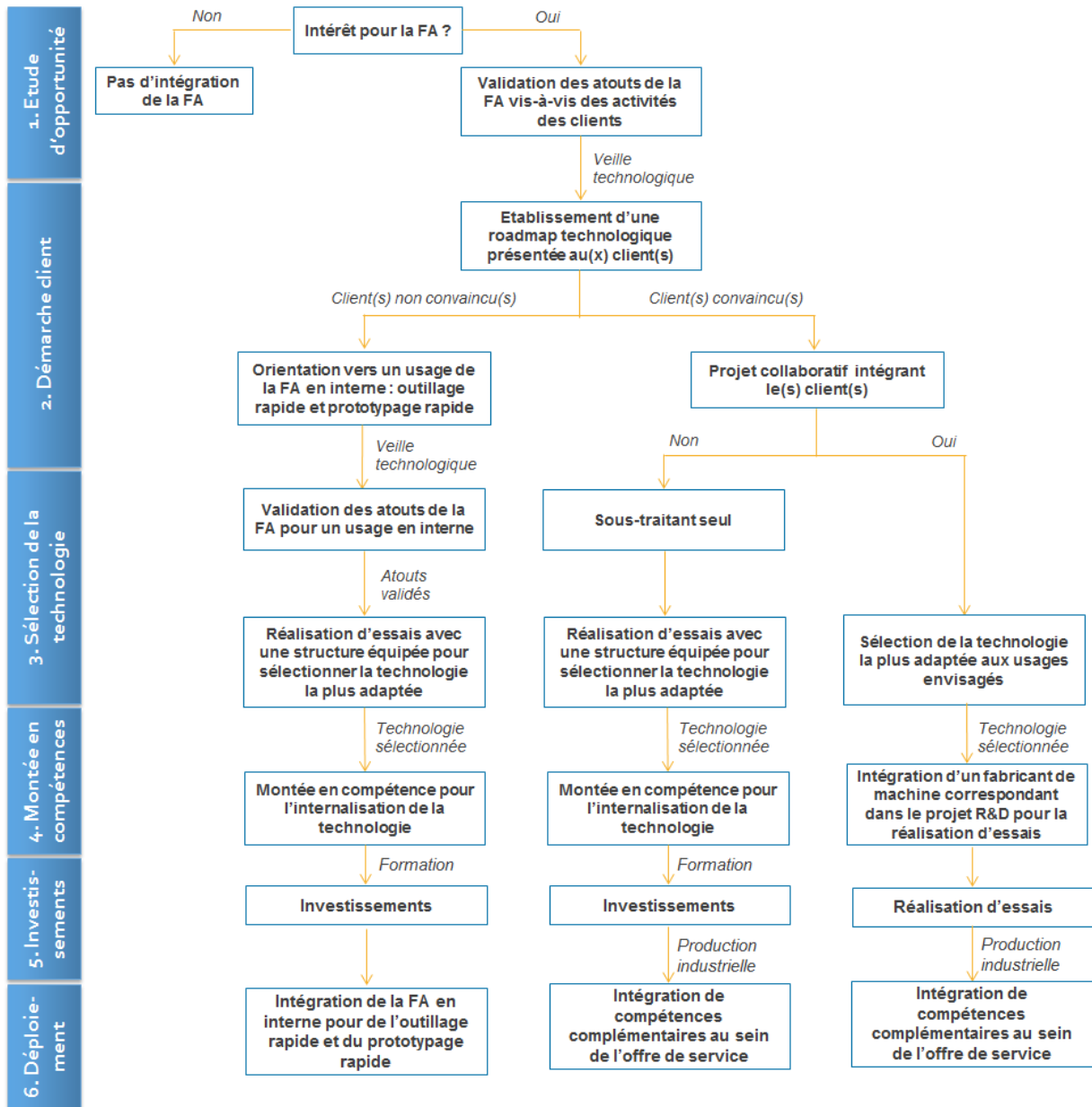


Figure 58 : Arbre décisionnel pour l'intégration de la FA chez les sous-traitants (Source : D&Consultants, 2016)

6. ANNEXES

6.1. Listes des acronymes utilisés

ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
ASTM	American Society of the International Association for Testing and Materials
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CAPEX	Capital expenditure
CETIM	Centre technique des industries mécaniques
CLAD	Construction Laser Additive Directe
CNES	Centre national d'études spatiales
CRM	Customer Relationship Management
DED	Dépôt de poudre sous flux d'énergie dirigé
DPM	Direct Plasma Manufacturing
EBF3	Electron Beam Free Form Fabrication
EBM	Electron Beam Melting
ENIT	Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
FA	Fabrication additive
FDM	Fused deposition modeling
FMAS	Fives Michelin Additive Solutions
HIP	Hot Isostatic Pressing
HIPS	High impact polystyrène
HSE	Hygiène Sécurité Environnement
INSA	Institut national des sciences appliquées
IRT	Institut de recherche technologique
ISAE	Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace
LBM	Laser beam melting
MADDELI	Mon Agence Développement, Export, Innovation
MIMAUSA	Mise en œuvre de matériaux aéronautiques et surveillance active
MJP	Modelage à Jets Multiples
MRL	Manufacturing Readiness Level
ND	Non disponible
OPEX	Operational expenditure
PA	Polyamide
PACA	Provence-Alpes-Côte d'Azur
PC-ABS	Polycarbonate/Acrylonitrile Butadiène Styrène
PET	Polytéréphtalate d'éthylène
PLA	Acide polylactique
PME	Petite et Moyenne Entreprise
PVA	Alcool polyvinylique
SLA	Stereolithograph Apparatus
SLS	Selective Laser Sintering
STL	Standard Template Library
TCAM	Taux de croissance annuel moyen
TPE	Très Petite Entreprise

TRL Technology Readiness Level

6.2. Liste des entretiens réalisés

Structure	Nom	Fonction
3D Ceram	Christophe Chaput	Président
3D INNOV	Eric GENEVE	En charge du développement de la Plateforme Technologique
3D Synergie	Leonardo Santos	Business Development
3dtrust	Antoine JEOL	Co-fondateur
A3TS	Pierre Bruchet	Président A3TS
Abelliom Aero	Laurent Mansieux	Président
ACDC	André BENHAMOU	Directeur
Aerosoft	Nicolas BAREA	responsable de site
Airbus	Arnaud Evrard	Industrial Affairs
Airbus	Jérôme Rascol	Head of ALM Platform
Airbus Defence & Space	Christophe Figus	Head of R&T, Material&Laboratory and Proposal / Structure, Materials & Manufacturing cluster coordinator
ALSTOM	Pierre FLEURY	Site Managing Director
AnatomikModeling	Benjamin Moreno	Directeur
AREVA TEMIS	Gilles BONNET	Directeur technique et ingénierie de réalisation
Assystem	Max RIGAL	Cadre, Chargé de mission Fabrication Additive Aerospace Valley
ATLANTIC 3D	Jean-Louis Moreau	PDG
Atmosphere	Jean-Marc Gaubert	Managing Director
Aurore Arka/Kallisto/Technocentre 3D	Pascal Erschler	CEO
Benne	Fabien Valette	TECHNICO-COMMERCIAL CHAUDRONNERIE INDUSTRIELLE
Bombardier Transport	Nozha VIRLOGEUX	Responsable des procédés spéciaux
CEA	Régis DELSOL	Responsable partenariats industriels sur l'Energie
CETIM	Bruno DAVIER	Chargé de mission
CNES	Florence Clément Sébastien Begoc	Ingénieurs matériaux
CSTM	François Dugué	Dirigeant
Dassault System	Laurent Delsart	CATIA Engineering Alliance Director
Défi 12	Christophe Delagne	Directeur
DGA	Anthony Martin	Ingénieur expertise et essai
Diace	Rémyle RENAUX	Responsable opérations
ECA Group/ Prodways	Gilbert Rosso	Directeur Général
Ecole Centrale de Nantes	Alain Bernard	Professeur
Eden 3D	Brice Hermann	CEO
Elemca	Clovis Lataste	Responsable commercial
Erasteel	Adeline RIOU	Powder sales & marketing manager
Erasteel	Michel PIRRONNET	Business Manager
Exova	Paul Fournet	General Manager / Directeur de Site
Feel Object	Sylvain Huin	Co-fondateur
Fusia	Arnaud Votié	Directeur R&D
Gilbert Polytech	Laurent PERIER	Président
GRIMAL	Julien GRIMAL	dirigeant
Groupe Poult	Alexandre DANDAN	Responsable innovation

Structure	Nom	Fonction
Hemodia	William Sant	Responsable conception et développement
IMASCAP	Jean Chaoui	Fondateur
Innopsys	Vincent Paveau	R&D Manager
INRA Nantes	Guy DELLA VALLE Laurent Chaunier	Chercheurs
INRIA	Philippe Schaeffer	Responsable du service Transfert Innovation Partenariat
Kasios	Nicolas Guéna	Président
LATECOERE	Xavier CARRIER Jen-Michel TREMOULER Fabien ROSSO Bernard LAQUERBE	Director of prospective Directeur Stratégie Industrielle Innovation Business Ingénieur étude
Liebherr	Frédéric LETRANGE	Responsable matériaux
LPGP	Tiberiu Minea	Directeur
Mecano ID	Didier MESNIER	Responsable technique et gérant
Mecanumeric	Arthur Païs	PDG
Mecaprotec	Pierre Bares	Responsable R&D
Mersen Boostec	Marc FERRATO	R&D Manager
Microturbo	Cedric KLEINERMANN	chef de projet fabrication additive
MIZAR Additive Manufacturing	Guy Bertrand	Prsdt de Mizar France
Nanolike	Jean-Jacques BOIS	CEO
Nexeya	Hervé CALMELLY	Direction Supply Chain
Opt'Alm	Alain Toufine	Président
Phenix System	François LOUIS	Commercial
Pierre-Fabre	Béatrice GUIRAUD	Laboratoire d'Ingénierie Tissulaire Cutanée
Pratt & Whitney	François Richard	Ingénieur de projet FA
Prismadd	Philippe Rivière	Président
Prodways	Stéphanie Karsenty	Directrice marketing
PSA	Jérôme Dubois	Responsable innovation process de fabrication
Recaero	Matthieu Guilhem	Ingénieur amélioration des processus
Safran	Thomas Thierry	VP
Safran Tech	Alain Viola	Alain Viola
SD Tech	Céline Vairon	Responsable de projets R&D
SIRRIIS	Jean-Claude NOBEN	Business Development & Innovation
SOGELAIR Aerospace	Nicolas CORREGE	Head of ALM Department
Sogeti Hight tech	Valentina VETERE	Director 3D printing & Complex System Simulation
Soplami	Eric Castellano	président du groupe
STELIA Aerospace	Nicolas KAWSKI	R&T Project Manager
Thalès Aliena Space	Florent LEBRUN	Ingénieur développement antenne
UTC Aerospace Systems	Olivier BRUCELLE	Head of Metallic Materials and Special Processes – Actuation & Propeller Systems
Ventana	Christophe Perrin	Président
Vexim	Jose Da Gloria	CFO
Volum-e	Hervé Michel	Directeur Commercial
Zodiac Aérospace	Pierre Alvarez	Additive Manufacturing R&T Project Manager