

La fabrication additive, communément appelée impression 3D, est souvent présentée comme une véritable révolution industrielle, basée sur des technologies innovantes, remettant en cause les modèles de fabrication traditionnels et bouleversant la relation entre le fabricant et le consommateur. Cependant, de nombreux industriels s'interrogent sur le caractère supposé incontournable de cette technologie et les leviers de croissance réels qu'elle apporte.

Face à ce constat, la DIRECCTE a réalisé et financé une étude, en partenariat avec CCI Centre et l'appui du FabLab d'Orléans, afin de mettre à disposition des acteurs économiques et des industriels une étude dressant un état des lieux de cette technologie, de ses applications potentielles et mettant en exergue les forces et faiblesses régionales.

La région Centre compte de nombreux donneurs d'ordre et sous-traitants appartenant à des filières et métiers porteurs s'agissant de la fabrication additive : aéronautique/défense/spatial, automobile, médical, fabricants d'outillage, fondeurs, moulistes.

A cela s'ajoute la présence à Bourges du CETIM-CERTEC, centre de ressources technologiques très en pointe sur le sujet et des applications opérationnelles déjà réalisées avec des industriels.

Enfin, la région bénéficie de la présence à Vendôme du fabricant de machines TOBECA et de plusieurs fablabs (FabLab Orléans, FunLab de Tours, FabLab Robert Houdin de Blois...)

L'ensemble constitue un atout fort pour les industriels de la région Centre qui cherchent à définir leur stratégie par rapport à la fabrication additive en tant que levier de compétitivité potentiel.

Les entrepreneurs et la région doivent néanmoins tenir compte, dans leurs décisions, de réalités moins favorables.

En premier lieu, le ticket d'entrée pour exploiter la fabrication additive représente un investissement élevé, matériel (logiciels, machines) mais aussi et peut être surtout humain (détermination de la stratégie, formation, essais).

En deuxième lieu, les entreprises ont besoin d'information non seulement sur les procédés et leurs applications (conception, finition, contrôles non destructifs), mais aussi sur les besoins et attentes des donneurs d'ordre.

Enfin, d'autres régions se structurent déjà pour accompagner leurs entreprises dans ce domaine.

Une chose est certaine, c'est aujourd'hui qu'entreprises et acteurs économiques doivent s'interroger sur les opportunités réelles offertes par la fabrication additive.

1.	PRÉSENTATION DE L'ÉTUDE	4
a.	La fabrication additive et l'Usine du futur	4
b.	Le tissu industriel de la région Centre.....	5
2	ÉTAT DES LIEUX.....	7
a.	Le panorama technologique	9
i.	Avantages et inconvénients de la fabrication additive	9
ii.	Objet numérique.....	11
iii.	Technologies et matériaux.....	13
iv.	Traitements postérieurs.....	14
v.	Offre matérielle et coûts.....	15
b.	Les marchés et applications.....	19
c.	Structuration et sous-traitance.....	22
3	PERSPECTIVES EN RÉGION CENTRE	23
a.	Analyse AFOM (Atouts – Faiblesses – Opportunités – Menaces)	23
b.	Les principales filières concernées en région Centre.....	24
i.	Aéronautique, défense et aérospatiale	24
ii.	Automobile	25
iii.	Cosmétique et parfumerie	27
iv.	Santé	28
c.	Les principaux métiers concernés en région Centre.....	29
i.	Électronique.....	29
ii.	Emballage et conditionnement.....	30
iii.	Fonderie.....	31
iv.	Moules	32
v.	Plasturgie	34
d.	Les industriels de la région Centre et la fabrication additive	35
i.	Enquête quantitative auprès des industriels	35
ii.	Consultation qualitative d'industriels représentatifs	40
e.	Les besoins identifiés	41
i.	Information des industriels.....	41
ii.	Accompagnement du développement de la technologie et de la montée en compétences ...	41
iii.	Développement de l'offre de formation.....	41
iv.	Accompagnement à l'investissement	42
4	ANNEXES.....	43
a.	Les technologies de la fabrication additive	43
i.	Panorama des technologies : matériaux métalliques	43
ii.	Panorama des technologies : matériaux non métalliques.....	47
b.	La méthodologie	49
i.	État des lieux de la fabrication additive, avec une vision prospective et sectorielle.....	49
ii.	Identification des entreprises régionales potentiellement impliquées dans la fabrication additive (y compris les entreprises de finition), état des lieux régional des ressources existantes	49
iii.	Positionnement des marchés de la fabrication additive par rapport au contexte régional (filières majeures, clusters, pôles ...)	49
iv.	Analyse et recommandations	49
c.	Les sources	50

**RETROUVEZ EN LIGNE LE "4 PAGES" ET CETTE ÉTUDE
SUR LES SITES DE LA DIRECCTE CENTRE ET DE CCI CENTRE**
<http://www.centre.direccte.gouv.fr/L-impression-3D-etat-des-lieux-et>
<http://centre.cci.fr/l-impression-3D-en-region>

CONTACT



ronan.le-ber@direccte.gouv.fr
christophe.sauvion@direccte.gouv.fr



matthieu.blin@centre.cci.fr
estelle.sapin-cosson@centre.cci.fr

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : PATRICE GRELICHE

Direction régionale des entreprises, de la concurrence, de la consommation,
du travail et de l'emploi (DIRECCTE) Centre
12 place de l'Étape – CS 85809 – 45058 ORLÉANS CEDEX 1
www.centre.direccte.gouv.fr

ÉTUDE FINANCÉE PAR LA DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES DANS LE CADRE DU MARCHÉ CESAAR



www.entreprises.gouv.fr

Merci au CETIM, au FabLab Orléans,
aux entreprises et aux experts
ayant contribué à cette étude et à la table ronde.

1. Présentation de l'étude

a. La fabrication additive et l'Usine du futur

La Conférence Régionale de l'Industrie s'attache, en région Centre, à soutenir et développer les filières industrielles régionales par une action commune de l'État, du Conseil régional et de CCI Centre. Cette démarche est principalement orientée vers le passage à « L'Usine du futur » en tant que levier de compétitivité et de différenciation des industries de la région Centre.

La fabrication additive est un ensemble de procédés rattachables non seulement à l'usine du futur, et citée comme telle par le 34ème plan industriel du ministère de l'Économie, de l'industrie et du numérique, mais déjà à l'usine d'aujourd'hui. La technologie a atteint un stade de maturité permettant des productions en petites, moyennes voire grandes séries. Elle permet aussi des productions innovantes :

- technologiquement par l'affranchissement de limites techniques inhérentes à l'usinage, au moulage ou à l'injection, permettant donc de proposer des produits nouveaux, soit améliorant des produits antérieurs grâce à cette technologie (allègement, par exemple), soit ne pouvant être produits avec les technologies classiques en raison des limites celles-ci (par exemple, production de moules permettant une meilleure régularité de la qualité de production) ;
- commercialement par la possibilité de répondre plus aisément à la demande de personnalisation ou d'adaptation des fabrications et aux exigences de « juste à temps ».

Cette maturité technologique et la progression constante du rapport qualité/prix des outils de production en fabrication additive permet des productions de produits nouveaux, ou similaires aux productions antérieures mais avec de forts gains de compétitivité (coûts matières, coûts salariaux, délais de production coûts logistiques), s'affranchissant du recours à des moules ou permettant de produire ceux-ci ainsi que d'autres outillages plus rapidement et avec une meilleure maîtrise du savoir-faire voire de la propriété industrielle induite, avec un potentiel de relocalisation de certaines productions.

Cependant, malgré la présence d'un centre technique (CETIM-CERTEC de Bourges, Indre) très impliqué dans cette technologie, et porteur de réalisations concrètes avec des industriels locaux, la fabrication additive reste mal connue du tissu industriel régional.

La veille stratégique menée par la DIRECCTE Centre sur la fabrication additive a permis d'établir deux constats :

- Il est certain que les perspectives de marché existent et se développent. Pour autant, l'opportunité pour une entreprise d'intégrer la fabrication additive n'est ni immédiate, ni évidente. Malgré l'enthousiasme technologique et de la profusion d'informations qui l'accompagne, nos industriels régionaux ne disposent pas forcément des données leur permettant d'estimer si le recours à la fabrication additive peut être pour eux une opportunité réelle en termes économiques¹ ;
- Il est nécessaire, pour les chefs d'entreprises, de se poser la question dès aujourd'hui : est-il ou non judicieux de prendre le train de la fabrication additive ?

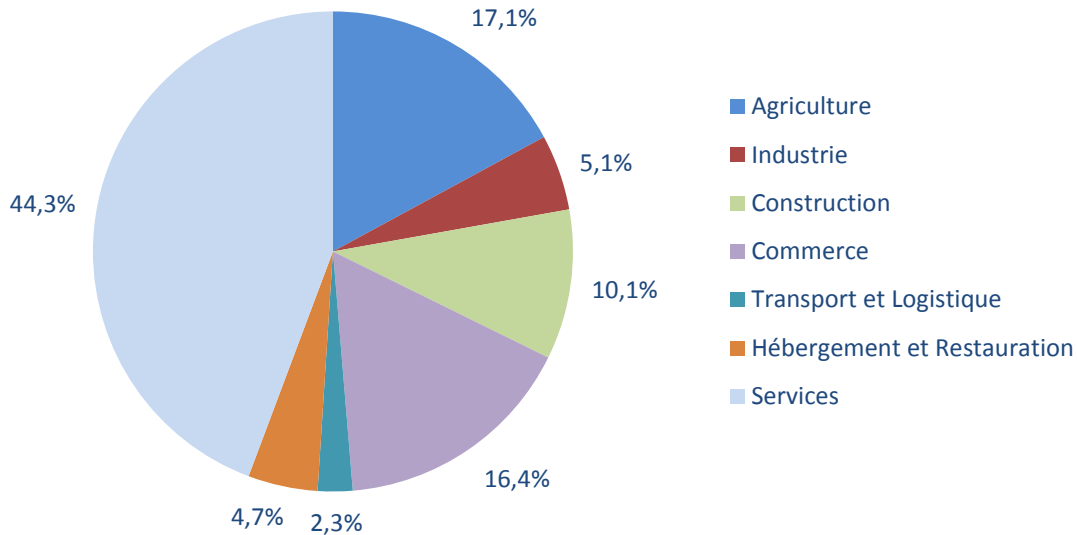
L'étude menée par la DIRECCTE Centre, en partenariat avec CCI Centre, se veut un outil d'information et de sensibilisation sur les tenants et les aboutissants de cette technologie (état des lieux, perspectives, témoignages d'experts), première étape conduisant à la prise de décision des responsables d'entreprises.

¹ La production par fabrication additive posant des enjeux spécifiques en termes de finition, la veille a aussi montré que, pour une région de mécanique comme la région Centre, il pouvait aussi y avoir un marché et un levier de compétitivité spécifiques pour les entreprises régionales spécialisées dans les post-traitements.

b. Le tissu industriel de la région Centre

En 2011, La région Centre compte 199 895 établissements actifs

Répartition des établissements par secteur en % ⁽¹⁾



Zoom sur quelques filières d'excellence

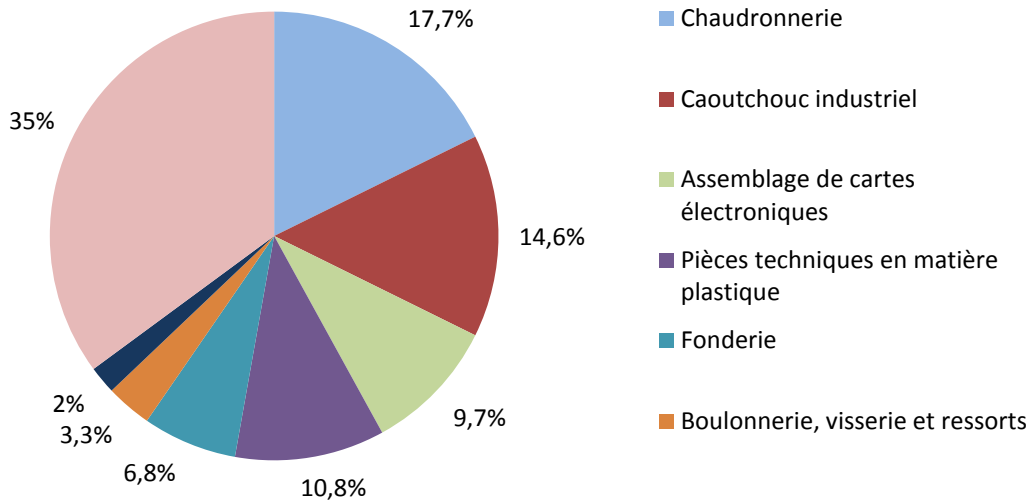
Filières	Nombre d'établissements	Emplois salariés
Aéronautique – Défense	321	18 700
Emballage-conditionnement	225	7 388
Plasturgie	207	9 449
Automobile	200	3 000
Cosmétique et Parfums	158	10 800
Bijouterie – joaillerie	174	NC
Électronique	153	13 726
Ferroviaire	116	6 400
Médical – santé	55	4 400

² Source : INSEE.

La sous-traitance industrielle en région (source : CESER 2013)

La sous-traitance industrielle de la région Centre représente 931 établissements et plus de 24 890 emplois. Elle est principalement tournée vers le travail des métaux et la chaudronnerie.

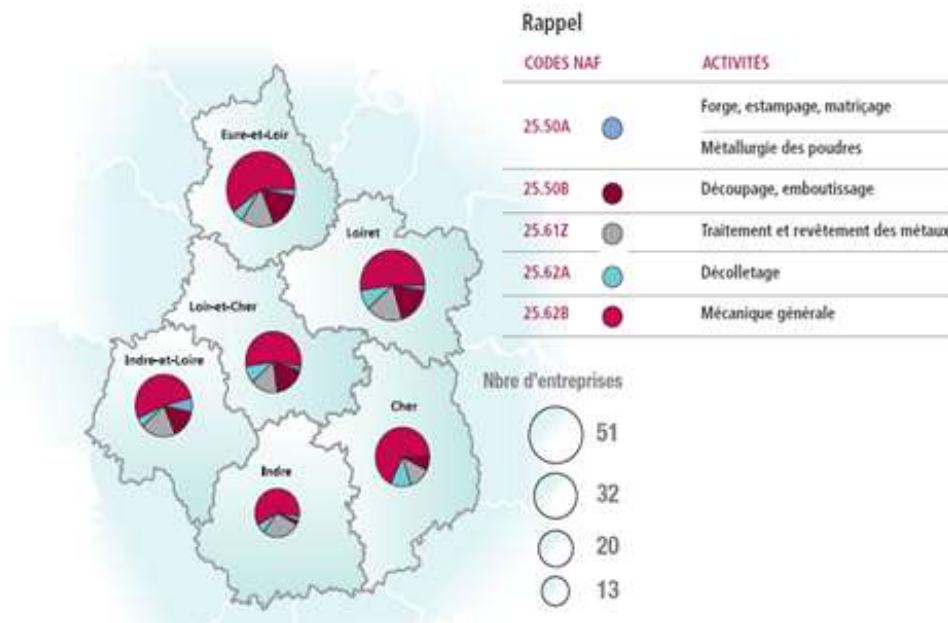
Répartition des emplois dans les entreprises de sous-traitance de la région Centre



Le travail des métaux est la 1ère activité de sous-traitance industrielle en région Centre

Répartition des établissements par activité et par département

Source : Centrécô d'après Unistatis - Source cartographie : Articque

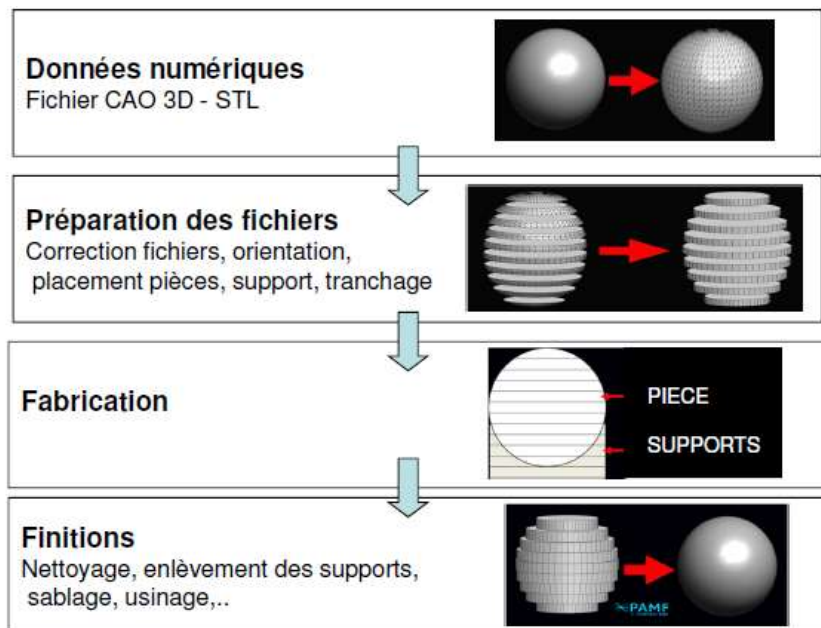
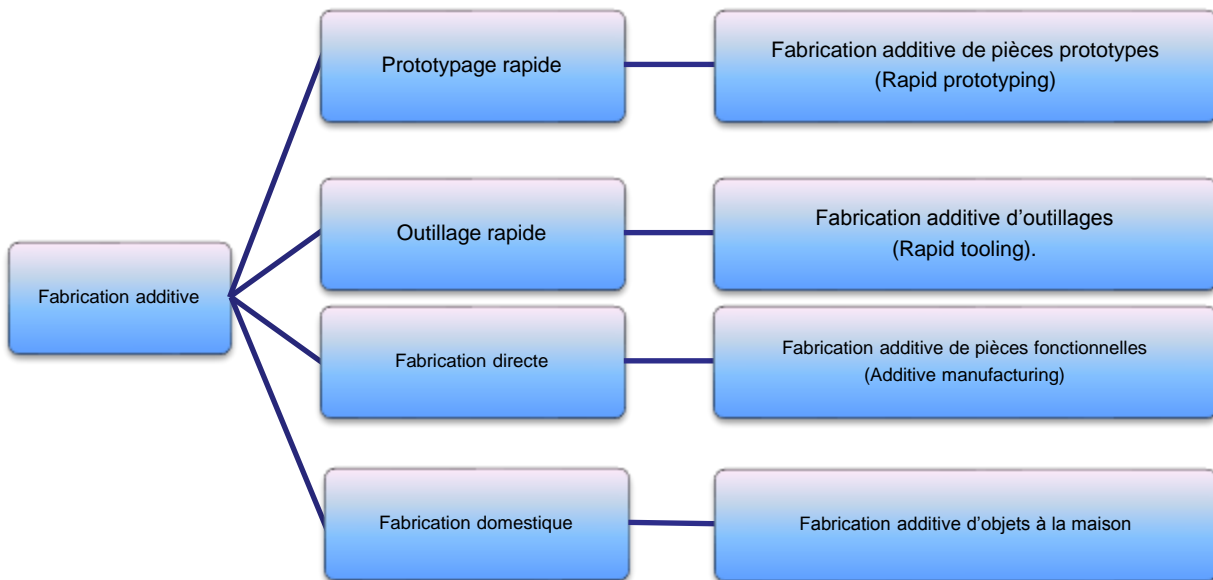


Des six activités, la mécanique industrielle contribue le plus au chiffre d'affaires du secteur (33,7%).

2 État des lieux

Définition de la fabrication additive, norme NF E 67-001)

"Ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique. "



3

La normalisation dans le domaine de la fabrication additive a été initiée dans l'objectif de contribuer significativement à la diffusion de l'innovation en favorisant l'interopérabilité et la compatibilité des équipements entre eux, la réduction des variétés et donc la réduction des coûts de production.

La commission UNM 920 participe activement aux travaux de normalisation internationaux.

³ Source : CETIM.

Les normes parues

- **NF E 67-001 (vocabulaire) en octobre 2011**

Cette norme est destinée à contribuer à la compréhension mutuelle des différents intervenants du domaine et fixe un premier ensemble de termes et définitions. Elle sera révisée pour l'enrichir en fonction des besoins identifiés, notamment pour décrire les technologies et tenir compte des travaux internationaux. Une annexe présente les principales technologies de fabrication additive ainsi que les matériaux pouvant être mis en œuvre.

- **XP E 67-010 (spécifications techniques des poudres) en mai 2012**

La norme expérimentale XP E 67-010 traite des conditions techniques de livraison des poudres et précise les informations à fournir par le fournisseur de poudre. Il indique les caractéristiques qui sont exigées et celles qui sont optionnelles (et qui doivent faire l'objet d'un accord client-fournisseur préalable).

- **XP E 67-030 (cahier des charges – pièces) en mai 2013**

La norme expérimentale XP E 67-030 fixe un cahier des charges et les conditions de réception des pièces réalisées par fabrication additive. Elle fournit les éléments à échanger entre le client et le fournisseur au moment de la commande (informations concernant la pièce elle-même et l'ensemble des essais à réaliser). Certains essais sont exigés ou optionnels, en fonction de 3 classes de contrôle : H pour les pièces fortement sollicitées, M pour les pièces moyennement sollicitées et L pour celles faiblement sollicitées. Pour chaque essai, elle fait appel aux normes correspondantes. Enfin elle fixe les conditions de réception des pièces y compris la définition de lots, ainsi que la documentation de contrôle. En annexe, un modèle de cahier des charges.

- **NF ISO/ASTM 52921 (systèmes de coordonnées et méthodes d'essai) en août 2013**

Cette norme s'applique aux systèmes de coordonnées des machines et support de fabrication additive. Contrairement à l'usinage par enlèvement de matière, le principe de fabrication additive, qui consiste à ajouter de la matière par couches successives, suppose qu'au départ du processus de fabrication la pièce ne peut pas physiquement servir de référence et supporter le système de coordonnées. La norme NF ISO/ASTM 52921 permet de situer les systèmes de coordonnées et la nomenclature spécifique pour toute la terminologie propre à la fabrication.

- **NF ISO/ASTM 52915 (format de fichier) en août 2013**

Cette norme décrit le format d'échange AMF (version 1.1) des fichiers descriptifs de ces pièces. Ces fichiers contiennent les informations classiques comme la géométrie, mais aussi les matériaux, les états de surface, les couleurs, les nuances fonctionnelles, les procédés de réalisation, etc. Les annexes de la norme donnent la structure propre au fichier AMF et différents exemples illustratifs.

Source: Note de veille sur la normalisation en fabrication additive (février 2014) : Marguerite de Luze et Catherine Lubineau – U/NM

a. Le panorama technologique

i. Avantages et inconvénients de la fabrication additive

La fabrication additive se distingue par sa (relative) rapidité, la possibilité de fabriquer plus aisément des pièces comportant des canaux internes, ou le recours à des structures lattices permettant l'allègement des pièces, ou une fabrication multimatériaux. Elle permet aussi de diminuer les assemblages, faciliter la personnalisation/les séries limitées, le recours aux outillages.

ANALYSE ATOUTS – FAIBLESSES – OPPORTUNITÉS – MENACES

Atouts

- La fabrication additive permet de réduire certains délais de fabrication ;
- Conception innovante et optimisée ;
- Intégration possible des données issues de l'optimisation topologique ;
- Possibilité de réaliser en monobloc des pièces multi-matières ou des sous-ensembles (diminution des assemblages) ;
- Par l'utilisation de matière première le plus souvent à caractère discret (poudre ou gouttelette), contrôle fin de la matière et d'aboutir à des pièces à géométrie complexe (contre-dépouille, structures lattices) difficilement réalisables par les techniques usuelles. Production par exemple de pièces complexes creuses (allègement de structures), avec des « canaux » non rectilignes, conformes (fonctionnalisation) ;
- Nouvelles possibilités de personnalisation ;
- Réalisation de pièces de petites dimensions ;
- Production sans développer d'outillages (gain en termes de temps et élimination des coûts liés à l'outillage) ;
- Les poudres se recyclent relativement facilement ;
- Réduction de l'impact environnemental par la réduction de la quantité de matière (Réduction du «buy to fly») ;
- Diminution possible des stocks.

Faiblesses / points de vigilance

- Le prix des machines reste élevé ainsi que celui des poudres-résines ;
- Productivité des machines encore trop faible (davantage en adéquation avec les exigences du prototypage que celle de la fabrication directe) ;
- Poudres-résines (filrière d'approvisionnement en structuration) ;
- Matériaux : qu'il s'agisse de matériaux métalliques, polymères ou élastomères, le choix des matériaux utilisables en fabrication additive est toujours relativement limité par rapport à l'ensemble des matériaux disponibles pour les procédés de mise en forme traditionnels. Cela implique également que les machines disponibles sur le marché puissent gérer différents types de matériaux ;
- Toutes les résines photosensibles sont mono utilisation ;
- Les résines photosensibles peuvent vieillir plus rapidement. Pour les matériaux type titane, aluminium, les dispositifs existent pour pouvoir prolonger la durée de vie : les fabricants de machines vendent des systèmes de déballeuses, de « containers » afin que les poudres ne soient pas exposées à l'air ;
- Limite dimensionnelle des pièces fabriquées ;
- Nécessité de modifier les méthodes de conception en intégrant les possibilités offertes par la technologie : chaque produit est un cas particulier ;
- Maîtrise de nouveaux outils (optimisation topologique, logiciels pour les structures lattices, maîtrise de la chaîne numérique de données qui viennent de scans ...) ;
- Toutes les technologies de fabrication additive ne permettent pas d'assurer une reproductibilité certaine des pièces ;

- Nécessité de disposer d'une maîtrise plus large que la simple utilisation de la machine (granulométrie de la poudre, influence de la vitesse du laser, contraintes liées à certains procédés...);
- Obtention d'un brut et non d'une pièce finie. Les caractéristiques mécaniques et la qualité des états de surface obtenues peuvent rester éloignées de celles attendues (rugosité, anisotropie des caractéristiques mécaniques, contraintes résiduelles élevées, porosité ...);
- Intégration d'opérations complémentaires de parachèvement, de finition (traitements thermiques et/ou traitements de surfaces) de parachèvements spécifiques, de traitements de surface (ex: optique de fonctionnalité en intégrant les supports nécessaires pour la fabrication de pièces métalliques, les canaux pour les moules, les déformations liés à certains procédés ...);
- Les contrôles non destructifs coûtent très cher, sont envisageables après amélioration des états de surface des pièces et peuvent ne pas être réalisables sur certaines pièces complexes (problématique d'accès);
- Exposition à des produits dangereux (inhalation ou contact cutané des matières premières, poussières éventuellement en quantité importante, produits chimiques en post-fabrication), chaleur (risques d'incendie et d'explosion, Composés gazeux (COV, CO, HCN...), risques machines (Lasers, F.E., lampes UV, utilisation de machines, manutention d'éléments lourds);
- Mise en place de moyens de prévention (environnement ATEX : installations de captage pour aspiration poussières, aérosols et gaz avec évacuation à l'extérieur des locaux) et de protection pour la manipulation (gants, masques ...);
- Nécessité de porter une attention à l'environnement d'utilisation de la machine (local où la machine est isolée, non soumise à des vibrations et relativement éloignée d'autres équipements qui pourraient être endommagés par les poudres).

Opportunités

- Qualification et normalisation en cours d'élaboration : demande des donneurs d'ordre en faveur de l'établissement de normes spécifiques à un matériau pour un procédé donné;
- Validation réalisée sur des applications « phares » dans les domaines de l'aéronautique (injection de carburant : composants de moteur d'avion LEAP) et du médical;
- Développement de nouveaux matériaux;
- Émergence de nouveaux fabricants et distributeurs de matières premières;
- Développement de machines hybrides (machines combinant procédés additifs et soustractifs);
- Démocratisation de la technologie en partie grâce à l'expiration de certains brevets. L'entrée dans le domaine public d'un brevet avec un positionnement de plusieurs acteurs engendre généralement une baisse des prix et une diffusion plus large de la technologie (frittage laser de poudre);
- Nombreux développements en cours pour fiabiliser les équipements, améliorer les caractéristiques mécaniques de pièces;
- Augmentation des capacités de travail des équipements et de la puissance des sources d'énergie.

Menaces

- Thématique encore peu intégrée au sein de l'enseignement initial;
- Propriété intellectuelle : l'utilisation systématique d'un fichier 3D (peut ensuite être dupliqué) et les banques de données de modèles CAO rendent la notion de droit d'auteur plus délicate à gérer.

ii. Objet numérique

PRINCIPE

Le composant numérique imprimable est constitué de données numériques majoritairement issues de logiciels de CAO pour la géométrie et d'informations complémentaires pour définir les matières utilisées, la description des machines, les phases du processus...

Ce « composant numérique imprimable » contient toutes les informations nécessaires et suffisantes pour piloter le processus de fabrication.



La pièce 3D du logiciel de CAO est convertie en triangles dans le fichier 3D. Par ailleurs, tous les logiciels CAO ont la capacité d'exporter le modèle 3D en format STL.

La définition (résolution, finesse des triangles) doit être rigoureuse car la pièce fabriquée dépendra directement de cette précision. Il y a donc quasiment systématiquement un travail en amont dans le logiciel de CAO pour rendre le modèle « propre » sans trous dans les mailles (contours fermés, arêtes des facettes triangulaires jointives, sans "trous" dans la matière ou erreurs de topologie)

Depuis la fin des années 1980, le format STL est le standard de l'industrie pour transférer des données de CAO en fichier pour impression 3D. Cependant, le format STL ne prend pas en compte les aspects de couleur, les textures, les matériaux, treillis / structures de maillage...

Pour pallier aux évolutions de la technologie et aux besoins de la fabrication additive, des groupes de réflexions se sont créés pour « produire » un format normalisé du composant numérique imprimable.

C'est dans ce cadre que la norme NF ISO/ASTM 52915 "Spécification normalisée pour le format de fichier pour la fabrication additive" a été défini ainsi que le format de fichier AMF (Additive Manufacturing File) qui prend en compte la géométrie mais aussi les matériaux, les états de surface, les couleurs, les nuances fonctionnelles et les procédés de réalisation.

A ce jour, seuls quelques logiciels de CAO commencent à proposer cette approche : la dernière version du logiciel de Cimatron prend en compte le format AMF ou encore SpaceClaim avec son module « STL Prep for 3D Printing » courant 2014.

La fabrication additive modifie la façon de concevoir de par les possibilités offertes. Il ne s'agit pas seulement de transformer un fichier CAO en fichier STL mais bien de revoir les modes de conception en intégrant tout le potentiel de la fabrication additive, de prévoir les supports de façon pertinente et d'intégrer les données issues de l'optimisation topologique :

- Possibilité de minimiser le volume matière utilisé que ce soit la matière ou le support ;
- Fabrication d'une pièce respectant un cahier des charges de tenue mécanique. L'objectif est de tester sa tenue à son propre poids tout en respectant le critère de minimisation cité précédemment ;
- Libertés de forme fabricable grâce aux procédés additifs permettraient de directement imprimer les formes proposées par l'optimisation topologique. Une réadaptation du modèle n'est ainsi plus nécessaire.

Pour autant, cela implique aujourd'hui de faire appel à plusieurs outils en plusieurs étapes.

Des projets R&D sont en cours visant à développer des outils pour coupler optimisation topologique et fabrication additive (OptiFabAdd : l'Optimisation Topologique au service de la Fabrication Additive).

LES ACTEURS AUTOUR DE L'OBJET NUMÉRIQUE

Exemples de fournisseurs de logiciels de CAO

Tous les logiciels de CAO proposent en sortie le format STL et on commence à voir apparaître des modules spécifiques pour l'impression 3D

- Autodesk annonce la plate-forme logicielle ouverte pour l'impression 3D appelée [Spark](#) ;
- SpaceClaim avec son module spécifique [STL Prep](#) for 3D Printing ;
- CADLINK, logiciel Rhinocéros (de plus en plus utilisé de par sa simplicité) ;
- SolidThinking (ALTAIR), logiciel compatible avec les standards 3D du marché, optimisation topologique en fonction des contraintes d'encombrement et de chargement.

Exemples de services en ligne

Service complet, de la conception du modèle à la réalisation du composant et des logiciels de CAO light (en service à travers le cloud, ou téléchargeable gratuitement). A ce jour ces services sont très peu orientés pièces mécaniques et la plupart du temps ne proposent que des pièces en plastique (ex : Shapeways.com (américain), i.materialise.com (belge) ou encore Sculpteo.com)

Exemples de logiciels « gratuits » pour la création de modèles numériques (STL)

- [3D builder](#) proposé par Microsoft gratuitement sous Windows 8 ;
- [123dapp](#) service en ligne Autodesk pour la création ou la recherche de modèles 3D ;
- le logiciel [SCANNER 3D](#) qui sera très prochainement proposé par Microsoft sur ses tablettes.

Exemples des banques de données de modèles 3D

CADENAS, TRACE PART proposent des modèles CAO téléchargeables gratuitement. Aujourd'hui, ces deux éditeurs dominent le marché français voire européen de la création et de la diffusion des bibliothèques numériques de pièces standards.

Les constructeurs de machines

Logiciels de modélisation et de tranchage fournis avec les équipements.

Les fournisseurs de scanners 3D proposent des machines qui à partir de prises de vue capturent une image brute, ensuite convertie en données géométriques couleurs par le logiciel intégré au scanner. Le fichier 3D peut ensuite être visualisé sur ordinateur, modifié et imprimé en 3D.

Des sociétés proposant des services de modélisation, conception 3D et/ou rétro-conception (rétro ingénierie) (technique qui consiste à reconstruire le modèle CAO d'une pièce existante à partir de son modèle physique)

<http://www.creaform3d.com/fr/services-dingenierie-3d/services-de-retroingenierie>

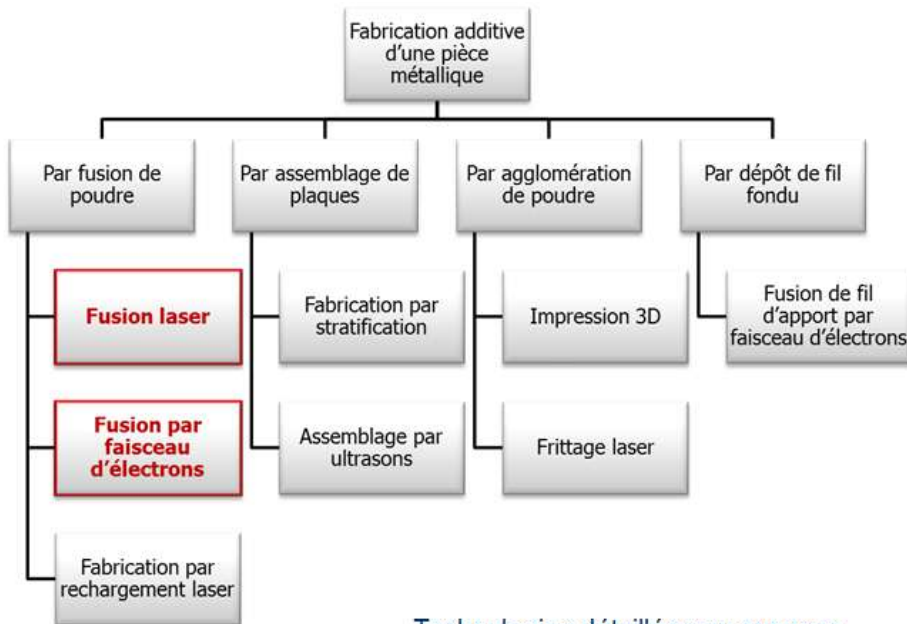
Les principaux développements portent aujourd'hui sur la simplification des outils et l'optimisation topologique

Le modèle numérique est clairement au centre de la fabrication additive et nécessite de revoir la façon traditionnelle de concevoir, d'intégrer de nouveaux paramètres, voire de nouveaux outils.

Cette phase fait l'objet de travaux de R&D et nécessite des compétences spécifiques pour les industriels qui peuvent faire l'objet de formation et /ou de recours à des compétences extérieures.

iii. Technologies et matériaux⁴

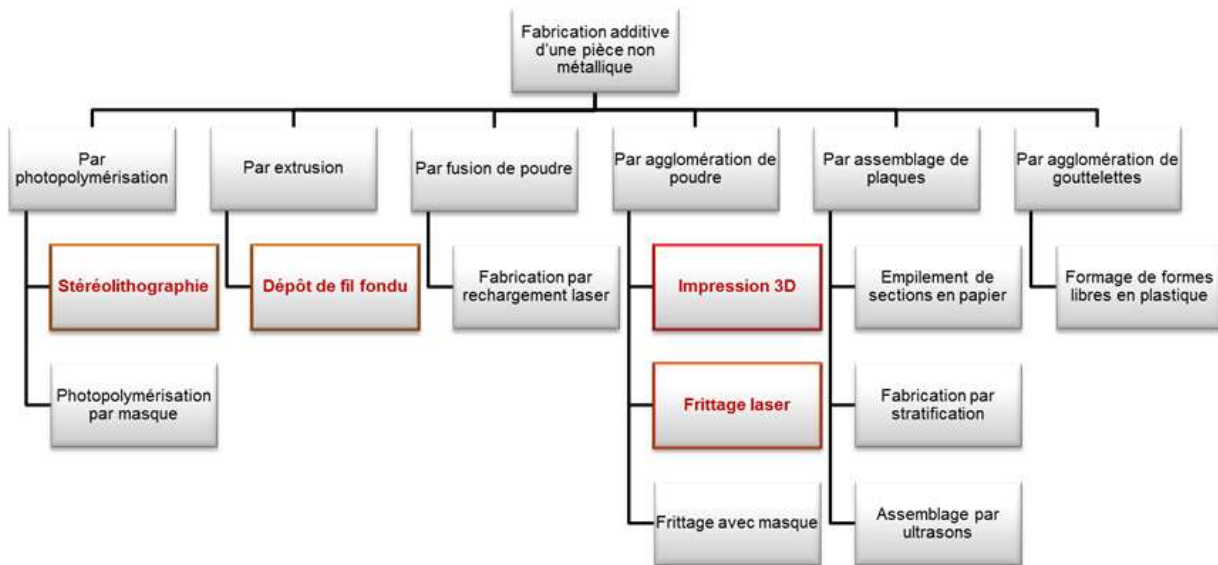
MATÉRIAUX MÉTALLIQUES



Technologies détaillées en annexes

Technologies les plus répandues

MATÉRIAUX NON MÉTALLIQUES



Technologies détaillées en annexes

Technologies les plus répandues

⁴ Source : CETIM.

iv. Traitements postérieurs

Après une étape de fabrication additive, le produit n'est absolument pas terminé ni prêt à l'emploi. Il nécessite:

- Le nettoyage, l'enlèvement des supports, le polissage, sablage, grenailage ;
- Un usinage ;
- Le traitement thermique ;
- ...

Ces aspects de finition et parachèvement concernent très majoritairement les pièces métalliques.

Son aspect change totalement plusieurs fois.

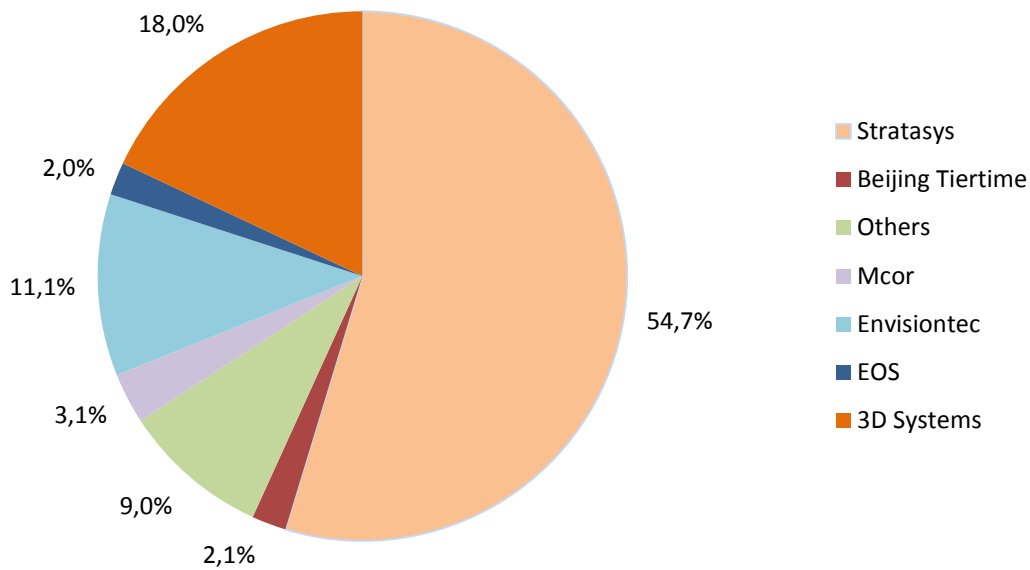
v. Offre matérielle et coûts⁵

LOGICIELS

Entités	Logiciels	Web	Tarifs
ALTAIR	Offre complète de logiciel de Simulation, optimisation topologique, conception HyperWorks : suite intégrée d'outils d'IAO (Ingénierie Assistée par Ordinateur) dont OptiStruct : logiciel de conception qui regroupe l'ensemble des technologies d'optimisation (topologique, topographique, par morphing et paramétrique) : 50 jetons SolidThinking : - EVOLVE : logiciel de modélisation 3D - INSPIRE : logiciel conception (interface facile d'utilisation et de prise en main) qui intègre l'optimisation topologique	http://www.altairengineering.fr/Company.aspx?top_nav_name=Company&item_name=About-Altair	Solution complète Hyperworks (20 à 25 logiciels) : 50 unités donne notamment accès à OptiStruct (50 unités), Inspire (21 unités) et Evolve (10 unités) Location 1 unité/an : 510€/an/unité soit 25500 € pour 50 unités Achat : 2.5 fois le prix de location + le prix de maintenance pour les années suivantes : 20% prix achat ALTAIR donne accès gratuitement à des logiciels partenaires
CADLINK	Rhinocéros (de plus en plus utilisé de par sa simplicité et son ouverture) : logiciel 3D Surfacique : peut créer, éditer, analyser et traduire des courbes, des surfaces et des solides NURBS* sous Windows. Aucune limite en termes de complexité, de degré ou de taille. Rhino3d peut aussi traiter des maillages polygonaux. Ironcad : Logiciel 3D Volumique Paramétrique	http://www.rhino3d-fr.com/	965€ la licence
MATERIALISE	Ensemble complet de logiciels pour toute la chaîne de fabrication additive dont Magics (logiciel qui permet d'importer une grande variété de fichier CAO et de les exporter ensuite en fichier .STL prêt pour la FA. Ses applications incluent la réparation et l'optimisation des modèles 3D, l'analyse des pièces et partie, l'installation sur la plateforme de conception, la création des supports de conception, l'écriture du processus de fabrication sur le fichier .STL, la documentation relative au projet, la planification de production...).	http://www.materialise.fr/	De 10 000€ à 20 000 € selon les options
NETFABB	Logiciel Selective Space Structures (3S) permet la génération de structures lattices ou matériaux structurés.	http://www.growshapes.com/uploads/2/5/6/0/25608031/netfabb_proprivatedifferences.pdf	1 499 €
SOLIDWORKS	Modélisation pour l'impression 3D, analyse et export des fichiers 3D de façon optimale pour l'impression 3D avec correction des éventuels problèmes de modélisation	http://www.solidworks.fr/	Licence Solidworks Premium + maintenance : 9825€

⁵ Listes non exhaustives.

PRINCIPAUX FABRICANTS DE MACHINES



3D System

Modèle	Matière	Épaisseurs de couche	Vitesse	Procédé	Taille Maximale
iPro™	Polymère photosensibles	Entre 50 et 150 µm	Scan : 3,5 m/s	Stéréolithographie (SLA)	650 x 750 x 550 mm ; 414 L au max
sPro	PA, PS, HST composite...	Entre 80 et 150 µm	Scan : entre 5 et 12 m/s Entre 0,9 et 1,8 L/h	Selective Laser Sintering (SLS)	550 x 550 x 750 mm ; 227 L au max
Projet	Résines photosensibles (VisiJet)	Entre 16 et 100 µm	Jusqu'à 28 mm/heure	Polymérisation directe	508 x 381 x 229 mm au max
sPro™ 125 and sPro™ 250	Métaux	Entre 20 et 100 µm	Entre 5 et 20 cm ³ /heure	Selective Laser Melting	250 x 250 x 320 mm au max
VX1000 et VX500	Thermoplastiques	Entre 80 et 300 µm	Entre 15 et 36 mm/heure	Projection de liant	1060 x 600 x 500 mm au max

Stratasys

Gamme	Modèle	Matière	Épaisseurs de couche	Procédé
Prototypage rapide	Mojo	P430 ABSplus	178 µm	FDM
	Uprint	ABSplus	Entre 254 et 300 µm	FDM
Prototypage rapide	Objet Desktop	Matériaux simulés dont le transparent (rigide transparent, proche Polypropylène et ABS...)	28 µm	Polyjet (polymérisation directe)
	Objet Eden	Idem	16 ou 28 µm	Polyjet
	Objet Connex Multi matériaux	Idem	16 ou 30 µm	Polyjet Matrix (pour multi matériaux)
	Dimension	ABSplus	Entre 330 µm et 127 µm	FDM
Production	Fortus	ABS ESD7, ABSi, ABS-M30, ABS-M30i, PC, PC-ABS, PC-ISO, PPSF, ULTEM 9085	Variable entre 330 et 127 µm	FDM

Eos

Gamme	Modèle	Matière	Épaisseurs de couche	Speed	Procédé	Taille maximale
Plastique	FORMIGA P 110	PA 2200, PA 2201, PA 3200 GF, PrimeCast 101, PA 2105	Entre 60 et 120 µm (dépend du matériau)	20 mm/heure	Laser Sintering	200 mm x 250 mm x 330 mm maximum
	EOSINT	PA fibre carbone, PA avec Al	Entre 60 et 180 µm	Entre 7 et 32 mm/heure	Laser Sintering	700 mm x 380 mm x 580 mm maximum
Métal	EOSINT M 280	Aluminium, Chrome, Titane... Cobalt, Nickel, NP	NP	NP	Direct Metal Laser Sintering	250 mm x 250 mm x 3245 mm
Sable	EOSINT S 750	Ceramics 5.2 et Quartz 4.2 / Quartz 5.7	200 µm	Up to 2,500cm ^{3/h}	Laser Sintering	720 mm x 380 mm x 380 mm

Source : Tech2Market

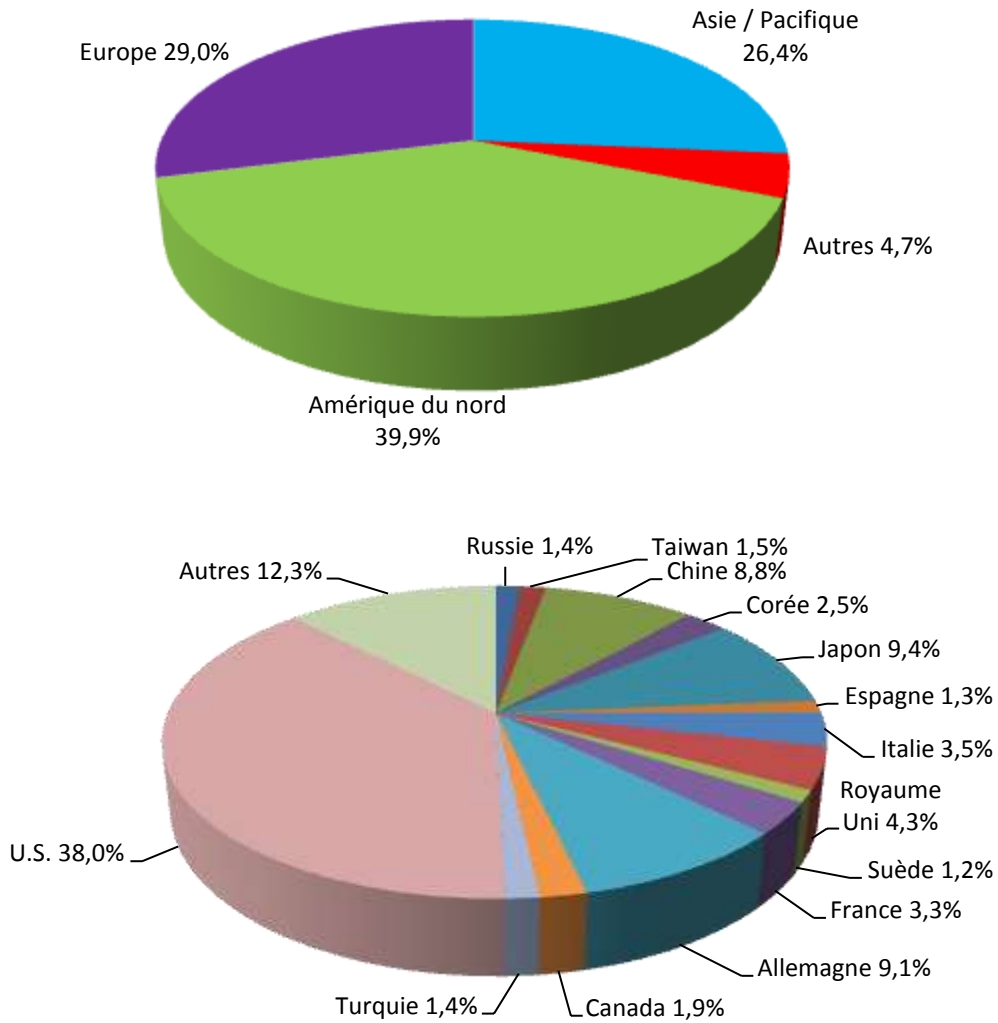
Technologies	Ordre de prix
Frittage laser Polymères	180 000 € pour une EOS FORMIGA P100 (200 x 250 x 330 mm ³) à 1 000 000 € pour une EOS P800 (550 x 550 x 750 mm ³) utilisable pour la mise en forme de polymères dit haute température (PEAK)
Fusion laser et faisceau d'électrons	150 000 à 800 000 € (50 x 50 x 80 à 500 x 500 x 500 mm ³)
FDM à impression 2D	Le prix des machines varie entre 1000 et 200 000 euros
Stéréolithographie	Grande dispersion de prix, machines offrant les dimensions les plus importantes

Familles	Détail	Prix
Résines photosensibles		Entre 200 et 600 €/litre
Poudres	Acier	Entre 90 et 200 €/kg
	Aluminium	Entre 100 et 150 €/kg
	Titane	Entre 400 et 500 €/kg
	Chrome-Cobalt	250 €/kg
	Plastiques	Entre 50 et 100 €/kg
Bobines de fils	ABS, polycarbonate, PLA, ...	Entre 30 et 200 €/kg

b. Les marchés et applications⁶

RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE

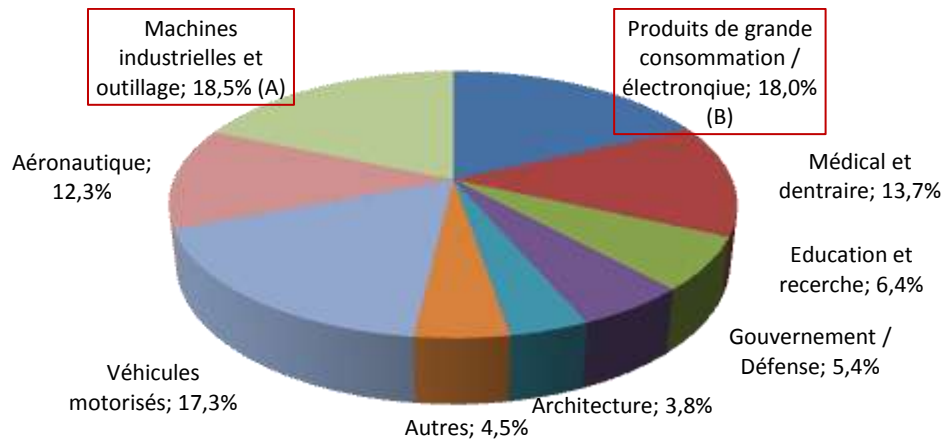
Parc machines installées de 1998 à fin 2013



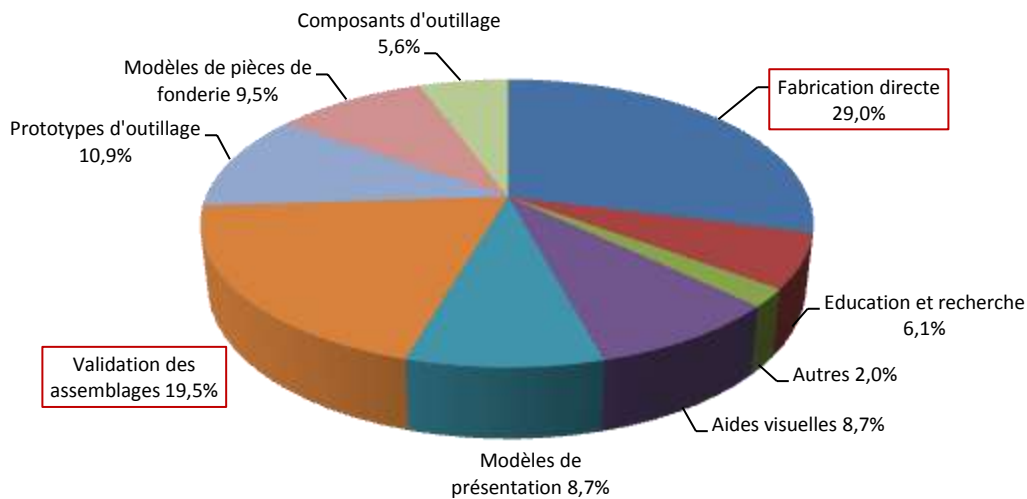
Les États-Unis restent largement leader en termes d'installations, suivis par le Japon, l'Allemagne et la Chine.

⁶ Source : Wohlers Associates, Inc 2014

LES SECTEURS UTILISATEURS



A : Ancien secteur leader sur les 8 dernières années ; B : + 5,1 % par rapport à 2012

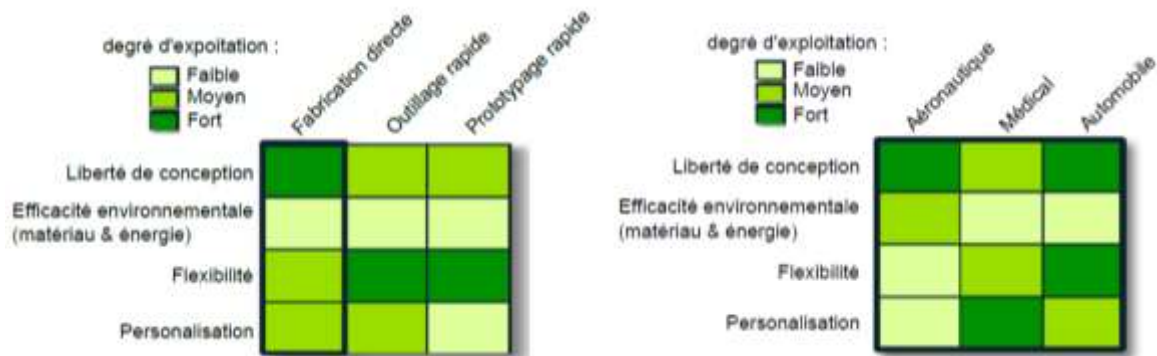


L’industrie est devenue le premier secteur utilisateur de technologies de fabrication additive, détrônant ainsi le secteur grand-public/électronique.

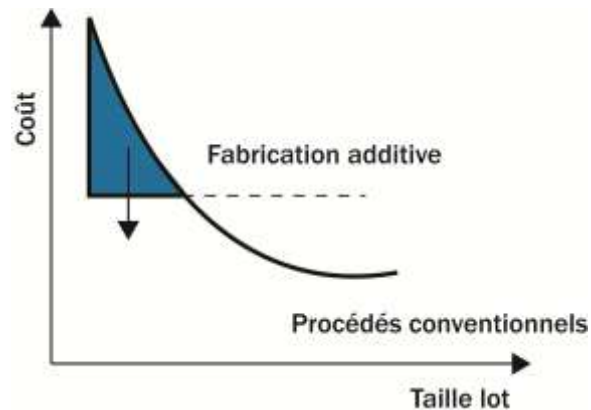
Quatre secteurs à maturité :

- Le médical/dentaire, qui en est déjà à la production à échelle industrielle ;
- L’outillage, pour des productions industrielles à petite échelle ;
- L’aéronautique, où la production sur ligne pilote a commencé ;
- L’automobile, pour la fabrication de prototypes, de concept cars et de pièces spécifiques (véhicules haut de gamme, sport automobile, pièces de rechange).

L'utilisation de la fabrication additive pour les secteurs et applications précédemment exposées s'expliquent par plusieurs facteurs schématisés ci-dessous ⁸:



Le volume de production est également un facteur de choix ⁹:



Concrètement en termes de compétitivité, même si la réflexion doit être menée au cas par cas selon la pièce, sa taille, son matériau..., la fabrication additive peut s'envisager :

- Jusqu'à des séries de 10 000 pièces plastiques ;
- Jusqu'à 1000 pièces en métallique.

Globalement, au-dessus de ces tailles, la technologie est aujourd'hui trop lente et n'est donc plus compétitive par rapport à la fabrication conventionnelle

Si le coût de fabrication augmente en fonction de la complexité des pièces à fabriquer dans le cadre des procédés conventionnels, la fabrication additive permet des coûts compétitifs.

⁸ Source: Remi Ponche. Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres. Mechanical engineering. Ecole Centrale de Nantes (ECN) (ECN) (ECN) (ECN), 2013. French. <tel-00916534>

⁹ Source : Cetim.

c. Structuration et sous-traitance

Pour ses applications industrielles, la fabrication additive intègre et vient compléter la gamme de procédés de fabrication des industriels. L'intégration de cette technologie influe sur le positionnement des acteurs.

- Conception : certains bureaux d'études et sociétés d'ingénierie se positionnent aujourd'hui pour accompagner les entreprises sur cet aspect, notamment les entreprises d'usinage peu ou pas utilisatrices de ces outils jusqu'à présent.
- Donneurs d'ordre : certains intègrent actuellement différents équipements dans le but de tester et caractériser la technologie (montée en compétences).
- Sous-traitants: les différents experts interrogés s'accordent à dire que l'offre de sous-traitance sur la partie polymères est déjà suffisamment étoffée. L'offre pour la partie métallique est moins développée.

On observe deux phénomènes: les industriels du prototypage se positionnés sur de la sous-traitance en fabrication additive. Certains usineurs complètent leur offre de production en intégrant cette même technologie.

- Finitions : les usineurs reçoivent de plus en plus de demandes pour finir des pièces issues de fabrication additive. Si la partie parachèvement (reprises d'usinage) reste une étape indispensable, elle ne représente pas la valeur ajoutée la plus importante et pourrait diminuer avec les évolutions de la technologie. Les traitements thermiques et les traitements de surface ne sont pas encore totalement adaptés : des développements restent nécessaires.

Les opérations de traitements thermiques de détensionnement ont plutôt tendance à être intégrées au sein de l'entreprise qui fabrique la pièce, car ces traitements doivent être faits rapidement à la sortie de la machine. Les traitements pour obtenir des caractéristiques mécaniques peuvent ensuite être sous-traités ultérieurement. Les traitements thermiques actuels nécessitent des mises au point pour atteindre les niveaux de performances mécaniques attendues.

Les traitements de surface (comme les contrôles non destructifs) restent encore des aspects en cours de développement : l'accès à certaines zones devient délicat (voire impossible), les traitements doivent être adaptés à la pièce (rugosité...). Certaines entreprises de traitements de surfaces ont développé et travaillent sur des procédés particulièrement performants : MMP Technology (BINC Industries à Saint Priest) a développé un procédé d'ébavurage et de polissage mécano-physico-chimique unique au monde pour la finition de pièces jusqu'au poli miroir). Les entreprises de traitements de surface devraient avoir des opérations plus compliquées à réaliser et certainement une demande croissante.

Wohlers fournit une liste mondiale de fournisseurs de services, mais peu de français et uniquement polymères. Zesmallfactory fournit une liste de 28 producteurs français de petites séries, beaucoup polymères, dentaire et joaillerie.

3 Perspectives en région Centre

a. Analyse AFOM (Atouts – Faiblesses – Opportunités – Menaces)

Atouts

La région bénéficie d'un potentiel de développement favorable :

- Présence de donneurs d'ordres et de sous-traitants appartenant à des filières – secteurs où la technologie est particulièrement porteuse (aéronautique – défense, plasturgie, automobile, fonderie, moulistes - fabricants d'outillages, médical, ...)
- Fort intérêt pour la technologie de la part de plusieurs PME et des projets d'investissements ou de sous-traitance à venir ;
- Présence d'un centre de ressources technologiques à travers le Cetim-Certec ;
- Présence d'acteurs cherchant à se positionner sur les différents maillons de la chaîne : R&D-transfert, donneurs d'ordres, Bureaux d'études, PME, distribution de poudre, traitements thermiques et traitements de surfaces ;
- Présence du fabricant de machines Tobeca, de plusieurs fablabs (Fablab Orléans, Fun Lab à Tours, FabLab Robert Houdin à Blois...) et d'acteurs en prototypage pouvant contribuer à développer la partie grand public et prototypage.

Faiblesses

- De nombreuses entreprises intéressées sont des PME, voire des TPE avec des ressources (financières et humaines limitées) ;
- Manque de visibilité des entreprises sur les besoins et attentes des donneurs d'ordres dans le domaine ;
- Manque de connaissance et d'informations sur les procédés mais aussi sur les implications en termes de conception, d'opérations de finitions et de contrôles non destructifs.

Opportunités

- Création d'un maillage territorial des différents acteurs de la chaîne ;
- Relocalisation de productions aujourd'hui faites dans des pays à bas coûts ;
- Projet du Certec en cours de montage visant la mutualisation d'un équipement.

Menaces

- Plusieurs entreprises interrogées dans le cadre de l'enquête limitent leur vision de la technologie et donc éventuellement de leur investissement à l'aspect prototypes ;
- Plusieurs régions se structurent et mettent en place des actions d'accompagnement aux entreprises dans le domaine, créant un environnement favorable à une certaine avance technologique et commerciale.

b. Les principales filières concernées en région Centre¹⁰

i. Aéronautique, défense et aérospatiale

Part de marché 2012 : 11 à 12%.

- Production de pièces légères à géométrie complexe (injecteurs) ;
- Composants fixes de turbines ;
- Réparation de brûleurs (turbines).

BÉNÉFICES PAR DOMAINE D'APPLICATION

Domaines	Bénéfices
Pièces de série	<ul style="list-style-type: none"> - Gain de masse - Simplification de la nomenclature (moins de pièces) - Géométrie complexes (lattices, etc...) impossible à avoir en fabrication soustractive - Élimine les difficultés d'usinage de matériaux comme l'inconel
Pièces de réparation, rétrofit	<ul style="list-style-type: none"> - Remplacement par des pièces plus légères

FREINS

- Homologation et qualification des pièces obtenues par FA.

ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

- Projet d'impression d'un avion complet avec ossature principale biomimétique ;
- Développement important de la FA pour l'allègement des structures ;
- Développement de systèmes de production pour les endroits peu accessibles ;
- Les constructeurs s'équipent. Un centre de production 3D de cinquante millions de dollars verra le jour en 2015 à Auburn équipé de 10 machines DLMS (GE pour le LEAP) ;
- Processus SLM ou DMLS en cours de qualification chez AIRBUS (prévu en 2016) favorisant l'utilisation de la FA pour les pièces critiques.

¹⁰ Sources : Roland Berger / Wohlers

ii. Automobile

Part de marché 2012 : 19 à 20%.

Le marché devrait atteindre les 3,8 milliards de dollars en 2025 (Lux Research).

- Principalement pour le prototypage rapide (modèles visuels) ;
- Composants spécifiques pour le sport automobile (circuits de refroidissement) ;
- Prototypes fonctionnels pour campagne d'essais, concept cars ;
- Voiture de course: pièces pour l'aérodynamisme (becquet arrière), de refroidissement, boîtiers électriques ;
- Composants de préséries pour les véhicules de luxe (pièces de têtes de cylindre, ...) ;
- Remplacement de séries défectueuses ou non livrées pour les véhicules de luxe.

BÉNÉFICES PAR DOMAINE D'APPLICATION

Domaines	Bénéfices
Maquettage	Obtention itérative rapide pour vérifier une conception, mesurer l'intérêt de la clientèle lors des showrooms, etc...
Prototypage rapide	Personnalisation totale et rapidité d'obtention
Sport et très haut de gamme	Les quantités sont compatibles avec la FA. Cette dernière permet de s'affranchir de la fabrication d'outillages chers.
Cycle de vie	- Amélioration de l'efficacité énergétique - Gain de poids
Outillages de production	- Fabrication de pièces complexes monobloc - Ergonomie
Maintenance	Fourniture à la demande sans stock
Rechange	Rechargement à la forme voulue

FREINS

- Quantités actuelles incompatibles avec les possibilités de la fabrication automobile pour la production industrielle l'automobile grand public ;
- Finition des pièces pouvant être importante.

ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

- Des nouveaux matériaux élastomères sont en cours de développement qui pourront, dans un avenir proche, permettre de réaliser des joints, des bandages pneumatiques etc ;
- Les tailles de série de voitures toujours plus personnalisées, donc en diminution, deviendront compatibles avec les tailles de lots fabriquées en FA (machines multi-têtes laser, spot laser rectangulaire au lieu d'être rond, etc...) qui vont augmenter rapidement ;
- L'application rapide de la FA va toucher les voitures haut de gamme et le sport automobile et les pièces de rechange ;
- Les micro-usines, qui fabriquent des voitures en très petites séries personnalisées, développent des projets d'impression totale de carcasse (structure plus carrosserie) ;
- Le marché du véhicule ancien va être très demandeur pour la réalisation de pièces manquantes ou la réparation de pièces abîmées ou usées ;

- La conception même des véhicules va tenir compte des possibilités de la FA et de nouvelles esthétiques vont voir le jour. D'abord sur des pièces de personnalisation comme les jantes de roues (géométries impossibles à obtenir autrement) puis sur l'ensemble des véhicules ;
- L'application la plus prometteuse est le véhicule électrique.

iii. Cosmétique et parfumerie

Essentiellement obtention de prototypes, la fabrication additive étant utilisée surtout chez les moulistes.

BÉNÉFICES PAR DOMAINE D'APPLICATION

Domaines	Bénéfices
Prototypage rapide	- Personnalisation totale et rapidité d'obtention, autonomisation du prototypage par rapport aux moulistes et fabricants de maquettes, rapidité de production en cycle contraint

FREINS

- Montée en compétences sur un nouveau processus complet de fabrication.

ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

- Restera principalement utilisé pour les prototypes et moules.

iv. Santé

Part de marché : 15 à 16%

- Implants dentaires, bridges et les couronnes ;
- Guides chirurgicaux ;
- Implants orthopédiques ;
- Appareils auditifs ;
- Échafaudages pour l'ingénierie tissulaire ;
- D'autres dispositifs d'assistance, chirurgicaux et prothétiques.

Les implants médicaux représentent actuellement plus de 60% du marché.

BÉNÉFICES PAR DOMAINE D'APPLICATION

Domaines	Bénéfices
Prothèses, réparation	<ul style="list-style-type: none"> - Parfaite adaptation (personnalisation), possibilité de reconstruction faciale quasi parfaite. - Possibilité d'amélioration de l'esthétique des prothèses visibles - Structures lattices favorisant la colonisation des cellules osseuses
Ancillaires	<ul style="list-style-type: none"> - Adéquation parfaite des râpes, par exemple, lors d'une pose de prothèses fémorale (minimum d'enlèvement de l'os)

FREINS

- Homologation médicale, essais cliniques, finition et nettoyage des produits.

ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

- Il est estimé qu'en 2020, plus de la moitié du CA dans le médical sera généré par le dentaire ;
- Le marché va tendre vers du bio printing (impression de tissu vivant à minima d'ici 5 ans) ;
- Le champ se développe également avec les orthèses (plâtres, semelles...).

c. Les principaux métiers concernés en région Centre

i. Électronique

Part de marché 2012 : 20 à 22%.

- Production d'outils et d'équipements (pinces) ;
- Incorporation directe de RFID dans des objets métalliques (Mécatronique) ;
- Micro-électromécanique 3D à base de polymères, (MEMS) ;
- Circuits à micro-ondes sur substrat de papier ;
- Circuits de commande intégrés au plus près de la fonction à assurer.

BÉNÉFICES PAR DOMAINE D'APPLICATION

Domaines	Bénéfices
Produits	- Sur mesure, personnalisation - Intégration directe dans les produits par FA (mécatronique)
Production	- Amélioration des temps de cycle

ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

- Augmentation de la demande pour les systèmes embarqués ;
- Miniaturisation et intégration fonctionnelle des dispositifs ;
- Augmentation de la demande en systèmes intelligents ;
- Émergence forte pour l'électronique intégrée aux polymères.

ii. Emballage et conditionnement

- Prototypage (modèles visuels).

BÉNÉFICES PAR DOMAINE D'APPLICATION

Domaines	Bénéfices
Emballages et conditionnement	- Obtention d'emballage directement à la forme du produit à sécuriser, personnalisation, rapidité de production en cycle contraint

FREINS

- Montée en compétences sur un nouveau processus complet de fabrication, investissements.

ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

- Lors de la découpe, chacune des couches est gravée d'un numéro permettant l'assemblage simple du calage. La mise en position de chacune de ces couches est réalisée directement par son conditionnement extérieur (boîte américaine) ;
- Le même modèle CAO est utilisé en ajoutant une petite surépaisseur ;
- Sans modèle CAO, la pièce à sécuriser est scannée en 3D.

iii. Fonderie

- Obtention directe de modèle en cire pour la fonderie à cire perdue ;
- Fabrication directe de moules en sable pour l'obtention de formes complexes ou lattices (frittage avec liant) ;
- Fabrication directe de maîtres modèles pour le moulage en sable.

BÉNÉFICES PAR DOMAINE D'APPLICATION

Domaines	Bénéfices
Cire perdue	<ul style="list-style-type: none"> - Diminution des temps de fabrication des modèles - Excellente définition des modèles
Moules en sable	<ul style="list-style-type: none"> - Obtention plus rapide de formes très complexes - Permet de s'affranchir de l'étape de production de boîtes à noyaux et de disposer en moins d'une semaine de toutes les parties du moule nécessaires - Plus de stock

FREINS

- Montée en compétences sur un nouveau processus complet de fabrication, investissements.

ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

- Généralisation de l'utilisation de la fabrication additive pour l'obtention de modèles en cire et de maître-modèles.

iv. Moules

Part de marché 2012 : 13,5%

- Fabrication d'inserts et de moules avec des canaux de refroidissement ;
- Fabrication directe d'outillage ou fabrication indirecte via des modèles ;
- 4 axes de travail privilégiés:
 - Optimisation du refroidissement, ce qui autorise des vitesses d'injection diminuées de 40 à 60% ;
 - Impression d'inserts pour les moules de grandes dimensions, en maraging par exemple, difficilement usinables. Ces inserts intègrent l'optimisation du refroidissement ;
 - Impression directe de parties sur moules usinés avec optimisation de la matière ;
 - Fabrication de moules, en résine spéciale, de préséries d'homologation, permettant d'optimiser rapidement la conception des moules finaux et de livrer beaucoup plus vite les préséries ;
- Fabrication de moules de préséries d'homologation :
 - Fabrication additive de pré-moules d'injection ;
 - Injection de la série prototype des pièces client ;
 - Validation client ;
 - Fabrication définitive des moules ;
 - Bilan :
 - Obtention des pré-moules en une semaine, contre huit traditionnellement ;
 - Livraison rapide de pièces prototypes au client ;
 - Obtention en une seule fois de l'outillage définitif.

BÉNÉFICES PAR DOMAINE D'APPLICATION

Domaines	Bénéfices
Prototypage rapide	- Personnalisation et rapidité d'obtention - Fabrication de pièces complexes monoblocs
Préséries	- Obtention rapide des préséries et optimisation des temps de développement des moules finaux
Temps de cycle	- Diminution très importante des temps de cycle d'injection par optimisation du refroidissement
Gain de matière	- Obtention d'une forme usinée minimale avec rechargement laser (SLM ou DLMS, ou SLS) ce qui permet de partir d'un bloc plus petit
Réparation	- Rechargement directement à la forme voulue

FREINS

- Dans l'automobile, les moules appartiennent aux constructeurs, dont les acheteurs ne sont pas forcément sensibilisés à l'utilisation futur du moule (qui coûte plus cher à l'achat)

ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

- Généralisation des moules de préséries en résine pour obtenir l'homologation rapidement et la forme définitive du moule ;
- Fabrication directe des moules de petite taille par DLMS ou SLM ;
- Fabrication directe d'inserts optimisés pour les moules de grandes dimensions ;

- Moules multi-matières ayant des qualités mécaniques et thermiques (refroidissement) permettant de diminuer les rebuts de production.

v. Plasturgie

- Pas d'application directe autre que la production de moules

BÉNÉFICES PAR DOMAINE D'APPLICATION

Domaines	Bénéfices
Moules	- Automatisation pour les moules simples
Produits	- Fabrication directe de petites séries sans moules

FREINS

- Montée en compétences sur un nouveau processus complet de fabrication, investissements.

ÉLÉMENTS DE PROSPECTIVE

- Fabriquer des pièces directement sans passer par un moule.

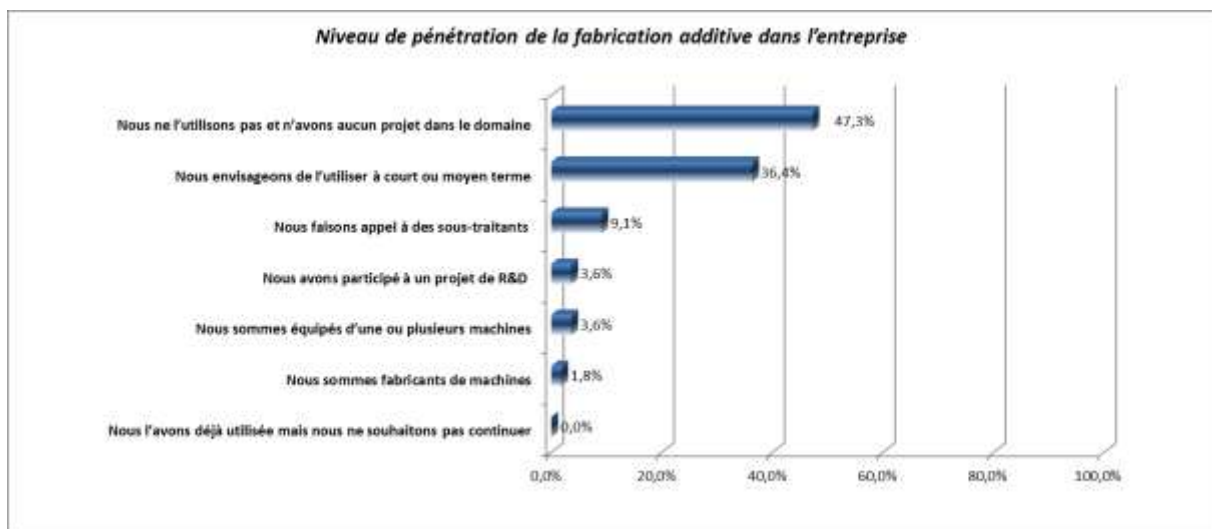
d. Les industriels de la région Centre et la fabrication additive

i. Enquête quantitative auprès des industriels

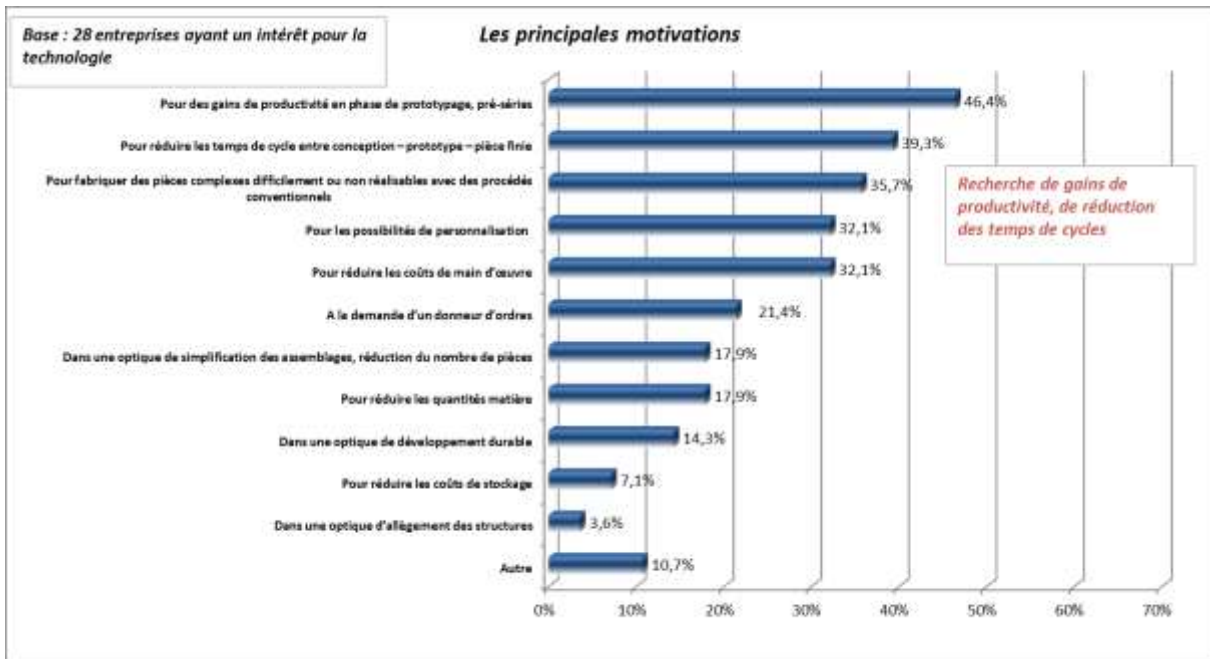
Enquête conduite de juin à octobre 2014. Questionnaire quantitatif par courriel : 55 réponses pour 2 363 entreprises questionnées. 26 entretiens qualitatifs avec des entreprises. Le faible nombre de répondants induit un biais statistique important.

Codes APE	Nombre entreprises
25 Produits du travail des métaux, à l'exclusion des machines et équipements	13
33 Réparation et installation de machines et d'équipements	8
16 Bois, articles en bois et en liège, à l'exclusion des meubles ; articles de sparterie et de vannerie	5
32 Autres produits manufacturés	4
22 Produits en caoutchouc et en plastique	4
18 Travaux d'impression et de reproduction, produits imprimés	3
28 Machines et équipements n.c.a.	2
27 Matériels électriques	2
26 Équipements informatiques, électroniques et optiques	2
24 Produits métallurgiques	2
23 Autres produits minéraux non métalliques	2
20 Produits chimiques	2
31 Meubles	1
29 Véhicules automobiles, remorques et semi-remorques	1
17 Papiers et cartons	1
15 Cuir et articles en cuir	1
13 Produits de l'industrie textile	1
Non communiqué	1
Total	55

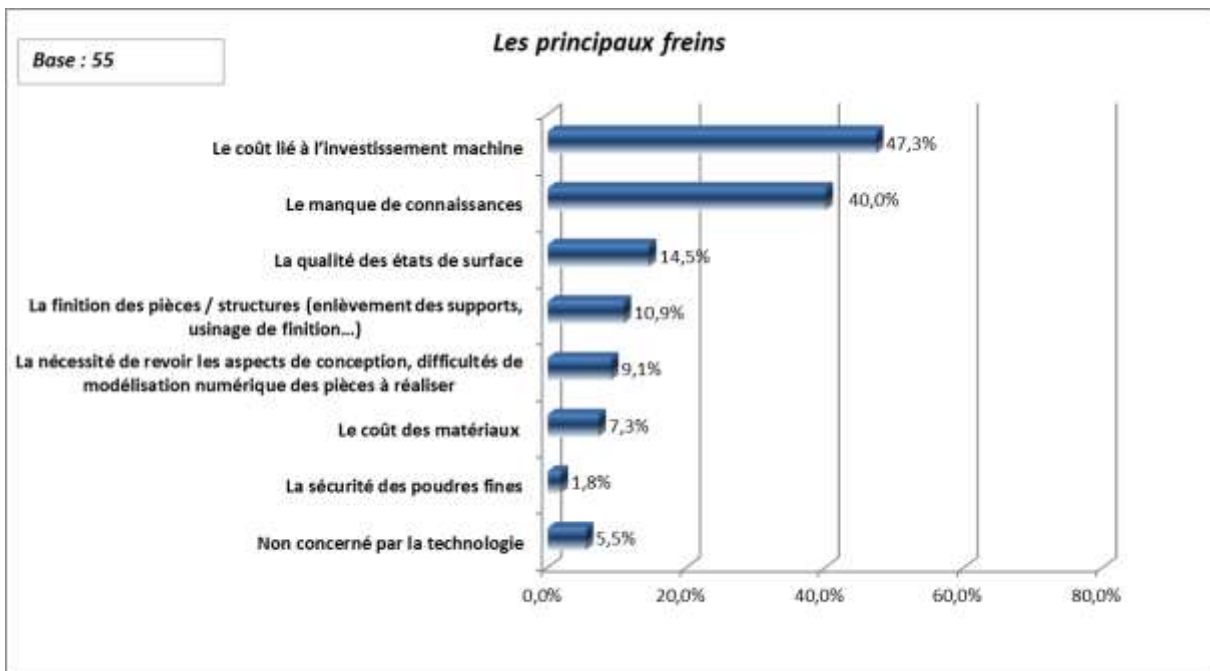
Utilisez-vous ou envisagez-vous d'utiliser la fabrication additive dans le cadre de votre activité ? (plusieurs réponses possibles)



Quelles sont les principales raisons qui vous incitent à utiliser la fabrication additive ?



Quels sont les freins ou difficultés rencontrés ?



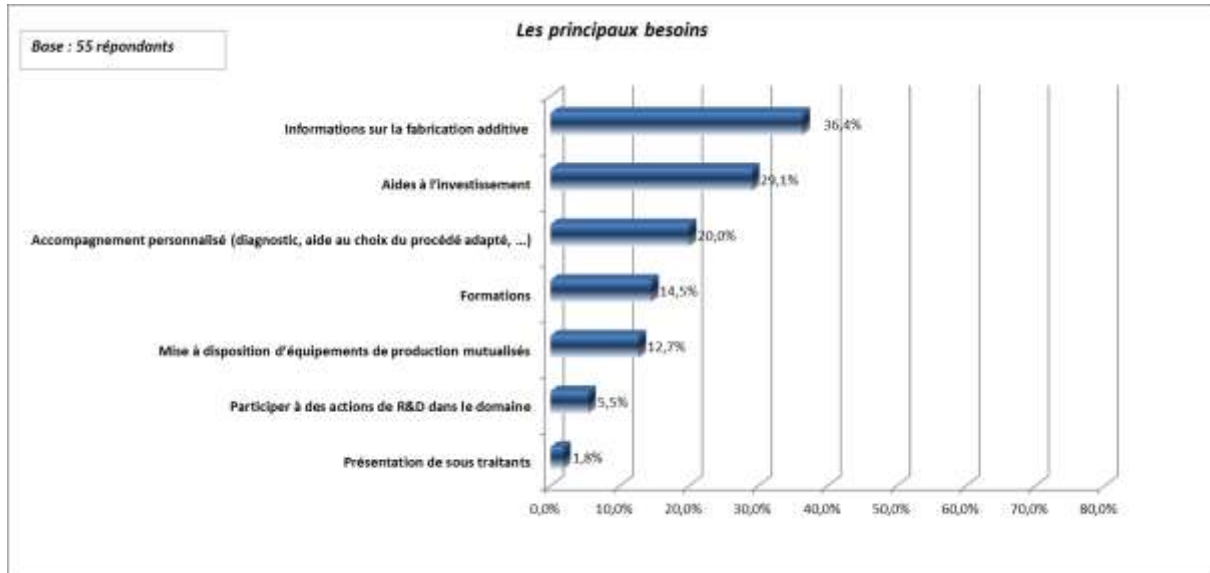
Commentaires des entreprises interrogées

- *Étant une petite PME, il est très difficile de trouver le processus adapté à notre besoin et les coûts sont relativement élevés pour une structure comme la nôtre ;*
- *Nombre de maquettes réalisées par an pas assez important pour investir. Prix et délais de la sous-traitance en stéréolithographie raisonnables. Nous n'avons pas de bureau d'études intégré (sous-traitance) et ce serait le poste le plus cher à intégrer (personne + station travail) ;*
- *Je dois approfondir mes connaissances dans la conception de fichiers 3D ;*
- *Pour le moment, nous n'avons pas de marché potentiel. La petite taille de notre entreprise ne nous permet pas d'envisager cette nouvelle technologie avec tous les risques liés : obsolescence rapide des machines, savoir-faire, marché trop orienté prototype, dépollution des équipements en passant à une*

autre matière, coût global et retour sur investissement plus qu'incertain, marché non mature en France ou chez mes clients traditionnels ;

- Il me semble qu'il faut attendre une stabilisation technologique et l'ouverture d'un vrai marché avec un vrai potentiel. Mes principaux clients commencent juste à développer cela en interne sans le souhait de divulguer quoi que ce soit ;
- Problèmes difficiles à résoudre compte tenu de la diversité de nos donneurs d'ordres et donc de leurs spécificités.

Quels sont vos besoins dans le domaine ?



Les besoins exprimés sont en adéquation avec les difficultés rencontrées :

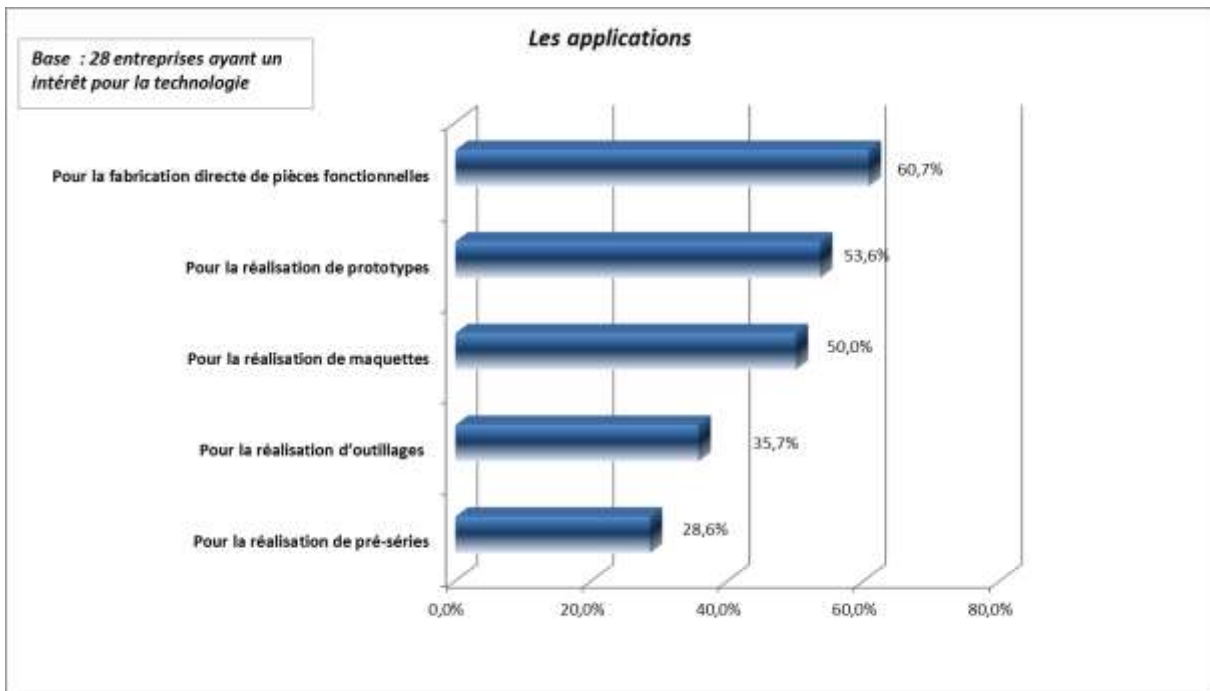
- disposer d'informations sur le périmètre global de la fabrication additive afin de pallier au déficit actuel de connaissances sur le sujet ;
- accéder à des soutiens financiers permettant de répondre à l'enjeu de l'investissement nécessaire.

Commentaires des entreprises interrogées

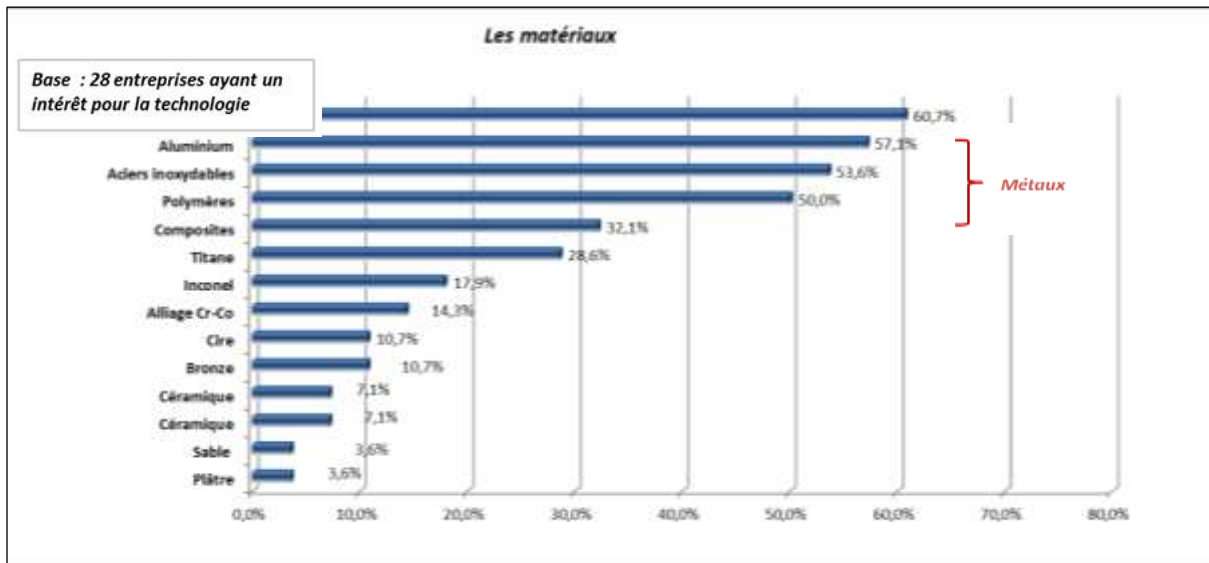
- Nous cherchons des professionnels équipés des dernières machines, capables de réaliser des plans 3D à partir de plans 2D ;
- La maîtrise de ces outils est longue et il est difficile de les rentabiliser immédiatement. Les investissements sont importants au regard des capacités des structures de notre secteur ;
- Approfondissement de la CAO 3D. Conseils efficaces + fournisseurs efficaces. Financement à trouver.
- Équipements de production mutualisés afin de réduire les coûts ;
- Il s'agit pour nous de compléter notre gamme de matériel pour la réalisation de moules et d'inserts. Le problème est de financer l'investissement durant la phase de montée en charge de son utilisation. Par ailleurs il est difficile de vendre cette technologie lorsqu'on ne la possède pas, donc le recouvrement des phases préalables par de la sous-traitance avec un cadre figé est quasi impossible ;
- Quels sont les différents types de fabrication afin de trouver celui le plus à même de correspondre à nos besoins ;
- Une fois le bon processus défini, être formé pour utiliser la machine et le logiciel associé ;
- Aides au choix du procédé ;
- Étant une petite PME l'investissement (machine; logiciel; formation...) est relativement lourd ;
- Besoin de formation pour la réalisation de fichiers 3D avec détection des anomalies, incohérences, déséquilibres... ;
- Fabrication de posage pour assemblage produits. Maquette pour mesure 3D ;
- État de l'art récent par rapport aux solutions « classiques » de stéréolithographie ?

Seules trois entreprises interrogées ont identifié des partenaires pour aller plus loin dans le domaine.

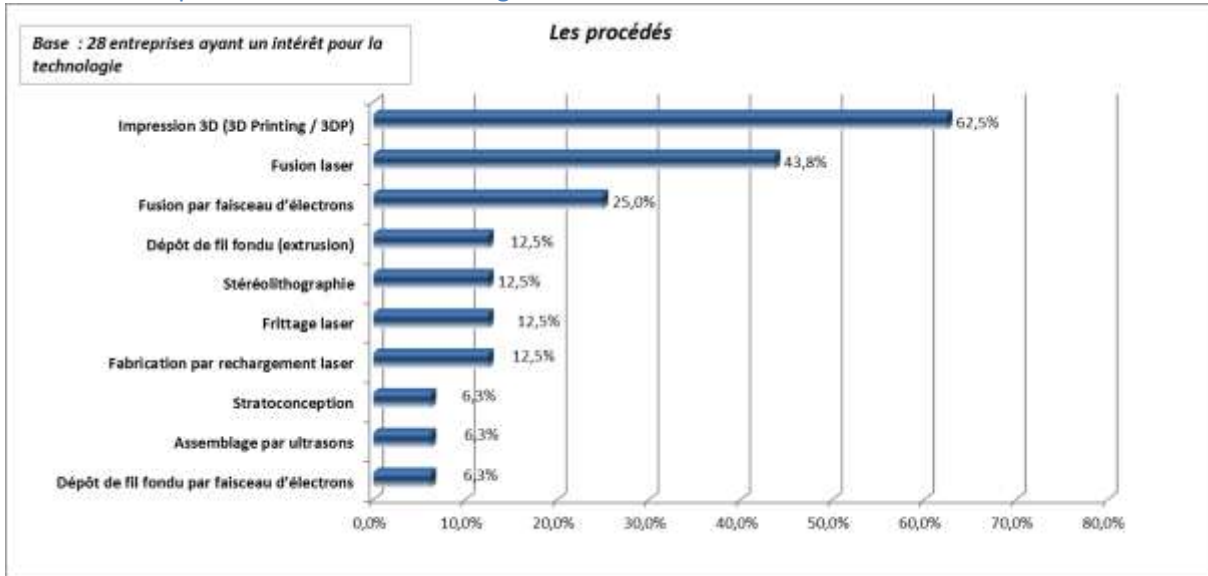
Pour quelles applications envisagez-vous ou utilisez-vous la fabrication additive ?



Quels sont les matériaux utilisés ou envisagés ?



Quels sont les procédés utilisés ou envisagés ?



ii. Consultation qualitative d'industriels représentatifs

26 entreprises ayant accepté de répondre à un entretien approfondi.

Globalement, **on note un fort intérêt pour la fabrication additive de la part des entreprises interviewées.** Certaines en font un axe de développement stratégique.

Cet intérêt relève en grande partie de la volonté propre des entreprises **car très peu d'entre elles ont été sollicitées par leurs clients.** Elles se disent conscientes des enjeux et ne veulent pas rater l'opportunité. Ce manque de visibilité des opportunités commerciales représente évidemment un frein important.

Par ailleurs, **ces entreprises sont confrontées à un manque d'informations fiables** et de connaissances des technologies existantes, des possibilités offertes, des contraintes, limites et coûts...

A l'heure actuelle, **les industriels sont globalement en phase de recherche** d'appropriation de la technologie :

- soit ils ont déjà démarré des essais (via des sous-traitants, des fabricants de machines ou des centres de transfert)
- soit ils cherchent des opportunités économiquement viables pour les mener.

Les axes de travail portent à la fois :

- sur du métallique et sur les polymères,
- pour des pièces fonctionnelles, des outillages et des prototypes-modèles visuels

Enfin, le coût d'investissement reste quasiment inaccessible pour la majorité **au regard de l'incertitude** liée à la maturité de la technologie et des opportunités commerciales.

Commentaires des entreprises interrogées

Au regard du caractère parfois stratégique des informations partagées par les industriels dans le cadre de cette consultation, et en respect des engagements de confidentialité pris envers eux, la DIRECCTE Centre a choisi de ne pas les reproduire dans cette étude.

e. Les besoins identifiés

i. Information des industriels

Que ce soit à travers l'enquête quantitative ou l'enquête qualitative, le besoin prioritaire exprimé par les industriels porte sur l'information.

Les entreprises souhaitent dépasser l'engouement médiatique et disposer d'informations fiables sur la réalité de la technologie, les différents procédés, les applications, les contraintes, les limites, les coûts et les aspects sécurité (manipulation de poudre fine notamment)

Corollaire de ces préoccupations, les industriels sont **demandeurs de réunions d'informations** au plus près des territoires (les déplacements importants sont un frein) en s'appuyant sur des experts techniques, des retours d'expériences d'entreprises dans différents domaines.

Ils sont aussi demandeurs de synthèses de veille technologique

ii. Accompagnement du développement de la technologie et de la montée en compétences

Concernant la production de pièces fonctionnelles, la technologie en est encore qu'à ses débuts. Si, globalement, les donneurs d'ordres disposent des moyens humains et financiers nécessaires au développement et à la prise en main de la technologie, ce n'est pas le cas des PME.

Ces dernières ont **besoin d'identifier les possibilités de la technologie** par rapport à leur métier et leurs produits, de vérifier la faisabilité technique, de réaliser des essais, de caractériser et contrôler les pièces. Or, à l'heure actuelle, **l'investissement nécessaire reste beaucoup trop élevé** pour des entreprises qui n'ont souvent encore aucune demande client claire et pour une technologie qui nécessite encore de nombreux développements pour la stabiliser. Pour autant, les entreprises s'accordent à dire **qu'il faut rapidement monter en compétences** afin d'être prêt au moment opportun.

Les entreprises souhaitent être aidées pour accéder à des moyens de production à un coût abordable avec un accompagnement personnalisé (transfert de compétences) afin qu'elles puissent commencer à s'approprier la technologie et faire les essais nécessaires.

Une plate-forme d'équipement mutualisée est la piste qui, pour un nombre notable d'industriels, répondrait à deux nécessités :

- Favoriser la montée en compétences des entreprises impliquées et permettre aux acteurs intéressés de mener des travaux de R&D sur le processus, les matériaux, les aspects sécurité... ;
- Mettre en relation des PME, des donneurs d'ordres, des entreprises des finitions ou encore des fournisseurs de poudres.

iii. Développement de l'offre de formation

Les entreprises se sont principalement exprimées autour de la formation continue mais il ne faut pas négliger la formation initiale. Aujourd'hui, au regard de l'avancement de leurs travaux, peu d'entreprises ont de vision précise sur d'éventuels recrutements.

Par ailleurs, certaines entreprises cherchent à acquérir une vision concrète des implications de la fabrication additive en termes de conception ou de fin de processus.

S'agissant de la formation initiale, les industriels souhaitent que des modules d'enseignement spécifique soient intégrés dans les filières BTS, DUT et écoles d'ingénieurs.

Pour la formation continue, et afin de permettre une **adaptation des compétences aux nouvelles formes de conception et de finition**, plusieurs niveaux semblent nécessaires aux professionnels :

- Des formations de sensibilisation sur le processus complet de la fabrication additive, plutôt destinées aux managers ;

- Des formations spécifiques à la conception en vue de produire par procédés additifs (modélisation 3D, utilisation des logiciels d'optimisation topologique...)

iv. Accompagnement à l'investissement

Pendant et surtout suite à la phase d'expérimentation, les entreprises recherchent un accompagnement avec conseil et aide à l'investissement.

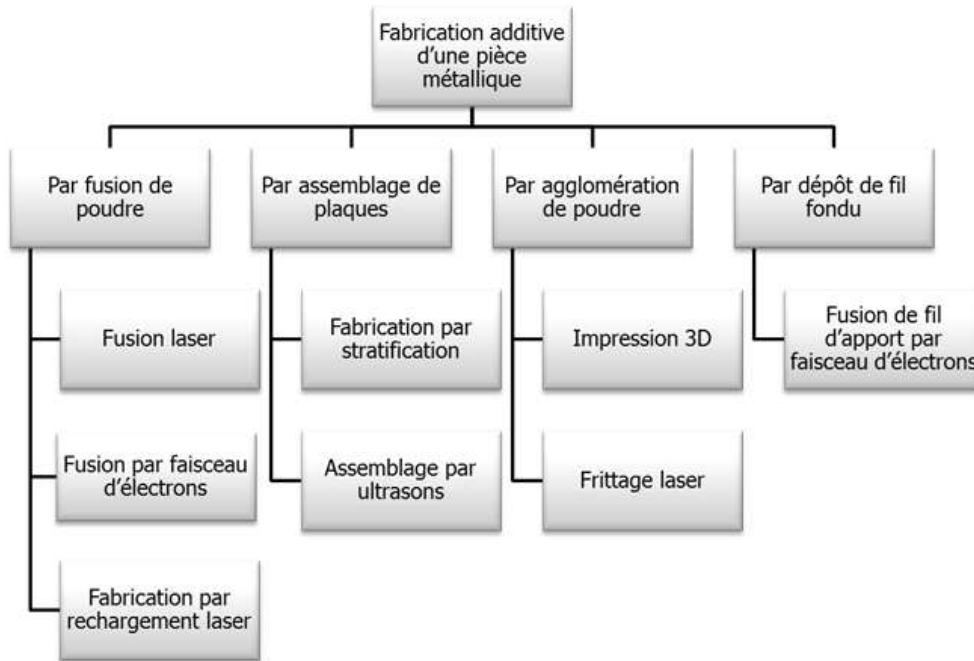
Au même titre que des dispositifs ont été créés pour aider les entreprises à se robotiser, les entreprises seraient intéressées d'une action d'accompagnement à la fabrication additive leur permettant de se développer dans cette voie :

- Diagnostic et aide au choix de la technologie ;
- Aide financière et appui dans les démarches.

4 Annexes

a. Les technologies de la fabrication additive¹¹

i. Panorama des technologies : matériaux métalliques¹²



PAR FUSION DE POUDRE

Fusion laser (selective laser melting, SLM)

- Procédé : le râteau amène une couche de poudre qui est fusionnée à la couche inférieure par laser de très forte puissance. La plate-forme mobile descend d'une couche, et ainsi de suite.
- Consommables : poudre très fine, jusqu'à 20µm.
- Matériaux : métaux uniquement. titane, aluminium, aciers inoxydables, chrome-cobalt, aciers à outils...
- Dimensions de pièces possibles : 630x400x500mm ; épaisseur de couche : 20 à 100µm.
- Avantages et inconvénients par rapport au frittage laser : pièces pleine matière beaucoup plus denses ; pas de liant : fusion véritable du métal grâce à la puissance du laser ; taille des pièces encore limitée.
- Applications : médical, aéronautique, automobile, insert de moules.
- Exemples de productions : aube de turbine, treillis en acier inoxydable, outillage.

Fusion par faisceau d'électrons (electron beam melting, EBM)

- Procédé : Le râteau amène une couche de poudre qui est fusionnée à la couche inférieure par faisceau d'électrons. La plateau d'impression descend d'une couche, et ainsi de suite.
- Consommables : poudre très fine.
- Matériaux : métaux uniquement. Titane, aluminium, aciers inoxydables, chrome-cobalt, aciers à outils...
- Dimensions de pièces possibles : 350mm diam x 350mm haut ; faisceau minimum: 100 µm.

¹¹ Source : CETIM. L'offre en procédés, consommables, matériaux, dimensions de pièces possibles, ainsi que les applications évoluent rapidement.

¹² Principalement. Lorsqu'une technologie est adaptée à la fois aux matériaux métalliques et non métalliques, elle est présentée dans cette section et n'est mentionnée que pour mémoire dans la section « Matériaux non métalliques ».

- Avantages et inconvénients par rapport au frittage laser : temps d'obtention des pièces plus court ; pièces pleine matière beaucoup plus denses ; taille des pièces limitée due, en partie, à la chambre sous vide.
- Applications : médical et aéronautique principalement.
- Exemple de production : ailes de turbine en titane.

Fabrication par rechargement laser (fabrication directe par projection laser, FDPL, construction laser additive direct ou laser cladding, CLAD)

- Procédé : fusion du matériau d'apport et fusion légère du substrat.
- Consommables ; poudre.
- Matériaux : métaux (aussi : plastiques, céramiques).
- Dimensions de pièces possibles : épaisseur de dépôt entre 0,3 et 2mm ; largeur de 1 à 5mm.
- Avantages : dépôt dense, liaison métallurgique, faible dilution.
- Applications : aéronautique, automobile...
- Exemples de production : matrices composites, traitement de surface, réparation.

PAR ASSEMBLAGE DE PLAQUES

Fabrication par stratification (layer laminated manufacturing)

- Procédé : décomposition automatique de l'objet en une série de couches élémentaires complémentaires (strates) dans lesquelles sont placés des inserts de positionnement. Chaque strate est directement mise en panoplie puis fabriquée par micro-fraisage rapide, découpe laser, découpe au fil ou tout autre moyen de découpe de tout matériau en plaques.
- Consommables : tous matériaux en plaques.
- Matériaux : tous matériaux.
- Dimensions de pièces possibles : limites de la machine de découpe.
- Avantages et inconvénients : coût machine raisonnable (découpe) ; facilité d'approvisionnement matières : temps de réalisation des pièces réduit ; le seul inconvénient décelé est le besoin de finition (joints de plaques).
- Applications : toutes.
- Exemples de production : moule d'injection plastique.

Assemblage par ultrasons

- Procédé : les pièces à souder sont placées entre l'enclume et un doigt métallique animé de vibrations à fréquence ultrasonore (20 à 100kHz). Les ultrasons sont produits par piézo-électricité ou magnétostriction (courant à haute fréquence). Une pression exercée sur les pièces placées à recouvrement assure une friction entre celles-ci. L'énergie vibratoire du sonotrode provoque la dilatation locale des réseaux cristallins dans la zone des deux pièces à assembler, ce qui provoque une interpénétration moléculaire des deux éléments. L'énergie est fonction de l'épaisseur minimum à assembler et de la nature du métal.
- Consommables : matériaux en plaques ou films.
- Matériaux : thermoplastiques principalement, métaux.
- Dimensions de pièces possibles : petites pièces, vu les énergies à mettre en jeu.
- Avantages et inconvénients : possibilité de souder des matériaux différents (assemblage multi matériaux) ; inadapté pour les dimensions importantes (quelques dizaines de centimètres) ; pour les métaux, la soudure ne peut se faire que par points.
- Applications : toutes applications.
- Exemples de productions : assemblage de pièces automobiles injectées.

PAR AGGLOMÉRATION DE POUDRES

Impression 3D (3D printing, 3DP)

- Procédé : l'étalement d'une fine couche de poudre de composite sur une plateforme. Puis sur celle-ci, la tête d'impression va déposer des petites gouttes de glue colorées. En combinant ses gouttes on obtient alors la couleur désirée. La plateforme s'abaisse au fur et à mesure que les couches de poudre sont collées jusqu'à obtenir l'objet final. Pour la finition il faudra chauffer la pièce et aspirer l'excédent de poudre.
- Consommables : poudres fines.
- Matériaux : métaux et tous matériaux sous forme de poudre, bois y compris (le matériau de base à l'origine était la céramique).
- Dimensions de pièces possibles : volume de travail jusqu'à 1m (augmente constamment).
- Avantages et inconvénients : rapidité ; jusqu'à 6 fois moins cher qu'une imprimante mais précision et qualité d'impression parfois inférieures ; sans traitement post-impression les pièces sont plus fragiles et leur surface est plus rugueuse ; un prototype fonctionnel pourra ne pas supporter les contraintes de fonctionnement normales.
- Applications : toutes applications ne nécessitant pas la résistances aux grandes contraintes mécaniques.
- Exemples de productions : prototypes.

Frittage laser (selective laser sintering, SLS)

- Procédé : un rouleau amène une couche de poudre qui est fusionnée à la couche inférieure par laser. La plate-forme mobile descend d'une couche, et ainsi de suite. Ensuite, nettoyage de la pièce, passage au four pour déliantage, diffusion/infiltration de bronze, dans le cas des métaux.
- Consommables : poudre très fine, jusqu'à 20 µm., avec un liant.
- Matériaux : Plastiques, céramiques, verre, métaux. Spécifiquement pour ceux-ci : procédé DMLS, Direct Metal Laser Sintering : aciers inoxydables, acier d'outillage maraging, Inconel 625 et 718, Titane Ti6AlV4, principalement.
- Dimensions de pièces possibles : Volume de travail: 700x580x380mm ; épaisseur minimale des parois: 0,7 mm.
- Applications : Outillages (moules), dentisterie, aérospatiale, automobile, architecture, décoration, design, etc...
- Exemples de productions : moule d'injection, prothèses dentaires.

Frittage avec masque (selective mask sintering, SMS)

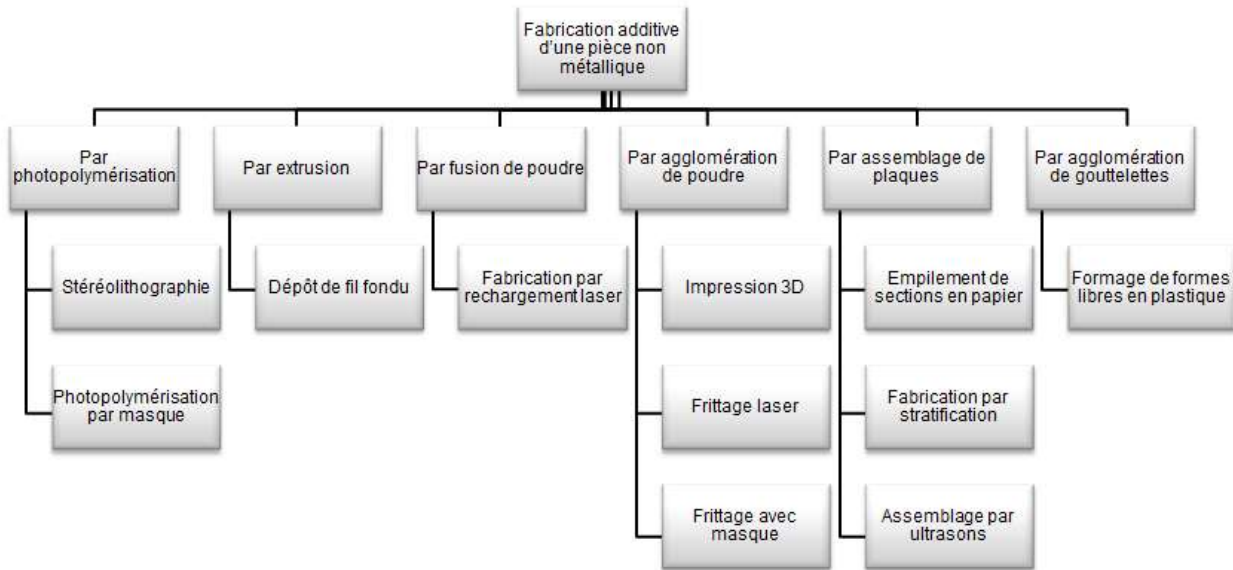
- Procédé : le frittage est obtenu à partir d'une source Infra-rouge qui procure un flash de très haute énergie dont une partie du faisceau est arrêtée par un masque. Ce dernier est reconstitué à chaque couche.
- Consommables : poudres
- Matériaux : métaux, thermoplastiques et céramiques.
- Dimensions de pièces possibles : 300 x 200 x 800 mm.
- Avantages et inconvénients : coût machine raisonnable ; grande résolution et formes permises complexes ; épaisseurs de couche jusqu'à 25 µm ; l'une des technologies les plus rapides, chaque couche étant obtenue en un seul flash ; plutôt adapté au prototypage fonctionnel, permet néanmoins même d'obtenir des pièces relativement résistantes.
- Applications : principalement prototypage.
- Exemples de productions : prototypes fonctionnels.

PAR DÉPÔT DE FIL FONDU

Faisceau d'électrons forme libre (electron beam melting free form, EBFFF ou EBF³)

- Procédé : dans une chambre à vide, on fait fondre un fil par faisceau d'électrons et, par empilement, on obtient des formes libres en 3D. La technologie est inspirée du soudage.
- Consommables : bobines de fil métallique.
- Matériaux : titane, tantale, inconel, aciers inoxydables, ...
- Dimensions de pièces possibles : volume de travail: plusieurs mètres.
- Applications : outillages (moules), aérospatiale, armement...
- Exemples de productions : pièces aéronautiques.

ii. Panorama des technologies : matériaux non métalliques



PAR PHOTOPOLYMERISATION

Stéréolithographie (stereolithograph apparatus, SLA)

- Procédé : un rouleau amène une couche de pâte polymère qui est solidifiée à la couche inférieure par laser UV. La plate-forme mobile descend d'une couche, et ainsi de suite. Après fabrication, enlèvement du support de maintien de la pièce sur le plateau ; post-traitement au four pour terminer la polymérisation ; nettoyage avec un solvant.
- Consommables : résines sous forme liquide.
- Matériaux : résines acrylates, époxy, ABS ; la résine peut être chargée de poudre de céramiques ou de métaux.
- Dimensions de pièces possibles : plusieurs mètres.
- Avantages et inconvénients : obtention possible de pièces fonctionnelles ; grande précision (0,1 mm) et possibilité de formes très complexes ; post-traitements spécifiques, dont enlèvement du support.
- Applications : toutes applications à base de résines.
- Exemples de productions : prototypage, figurines.

PAR EXTRUSION

Dépôt de fil fondu (fused deposition modeling, FDM)

- Procédé : Des fils de polymères sont extrudés, fondus et déposés couche par couche jusqu'à obtention de la pièce finale.
- Consommables : polymères conditionnés en rouleaux de fil.
- Matériaux : thermoplastiques, ABS, polycarbonate, élastomères.
- Dimensions de pièces possibles : volume de travail, en général 200 x 200 x 150mm.
- Avantages et inconvénients : machines peu chères, favorisant la pénétration dans le grand public (quelques centaines d'euros) ; machine de base des FAB LAB ; ne convient que pour les petites pièces ; aspect brut, on voit chaque couche, de quelques dixièmes ; temps de fabrication très long.
- Applications : essentiellement domestique ; convient très bien pour des prototypes d'aspect ; pièces fonctionnelles possibles.
- Exemples de productions : prototypage, maquette.

PAR FUSION DE POUDRE

Fabrication par rechargement laser (fabrication directe par projection laser, FDPL, construction laser additive direct ou laser cladding, CLAD)

Voir la même technologie dans la section « Matériaux métalliques ».

PAR AGGLOMÉRATION DE POUDRE

Frittage laser (selective laser sintering, SLS)

Impression 3D (3D printing, 3DP)

Frittage avec masque (selective mask sintering, SMS)

Voir les mêmes technologies dans la section « Matériaux métalliques ».

PAR ASSEMBLAGE DE PLAQUES

Fabrication par stratification (layer laminated manufacturing)

Assemblage par ultrasons

Voir les mêmes technologies dans la section « Matériaux métalliques ».

b. La méthodologie

i. État des lieux de la fabrication additive, avec une vision prospective et sectorielle

Technologies, applications, principaux marchés, activités ou filières, en sous-traitance (y compris finitions) ou en production propre, niches prometteuses :

- Analyse documentaire (bibliographie, recherche internet, participation à des manifestations, exploitation de rapports...) :
- Échange avec des experts (Cetim, Certec).

ii. Identification des entreprises régionales potentiellement impliquées dans la fabrication additive (y compris les entreprises de finition), état des lieux régional des ressources existantes

- Enquête quantitative auprès d'une cible large d'industriels (questionnaire envoyé par courriel).

iii. Positionnement des marchés de la fabrication additive par rapport au contexte régional (filières majeures, clusters, pôles ...)

- Interview d'une trentaine d'entreprises et acteurs régionaux :
 - Positionnement actuel ;
 - Capacité à intégrer la technologie ;
 - Facteurs clés de succès ;
 - Impact sur la compétitivité des entreprises régionales.

iv. Analyse et recommandations

- Identification de la maturité des entreprises en termes de fabrication additive ;
- Analyse SWOT ;
- Recommandation sur les ressources à développer pour accompagner l'intégration de la fabrication additive en région ;
- Définition d'un plan d'action à mettre en œuvre avec les partenaires locaux.

c. Les sources

- 3D printing and additive manufacturing state of the industry annual worldwide progress report (Wohlers Report 2014) <http://www.wohlersassociates.com/state-of-the-industry-reports.html>
- 50 fablabs en France (et 350 dans le monde) : État des lieux et pratiques <http://www.netpublic.fr/2014/06/50-fablab-en-france-et-350-dans-le-monde-etat-des-lieux-et-pratiques/>
- Additive manufacturing : A game changer for the manufacturing industry? (Roland Berger) http://www.rolandberger.com/media/pdf/Roland_Berger_Additive_Manufacturing_20131129.pdf
- Additive Manufacturing : SASAM Standardisation Roadmap www.sasam.eu
- AMF – The 3D printing format to replace STL ? (3D Additive Fabrication, novembre 2011) <http://3daddfab.com/blog/index.php?/archives/5-AMF-The-3D-Printing-Format-to-Replace-STL.html>
- Bien gérer ses fichiers CAO pour imprimer (Industrie & technologies, mars 2013, J.-F. Prévéraud) <http://www.industrie-techno.com/bien-gerer-ses-fichiers-cao-pour-imprimer.23117>
- Dossier Fabrication Additive source de profits (Micronora, septembre 2013) http://www.micronora.com/micronora_infos/132.pdf
- Enjeux industriels en mécanique : de l'impression 3D à la fusion laser (CETIM-CERTEC, octobre 2013) <http://www.cetim-certec.com/publications/>
- État des lieux et typologie des ateliers de fabrication numérique, rapport final (Direction Générale des Entreprises, avril 2014, F. Bottolier-Depois, B. Dalle, F. Eychenne, A. Jacquelin, D. Kaplan, J. Nelson, V. Routin) http://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/etudes-et-statistiques/etudes/numerique/etat-des-lieux-fablab-2014.pdf
- Fablab : l'innovation libérée grâce à l'impression 3D (Industrie et technologies, juin 2014, Th. De Jaegher) <http://www.industrie-techno.com/fablab-l-innovation-liberee-grace-a-l-impression-3d.30597>
- Fabrication additive de moules en sable pour fonderie (collection Performances Cetim) <http://www.cetim.fr/Mecatheque/Resultats-d-actions-collectives/Fabrication-additive-de-moules-en-sable-pour-fonderie>
- Fabrication additive et opportunités pour la plasturgie (Carine Duwat, 05/06/2014) http://www.ardi-rhonealpes.fr/c/document_library/get_file?uuid=2e24edad-e7c7-4f36-ae42-deda72d04dc9&groupId=10136
- Impression 3D : Les prémisses d'une nouvelle (r)évolution industrielle ? (Service pour la Science et la Technologie, Ambassade de France à Washington, septembre 2014, Pierrick Bouffaron) http://sf.france-science.org/wp-content/uploads/2014/11/SMM14_025.pdf
- Impression 3D, de l'idée au produit (Alain BERNARD, Professeur des Universités à l'École Centrale de Nantes, Vice-Président, Association Française de Prototypage Rapide, 17 avril 2014) <http://www.visiatome.fr/Local/visiatome/files/691/Imprimante.3D.par.Alain.bernard.le.17.avril.2014.pdf>
- L'impression 3D (Pour la science n°436, février 2014) http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/article-l-impression-3d-32535.php
- L'impression 3D déjà en production (L'usine nouvelle n°3391, septembre 2014, F. Parisot) <http://www.usinenouvelle.com/article/l-impression-3-d-deja-en-production.N285820>
- L'impression 3D –ou fabrication additive (Philippe Heinrich, Consultant-formateur en Nouvelles Technologies, Innovation et Systèmes d'Information, 2013) <http://www.heinrich-consultant.fr/wp-content/uploads/2013/02/Impression-3D.pdf>
- L'impression 3D : impacts économiques et enjeux juridiques (Les dossiers de la direction des études de l'INPI, dossier n° 2014-04, septembre 2014, Fatima Ghilassene) http://www.inpi.fr/fileadmin/mediatheque/pdf/OPI/l_impression_3D_sept_2014.pdf

- L'impression 3D, merveille ou menace ? (N°84, Supply chain magazine, mai 2014, M. Ferrey, S. Houette, M. Dougados) <http://supplychainmagazine.fr/TOUTE-INFO/Archives/SCM084/TRIBUNE-84-1.pdf>
- La fabrication additive / Impression 3D (BPI France, 2014) <http://www.bpifrance.fr/Vivez-Bpifrance/Dossiers/La-fabrication-additive-Impression-3D>
- La fabrication additive des matériaux élastomères (note de veille Cetim : août 2014) <http://www.cetim.fr/fr/Mecatheque/Veille-technologique/Fabrication-Additive-des-elastomeres?offset=0&profession=&typd=&technologies=&domaine=&recherche=&tri=date&ordre=desc>
- La fabrication additive un empilement de risques ? (Hygiène et sécurité du travail, déc. 2013, p.88-92) [http://www.hst.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/HST_VP%203/\\$File/VP3.pdf](http://www.hst.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/HST_VP%203/$File/VP3.pdf)
- La fabrication additive: enjeux et attentes pour Snecma – division des moteurs spatiaux (14/04/2014) http://data.over-blog-kiwi.com/0/46/09/90/20140415/ob_72b126_5-snecma-dms.pdf
- Layer-by-Layer: Opportunities in 3D printing, Technology trends, growth drivers and the emergence of innovative applications in 3D printing (MaRS Market Insights, décembre 2013, C. Munoz, Ch. Kim, L. Armstrong) http://www.marsdd.com/wp-content/uploads/2014/04/MAR-CLT6965_3D-Printing_White_paper.pdf
- Les entretiens de Toulouse : La fabrication additive (directe) et les enjeux industriels, (Dassault, 29 avril 2014, Gilles Surdon)
- Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres (thèse de doctorat, spécialité : génie mécanique, présentée et soutenue publiquement par Rémi Ponche le 23 octobre 2013 à Ecole centrale Nantes) http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/91/65/34/PDF/manuscrit_these.pdf
- Optimisation numérique, Application à la fabrication additive (Assises Européennes de la Fabrication Additive, 25/06/2013, Nicolas Gardan) https://csissaclay.files.wordpress.com/2013/07/aefa_2013_gardan.pdf
- Panorama de la fabrication additive (Cetim-Certec, 10/10/2013, Sébastien Pillot) <http://www.cetim-certec.com/wp-content/uploads/2013/10/4-Panorama-de-la-fabrication-additive.pdf>
- Pas de fabrication additive sans objet numérique (note de veille Cetim, juillet 2014) <http://www.cetim.fr/fr/Mecatheque/Veille-technologique/Pas-de-fabrication-additive-sans-objet-numerique?offset=0&profession=&typd=&technologies=&domaine=&recherche=picco&tri=date&ordre=desc>
- Procédés de fabrication additive et applications innovantes (note de veille Cetim, juillet 2014) <http://www.cetim.fr/fr/Mecatheque/Veille-technologique/Procedes-de-fabrication-additive-et-applications-innovantes>
- Quand l'impression 3D réinvente la production (Industrie et technologies, juin 2014, Th. De Jaegher) <http://www.industrie-techno.com/quand-l-impression-3d-reinvente-la-production.30376>



**RETROUVEZ EN LIGNE LE "4 PAGES" ET CETTE ÉTUDE
SUR LES SITES DE LA DIRECCTE CENTRE ET DE CCI CENTRE**
<http://www.centre.direccte.gouv.fr/L-impression-3D-etat-des-lieux-et>
<http://centre.cci.fr/l-impression-3D-en-region>

CONTACT



ronan.le-ber@direccte.gouv.fr
christophe.sauvion@direccte.gouv.fr



matthieu.blin@centre.cci.fr
estelle.sapin-cosson@centre.cci.fr

ÉTUDE FINANCÉE PAR LA DIRECTION GÉNÉRALE DES ENTREPRISES DANS LE CADRE DU MARCHÉ CESAAR



www.entreprises.gouv.fr