



Date de publication :  
**10 janvier 2021**

# Fabrication additive : état des lieux d'une veille sectorielle et technologique

Cet article est issu de : **Mécanique | Fabrication additive – Impression 3D**

par **Arnaud MOIGN**

## Mots-clés

impression 3D | fabrication additive | industrie 4.0

**Résumé** Cet article est un état des lieux de la fabrication additive qui a pour but d'apporter une vision générale des potentielles applications industrielles. Les technologies de fabrication additive sont rapidement abordées, puis les enjeux et les freins associés sont développés en détail, de même que les prévisions d'évolution du marché.

Des exemples d'applications par secteurs d'activité sont ensuite détaillés, puis nous apportons quelques éléments permettant d'aider à l'intégration industrielle de ces technologies.

Par ailleurs, cet article fait référence à une cartographie interactive, conçue en parallèle sur la base d'une exploration du Web et dont l'objectif est de vous aider à visualiser les [...]

## Keywords

3D printing | additive manufacturing | industry 4.0

**Abstract** This article is an inventory of additive manufacturing which aims to provide a general overview of potential industrial applications. Additive manufacturing technologies are quickly addressed, then the issues and associated obstacles are developed in detail, as well as market development forecasts.

Examples of applications by sectors of activity are then detailed, and we then provide some elements to help the industrial integration of these technologies.

In addition, this article refers to an interactive cartography, designed in parallel on the basis of a Web exploration and whose objective is to help you visualize the links between the different themes associated with 3D printing.

## Pour toute question :

Service Relation clientèle  
Techniques de l'Ingénieur  
Immeuble Pleyad 1  
39, boulevard Ornano  
93288 Saint-Denis Cedex

## Par mail :

infos.clients@teching.com

## Par téléphone :

00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **04/11/2024**

Pour le compte : **7200023220 - universite de lorraine // 193.50.135.4**

# Fabrication additive : état des lieux d'une veille sectorielle et technologique

par **Arnaud MOIGN**  
Ingénieur-Rédacteur

<b>1. Fabrication additive : « tour d'horizon »</b>	AS 3 - 2
1.1 Préambule	— 2
1.2 Définition du concept de « fabrication additive »	— 2
1.2.1 Un peu d'histoire	— 2
1.2.2 Les technologies disponibles	— 2
1.2.3 Les technologies les plus utilisées	— 3
1.3 Le marché de la fabrication additive	— 3
1.3.1 Le marché florissant des matériaux pour l'impression 3D	— 4
1.3.2 Quelle croissance future	— 5
1.4 Les enjeux de la fabrication additive	— 5
1.4.1 Réactivité, agilité et personnalisation	— 7
1.4.2 Les enjeux en faveur de développement durable	— 7
1.5 Les freins et défis associés	— 7
1.5.1 Le coût de fabrication	— 8
1.5.2 La complexité d'intégration	— 8
1.5.3 Prévention des risques	— 9
1.5.4 Quels moyens de contrôle	— 10
1.5.5 Un besoin de standardisation et de certification	— 11
<b>2. Fabrication additive : projets et acteurs</b>	— 12
2.1 R & D et fabrication additive	— 12
2.1.1 Brevets au niveau Européen	— 12
2.1.2 Brevets de classe internationale	— 13
2.1.3 Thématiques de recherche scientifique	— 13
2.2 Exemples d'applications par secteurs	— 13
2.2.1 Aéronautique	— 13
2.2.2 Spatial	— 13
2.2.3 Automobile	— 15
2.2.4 Médical	— 15
2.2.5 Transport ferroviaire	— 15
2.2.6 Construction et architecture	— 15
2.3 Niches applicatives porteuses	— 16
2.3.1 Bioprinting	— 16
2.3.2 Impression 3D alimentaire	— 16
2.3.3 Autres niches	— 16
<b>3. Intégrer la fabrication additive dans son industrie</b>	— 16
3.1 Se faire aider par des organismes indépendants	— 16
3.2 Les fabricants d'équipements et de matériaux	— 17
3.3 Les normes	— 18
<b>4. Conclusion</b>	— 18
<b>5. Acronymes et symboles</b>	— 18
<b>Pour en savoir plus</b>	Doc. AS 3

**E**n 2012, l'Union européenne a identifié six domaines technologiques innovants qui permettront aux industries européennes de gagner de nouveaux marchés et d'accroître leur compétitivité. Les technologies de fabrication avancées et en particulier la fabrication additive font partie de ces Technologies Clés Génériques (Key Enabling Technologies, ou KET).

Le champ d'application de la fabrication additive a longtemps été limité au prototypage rapide et aux opérations de R&D. Depuis quelques années, sous l'impulsion des industriels, ces nouvelles technologies de fabrication ont amorcé leur intégration à tous les secteurs d'activité. Avec une croissance de plus de 20 % par an, le marché de la fabrication additive est ainsi en route vers la maturité.

Dans cet article, nous ferons un état des lieux du marché de la fabrication additive, des technologies associées et présenterons quelques perspectives d'application.

## 1. Fabrication additive : « tour d'horizon »

### 1.1 Préambule

Cette veille sectorielle et technologique est illustrée par une cartographie interactive (<http://dev-central.oxway.fr/Maps/index.html?id=863d520f-d88a-4a2d-99f8-a63881da8370&name=Carto%203D%20Printing%2020-10-2020&version=1>) qui permet de visualiser des concepts ainsi que les liens potentiels existants entre ces concepts au sein d'un même corpus documentaire issu de la fouille du Web effectuée par la solution IXXO Web Mining. (cf. figure 1).

Le corpus documentaire utilisé pour créer cette cartographie contient 450 documents sélectionnés manuellement en fonction de leur pertinence sur le sujet de la fabrication additive. La recherche d'informations a été menée de façon à obtenir des informations sur le marché (les acteurs, fabricants ou utilisateurs), les applications industrielles, les technologies, la recherche et les projets d'envergure dans le domaine.

La représentativité est subjective et les données obtenues ne peuvent servir à des fins statistiques. Les concepts sont représentés dans la cartographie par des bulles de couleur et regroupés suivant différentes catégories correspondant aux thèmes développés dans l'article. Hors cartographie, les informations utilisées pour la rédaction de cet article ont été collectées sur une période de 7 mois, entre mai et novembre 2020.

Les tendances en matière de recherche scientifique ont été obtenues par l'analyse de près de 39 000 publications scientifiques publiées entre 2015 et 2020.

### 1.2 Définition du concept de « fabrication additive »

La norme NF EN ISO/ASTM 52900 définit la fabrication additive de la façon suivante :

« Ensemble des procédés consistant à assembler des matériaux pour fabriquer des pièces à partir des données des modèles en 3D, en général couche après couche »

Ainsi, les technologies de fabrication additive, ou impression 3D, sont à distinguer des méthodes de fabrication soustractive (usinage) et de mise en forme (forgeage, pliage, moulage, injection, etc.). [BM 7 017]

#### 1.2.1 Un peu d'histoire

L'ère de la fabrication additive moderne commence avec la stéréolithographie, une invention française de l'équipe du chercheur CNRS Jean-Claude André, brevetée en 1984 pour le compte de Cilas-Alcatel. [1] [AG 115]

Depuis 1984, ces technologies n'ont cessé d'évoluer, jusqu'à l'explosion des projets d'imprimantes domestiques « open source » qui ont contribué à populariser le terme d'impression 3D à partir de 2006 auprès de « makers » passionnés, puis du grand public. Voici quelques dates clés [2] :

- 1984 : premiers brevets concernant la stéréolithographie (SLA) [BM 7 910]. Invention du célèbre format de fichier « .stl » ;
- 1987 : invention du procédé de frittage laser sélectif (SLS) par l'entreprise DTM corp ;
- 1988 : lancement de la première machine par dépôt de fil fondu (FDM) par la société américaine Stratasys ;
- 1995 : naissance de la technologie d'impression 3D métallique DMLS, dérivée du frittage laser sélectif ;
- 2004-2006 : premier projet d'imprimante 3D open source : le projet « RepRap », à la base de la plupart des imprimantes 3D FDM grand public actuelles ;
- 2011 : premiers projets d'impression 3D alimentaire : impression 3D de sucre, puis de chocolat (2012) ;
- 2015 : changement d'échelle : la société chinoise Win Su s'attaque au secteur de la construction en fabriquant un immeuble de 5 étages par impression 3D.

#### 1.2.2 Les technologies disponibles

Véritable domaine à part entière, la fabrication additive regroupe à présent des dizaines de procédés, répartis en plusieurs familles, selon les matériaux, les sources d'énergie et les technologies utilisées.

La norme NF ISO 17296-2 a ainsi établi une classification en sept catégories :

- projection de liant / *Binder Jetting* (BJ) ;
- dépôt de matière sous énergie concentrée / *Direct Energy Deposition* (DED) ;
- extrusion de matière / *Material Extrusion* (ME) ;
- projection de matière / *Material Jetting* (MJ) ;
- fusion sur lit de poudre / *Powder Bed Fusion* (PBF) ;
- stratification de couches / *Sheet Lamination* (SL) ;
- photopolymérisation en cuve / *Vat Photopolymerization* (VP).

Néanmoins, les procédés de fabrication additive ne cessent d'évoluer : parmi ces 7 catégories, on dénombre à l'heure actuelle au moins une quinzaine de familles de procédés déjà industrialisés

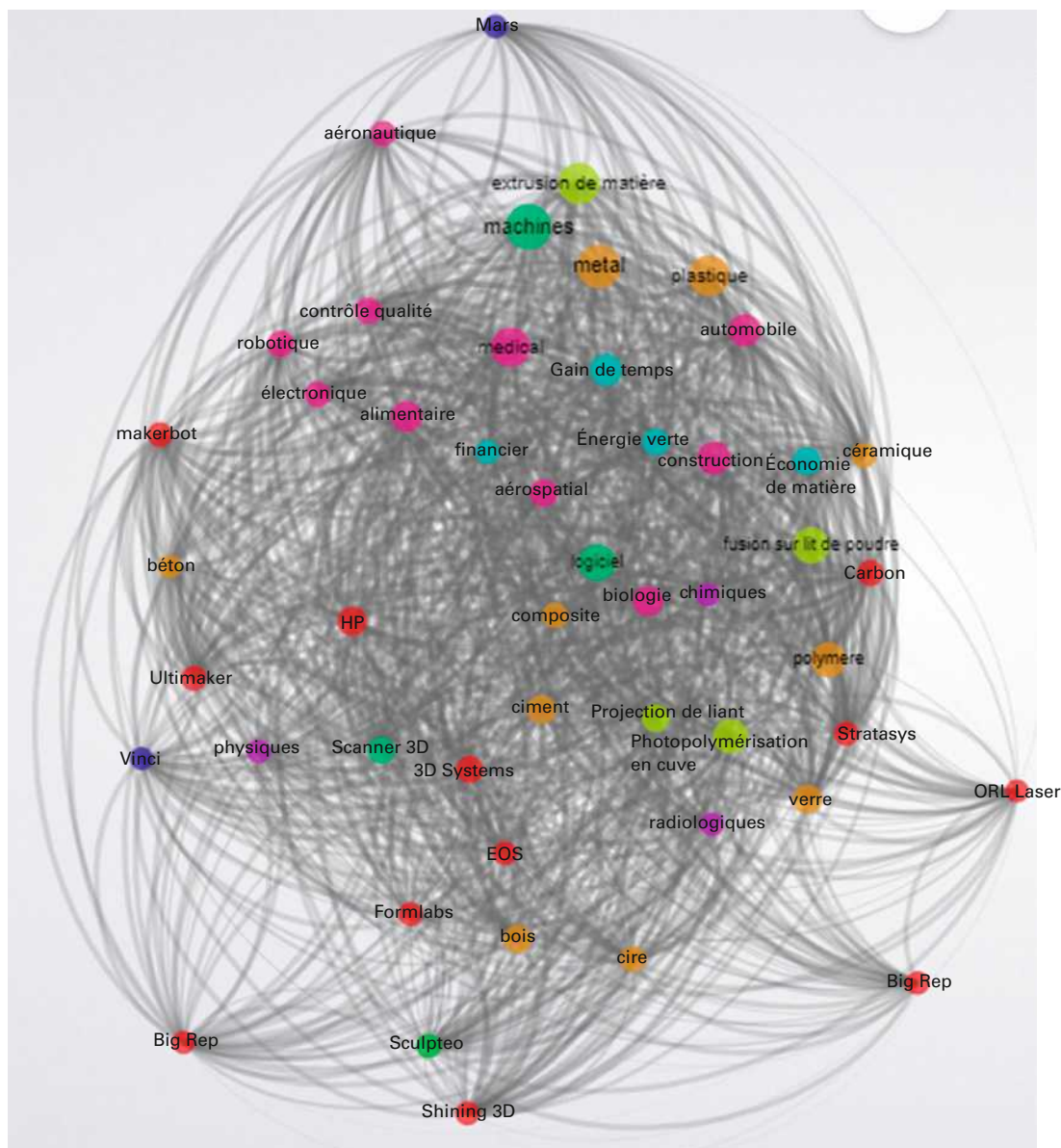


Figure 1 – Vue d'ensemble de la cartographie

et un grand nombre d'autres techniques qui sont toujours de l'ordre de la recherche ou du développement (cf. figure 2).

### 1.2.3 Les technologies les plus utilisées

Certaines des technologies présentées à la figure 2 sont couramment utilisées alors que d'autres sont réservées à des marchés de niche ou sont encore en devenir [BM 7 970].

À l'heure actuelle, les technologies les plus courantes sont :

- la fusion sur lit de poudre (frittage laser SLS pour les polymères et DMLS pour les métaux), pour les volumes de production en série (cf. figure 3) ;
- l'extrusion de matière FDM, principalement pour la validation des concepts ;

– la stéréolithographie (SLA) par photopolymérisation d'une résine liquide, pour de nombreuses applications qui demandent de la précision (bijouterie, dentisterie, etc.) ;

### 1.3 Le marché de la fabrication additive

Avec 2,1 millions d'entreprises et plus de 2 millions d'emplois en Europe, le secteur manufacturier représentait 16 % du PIB européen en 2018. Ce secteur de poids a longtemps considéré la fabrication additive uniquement comme une solution de prototypage. Bien que la fabrication additive soit toujours une niche, elle commence à intégrer les différentes étapes des processus de production.

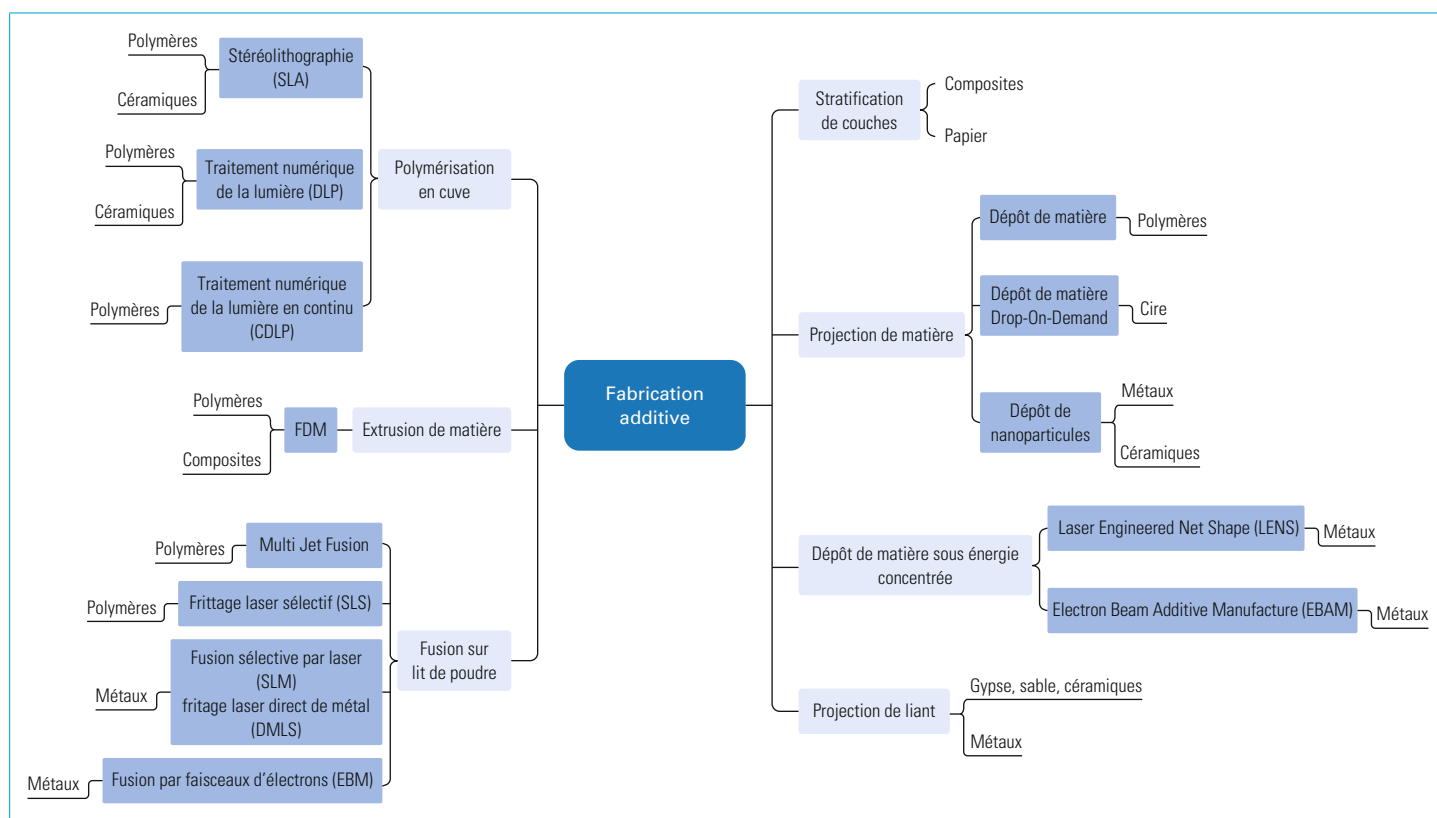


Figure 2 – Les procédés de fabrication additive sont répartis en sept catégories

En effet, il semble que les technologies de fabrication additive arrivent à maturité, car certains freins à son adoption sont déjà levés. C'est le cas de l'offre en matériaux disponibles qui se développe et se diversifie, grâce à de nombreux partenariats entre industriels et fabricants de machines. [3]

Le marché économique mondial de la fabrication additive est dorénavant florissant : il génère plusieurs dizaines de milliards d'euros par an et concerne tous les secteurs d'activité, aussi bien pour des applications ludiques domestiques que pour du prototypage ou de la production industrielle de pointe. [BM 7 975]

### 1.3.1 Le marché florissant des matériaux pour l'impression 3D

L'utilisation des technologies de fabrication additive pour des applications industrielles nécessite de disposer de matériaux conformes à chaque secteur ou spécifiquement développés.

Fort heureusement, l'offre en matériaux pour la fabrication additive ne cesse de se diversifier depuis quelques années, sous l'impulsion des donneurs d'ordre et dans un contexte favorable au développement de ces technologies. Ainsi, selon le rapport Wohlers 2019, le secteur des matériaux a connu en 2018 une croissance record, en grande partie assurée par la vente de métaux (+ 41,9 %) et de poudres polymères. [4]

Les besoins industriels ont donc permis d'élargir considérablement le catalogue des matériaux disponibles, comme le montre la figure 4.

#### ■ Les polymères

Ce sont toujours les matériaux les plus couramment utilisés. Le marché industriel est dominé par des polymères de haute performance :

- l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), solide, durable et peu coûteux ;

- le polyamide (PA, ou Nylon), très résistant, mais beaucoup plus cher que l'ABS ;
- le polycarbonate (PC), léger, très résistant aux chocs. On peut le renforcer avec des fibres.

#### ■ Métaux et alliages

Voici quelques exemples de matériaux métalliques disponibles en fabrication additive :

- base fer : aciers inoxydables, acier Maraging ;
- base aluminium : alliage Scamallo (aluminium-magnesium-scandium) pour la formule 1 ;
- base nickel : Inconel, Hastelloy ;
- base titane : titane pur ou alliages Ti6Al4V (Ta6V) ;
- base cobalt-chrome ;
- base cuivre.

#### ■ Céramiques

Les matériaux céramiques se développent également, pour des applications industrielles spécifiques, mais aussi pour le biomédical ou le secteur du luxe. À Limoges, l'entreprise 3DCeram conçoit des machines d'impression 3D céramiques SLA et fabrique également des poudres céramiques [5] [N 4 807] :

- base Alumine ;
- base Zircone ;
- Nitrures (AlN, Si3N4) ;
- base silice (Silicore) ;
- Hydroxyapatite (HAP) : applications biomédicales ;
- cordierite.

#### ■ Composites

Le développement de nouveaux matériaux pour l'impression 3D ne s'arrête pas aux monomatériaux. Les composites sont désormais





**Figure 3 – Fusion sur lit de poudre, extrusion de matière et photopolymérisation en cuve sont les trois principales familles de procédés utilisés en fabrication additive**

d'actualité et là aussi les gammes de matériaux sont en évolution constante :

- matériaux renforcés fibres de carbone, de verre ou d'aramide (Kevlar) ;
- polymères additivés de charges minérales ;
- ajout de fibres de bois ;

Le catalogue complet est bien entendu beaucoup plus vaste. Le tableau 1 [6] présente une liste non exhaustive des matériaux utilisables selon les technologies.

### 1.3.2 Quelle croissance future

Le marché actuel de la fabrication additive est en forte croissance : **plus de 20 % par an et ce n'est pas près de s'arrêter.** [BM 7 975]

Chaque année, le cabinet indépendant Wohlers Associates Inc. publie un panorama complet sur le secteur de la fabrication additive. Selon le rapport Wohlers 2020, l'impression 3D dans le domaine dentaire devrait atteindre 930 millions de dollars d'ici fin 2025, ce qui représente **un taux de croissance annuel de 17 %**. [7]

Certaines analyses parlent d'un taux de croissance annuel composé (CAGR) de 24 %. **Le marché global devrait ainsi atteindre 35 milliards de dollars en 2024 et doubler en taille tous les 3 ans environ.** [8]

## 1.4 Les enjeux de la fabrication additive

Les technologies de fabrication avancées, dont font partie les procédés de fabrication additive, sont considérées comme un moyen

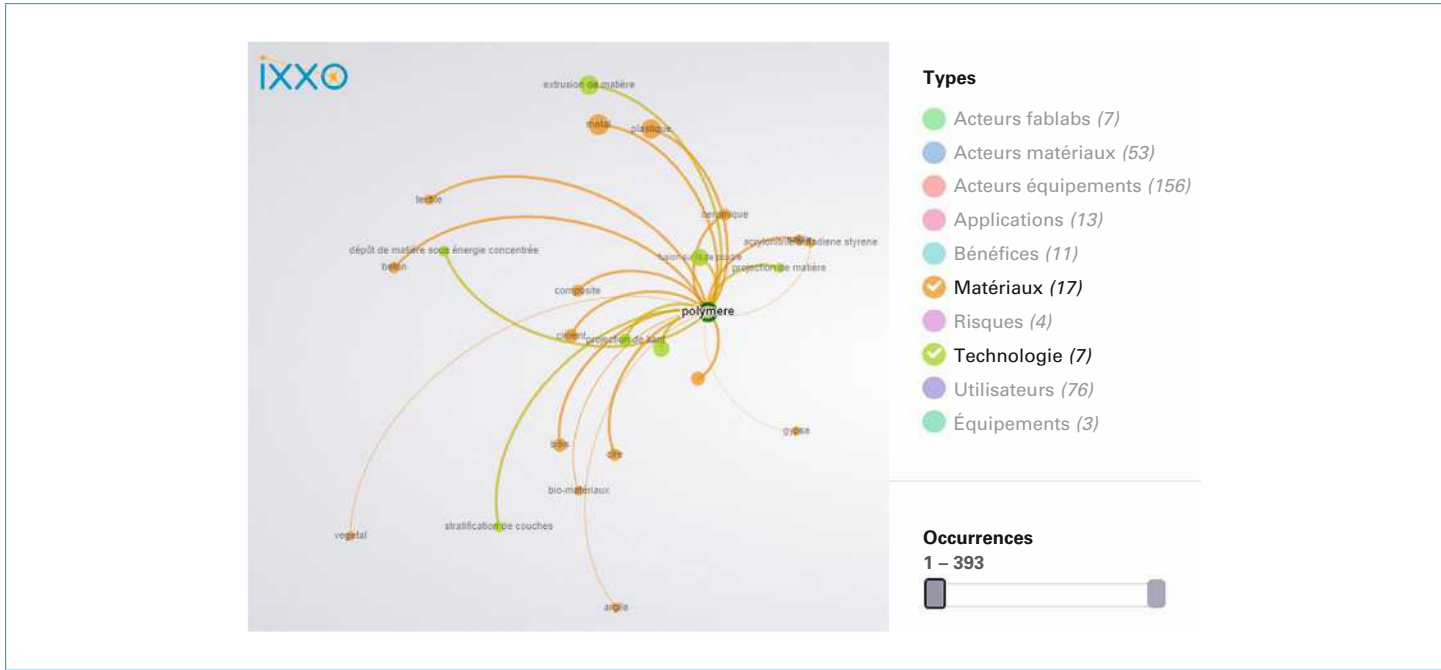


Figure 4 – Les matériaux de la fabrication additive

Tableau 1 – Différents types de matériaux utilisables en fabrication additive (liste non exhaustive)		
PROCESSUS	TECHNOLOGIES	MATÉRIAUX
Jet de liant	Lit de poudres et tête d'impression à jet d'encre	Poudres de céramique, stratifiés en métal, acrylique, sable, composites, polymères, mélanges de polymères
	Impression 3D plâtre	Plâtre, composites de plâtre
Dépôt d'énergie dirigée	Dépôt métallique par laser	Métaux et alliages métalliques, métaux hybrides
Extrusion de matériau	Modélisation par dépôt de matière fondue	Thermoplastiques, polymères, mélanges de polymères
Jet de matériau	Modélisation à jets multiples	Photopolymères, cire, composites
Fusion de lit de poudres	Fusion par faisceaux d'électrons	Poudre de titane, cobalt-chrome
	Frittage thermique sélectif	Poudre thermoplastique
	Frittage sélectif par laser	Plastique, métal, papier, verre, céramique, composites
	Frittage laser direct du métal	Acier inoxydable, cobalt-chrome, alliage de nickel
Laminage de feuilles	Fabrication d'objets laminés	Plastique, métal, papiers stratifiés, céramiques, composites
	Consolidation par ultrasons	Métaux et alliages métalliques
Polymérisation en cuve	Stéréolithographie	Liquide photopolymère, composites
	Traitement numérique de la lumière	Photopolymère liquide

d'améliorer à la fois la productivité industrielle et l'efficacité énergétique des industries européennes. [9]

### Encadré 1 – Fabrication additive : un des nombreux outils de l'industrie 4.0

En 2015, le gouvernement français a lancé le programme national Alliance Industrie du Futur afin de préparer la transition des industriels vers l'industrie 4.0. L'objectif ? Accompagner la transformation numérique des entreprises industrielles et moderniser leur outil de production.

La fabrication additive est une technologie phare de l'industrie 4.0, car les enjeux attendus sont grands (cf. tableau 2) [AG 8 002].

#### 1.4.1 Réactivité, agilité et personnalisation

Les technologies de fabrication additive ont un atout formidable : elles permettent de réaliser des pièces fonctionnelles à la demande, indépendamment de leur complexité. Cette caractéristique rend possible la réalisation de toutes sortes de pièces (métalliques, plastiques, céramiques) avec une réactivité inégalée.

La fabrication additive a ainsi montré tout son potentiel, lors de la crise sanitaire causée par le COVID-19, au printemps 2020. Tous les possesseurs d'imprimantes 3D à travers le monde, qu'ils soient industriels ou particuliers, ont ainsi pu participer à différentes actions spontanées pour pallier à la pénurie de matériel dont dispose le personnel soignant. Voici quelques exemples de pièces emblématiques imprimées durant cette période :

- supports de visières, par FDM ;
- adaptateurs pour masques Décathlon ;
- valve de rechange pour respirateurs ;
- masques de protection ;

**Tableau 2 – Les principaux enjeux de la fabrication additive pour les industriels**

Enjeux de la FA attendus	Enjeux industriels finaux
Raccourcir les cycles de développement de pièces	Accélérer la mise sur le marché
Augmenter la complexité des géométries de pièces	Maximiser la performance des appareils
Minimiser les opérations d'assemblage (soudure, etc.)	Améliorer la fiabilité
Réduire la quantité de matière utilisée	Réduire la consommation de carburant et l'impact environnemental
	Réduction des coûts d'usinage (outillage, traitement des déchets, perte de matière)
Fabrication de pièces à la demande	Réduction des coûts (stockage, obsolescence)
	Réactivité/ flexibilité/ personnalisation
Contrôle des paramètres métallurgiques en cours d'élaboration	Réduire les coûts de contrôle qualité en aval pour diminuer le coût unitaire des pièces

Par ailleurs, dans cette situation d'urgence, certaines solutions contraignantes sur le plan réglementaire ont même été validées par la communauté scientifique.

C'est par **exemple** le cas d'une résine imprimable souple et biocompatible pour la fabrication d'écouvillons nasaux. [10]

Convaincue du potentiel incroyable de l'impression 3D pour faire face aux urgences de production, l'Assistance Publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP) a ainsi accepté, en pleine crise COVID, l'installation d'une soixantaine d'imprimantes 3D (financées par des dons de géants du luxe). **En 24 heures, l'AP-HP est ainsi devenue la plus grosse structure 3D hospitalière au monde.** Grâce à cette ferme d'imprimantes 3D, les médecins sont dorénavant en mesure d'imprimer toutes sortes de pièces de rechange, en éliminant les délais de commande et de livraison et à un coût très faible (Cf. figure 5). [11]

#### 1.4.2 Les enjeux en faveur du développement durable

Depuis 2010, le développement des procédés de fabrication additive n'a cessé de s'accélérer, tout comme le nombre d'acteurs du domaine. Naturellement, des questions environnementales sont apparues. La fabrication additive est-elle synonyme de développement durable? En réalité, il n'existe pas de réponse simple à cette question, tant les procédés, les matières premières utilisées et les applications sont variés.

Néanmoins, pour trancher ces questions environnementales, il faut penser de manière globale. Le seul outil valable pour quantifier les impacts environnementaux de manière globale est l'analyse de cycle de vie (ACV). Or il existe peu d'études ACV qui analysent les impacts environnementaux des procédés de fabrication additive et ces études sont souvent incomplètes. En effet, la majorité des articles publiés sont focalisés sur la phase de production (d'impression), sans tenir compte de la transformation de la matière première, ou des étapes de post-process et de finition [12], souvent par manque d'information, de temps ou de moyens. Par ailleurs, il devient également primordial d'intégrer les autres aspects du développement durable dans ces études, c'est-à-dire les dimensions économiques et sociales.

Néanmoins, voici quelques éléments qui semblent aller dans le sens d'un impact positif de la fabrication additive (cf. figure 6 et 7) :

- par rapport à la fabrication soustractive, la fabrication additive permettrait de réduire la quantité de matière première utilisée ;
- pour la fabrication sur lit de poudre, les poudres non consommées sont réutilisables ;
- les déchets thermoplastiques utilisés en FDM peuvent être recyclés par broyage et extrusion pour former de nouvelles bobines de fil, directement sur site [BM 7 975] ;
- possibilité d'intégrer des matériaux recyclés, compostables, des bioplastiques, etc. ;
- l'impression 3D permet de réaliser des pièces en petites séries, ou sur demande, ce qui change la manière de consommer, en réduisant le gaspillage ;
- l'impression 3D présente un intérêt extrêmement fort pour l'économie circulaire, car elle encourage la réparation et la remise à neuf de produits [13] ;
- la fabrication additive permet de produire des matières plastiques « sur site », ce qui réduit l'impact environnemental du transport.

#### 1.5 Les freins et défis associés

Jusqu'à il y a peu, la disponibilité des machines et des matériaux pour la fabrication additive était un frein au développement industriel de ces technologies. Ce n'est plus le cas aujourd'hui,



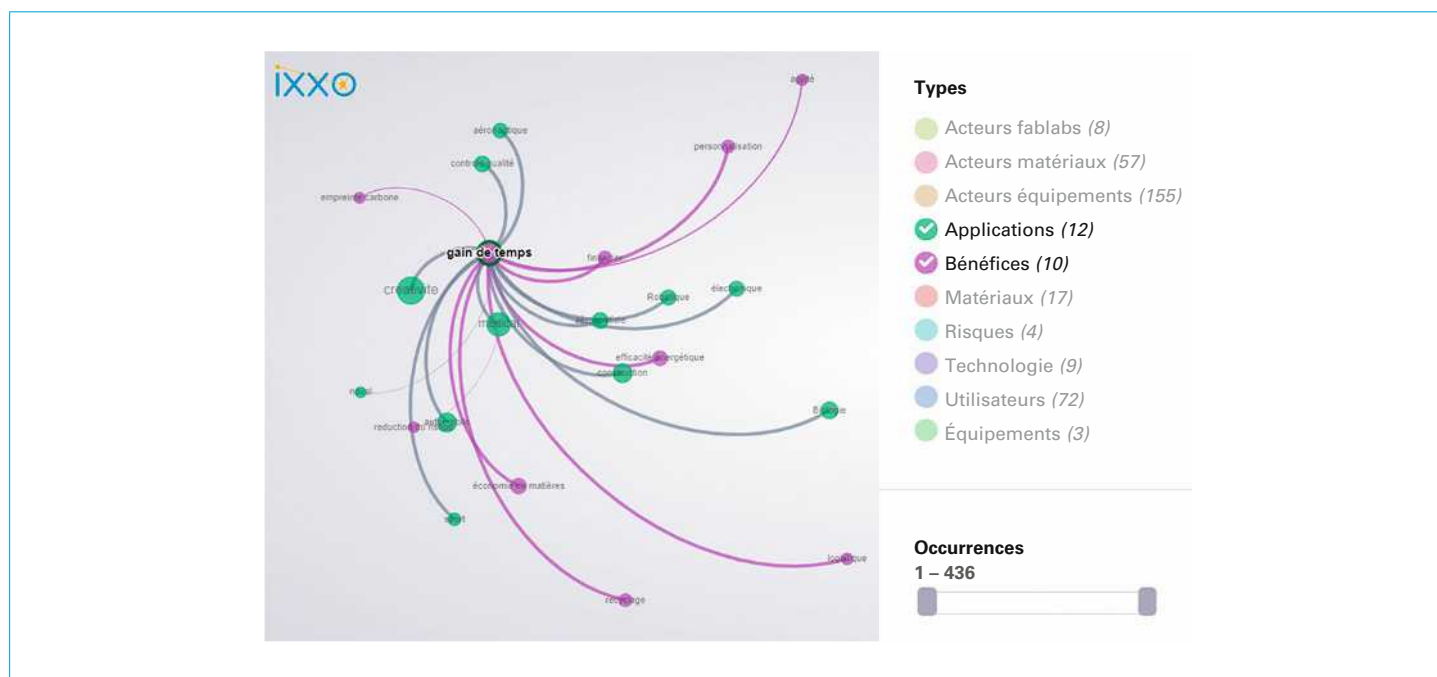


Figure 5 – Gain de temps, économie de matière et personnalisation sont trois avantages de la fabrication additive

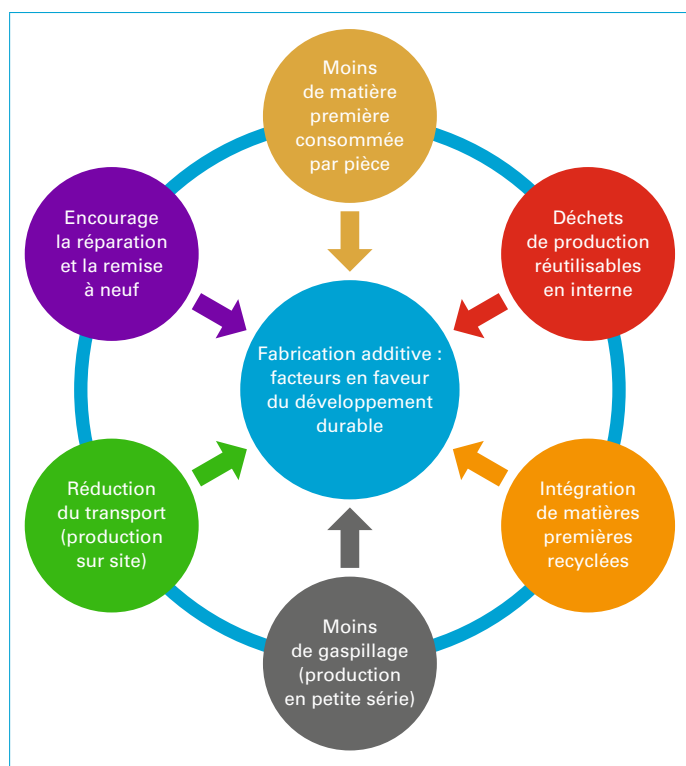


Figure 6 – Fabrication additive : éléments en faveur du développement durable

grâce à la mobilisation des industriels, des fournisseurs de matériel et à la dynamique de forte croissance de ce marché nouveau. [BM 7 940]

Il reste cependant de nombreux défis à relever pour que ces technologies s'installent durablement dans l'industrie.

### 1.5.1 Le coût de fabrication

Le principal défaut de la fabrication additive est sa faible productivité, ce qui a tendance à augmenter les coûts de production. Ceci est d'autant plus vrai en fabrication additive métallique, car l'investissement machine et le prix des matériaux sont élevés. Par ailleurs, certains procédés nécessitent des post-traitements coûteux, voilà pourquoi il est important de bien choisir la technologie adaptée à son application. [14]

Ces problèmes de coûts cantonnent généralement la fabrication additive à la production de petites ou moyennes séries, souvent pour des pièces complexes à forte valeur ajoutée.

Néanmoins, il faut garder à l'esprit que ces technologies évoluent extrêmement vite. Ce qui est vrai aujourd'hui le sera probablement beaucoup moins dans 10 ans.

### 1.5.2 La complexité d'intégration

Aux yeux d'un industriel néophyte, la fabrication additive peut parfois être perçue de manière négative, en tant que procédé dont la complexité de mise en œuvre apparaît comme un frein. [3]

À l'instar de toutes les nouvelles technologies, les procédés de fabrication additive font peur, car leur maîtrise s'avère complexe, ce qui implique l'acquisition de nouvelles compétences.

Dans son guide intitulé « *Fabrication additive métallique – Les fondamentaux* », le centre technique des industries mécaniques (CETIM) conseille aux industriels de repenser leur projet depuis le départ, lorsqu'ils souhaitent lancer une production en fabrication additive et propose 4 axes de réflexion (cf. figure 8) [14].

La fabrication additive demande aux industriels un niveau d'implication élevé, et des investissements personnels et financiers. L'acquisition de nouvelles compétences est également primordiale, c'est pourquoi il est conseillé de se tourner vers des

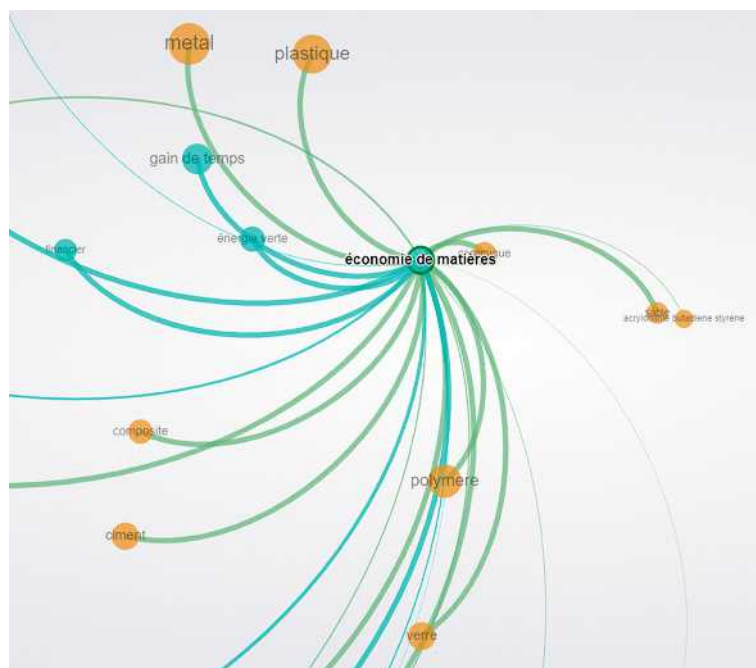


Figure 7 – La fabrication additive permet de fabriquer de petites séries et d'éviter le gaspillage de matière (extrait de la cartographie)

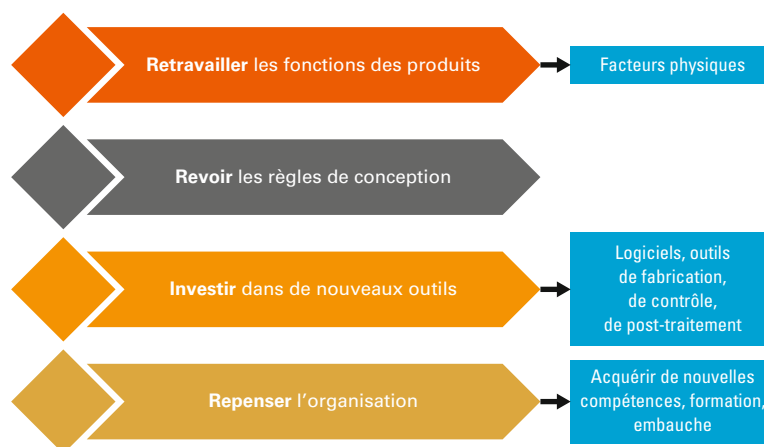


Figure 8 – 4 axes de réflexion autour de la fabrication additive pour les industriels qui veulent se lancer, d'après le CETIM

spécialistes indépendants afin de bien appréhender les tenants et aboutissants de ces technologies.

**Nota :** Disponible pour les membres du CETIM, <https://www.cetim.fr/mecatheque/Resultats-d-actionscollectives/Fabrication-Additive-Metallique-Les-fondamentaux-Version-francaise-et-anglaise>

### 1.5.3 Prévention des risques

Depuis leur apparition, les procédés de fabrication additive sont associés à tout un panel de risques, que l'INRS a identifiés et répertoriés dès 2013. [15]

#### Encadré 2 - Le cas des poudres métalliques

Selon leur taille ou leur nature, les poudres métalliques présentent des risques plus ou moins importants pour la santé des opérateurs. Ainsi, la taille des poudres utilisées en fabrication additive métallique est suffisamment fine pour conduire à des problèmes respiratoires. Par ailleurs, certains métaux comme le nickel ou les oxydes de chrome et de cobalt sont connus pour être cancérogènes.

**Encadré 2 - Le cas des poudres métalliques**

Ces poudres présentent également un risque d'incendie et d'explosion. [16]

Depuis le 15 juillet 2020, la norme XP E67-006 encadre désormais les questions HSE liées aux poudres métalliques pour la fabrication additive.

**■ Le risque chimique**

Les matériaux et produits utilisés en fabrication additive sont de nature très diverse (métaux, céramiques, solvants, résines, polymère, fibres, etc.). Par ailleurs, une vaste gamme d'additifs est utilisée par les fabricants pour renforcer certaines propriétés : le risque chimique est donc omniprésent (cf. figure 9). Ce risque existe à toutes les étapes :

- lors de la fabrication des produits et matériaux ;
- lors du transport ;
- pendant les phases de préparation des machines ;
- pendant l'élaboration des pièces ;
- lors des étapes de post-traitement ;

*Il est ainsi primordial de consulter les fiches de donnée sécurité (FDS) des produits utilisés en fabrication additive avant de les manipuler.*

**■ Le risque d'explosion**

Le risque d'explosion est omniprésent dans les atmosphères saturées en poudres et particules fines. C'est le cas des poudres métalliques, mais également des poussières de matières plastiques et même de bois.

Les machines doivent ainsi être ventilées, et l'accumulation de charges électrostatiques par les matières plastiques doit être évitée,

surtout dans les atmosphères explosives ou inflammables (dégagement de solvants, par exemple) (Cf. figure 10).

**■ Les risques liés aux machines**

La plupart des procédés de fabrication additive utilisent des sources d'énergie dans leur mise en œuvre. Ces sources d'énergie diverses présentent des risques qui leur sont propres et doivent être identifiés.

D'une manière générale, les sources d'énergie qui produisent de la chaleur constituent un risque de brûlure.

L'emploi de lasers, par exemple en SLS, présente également un risque de transmission des rayonnements optiques par les milieux oculaires ainsi qu'un risque de brûlure pour la peau (figure 11).

Par conséquent, pour garantir la sécurité des utilisateurs, l'INRS recommande d'accorder une importance particulière à l'analyse des risques. Les utilisateurs de machines doivent également veiller au maintien en état de conformité de leurs équipements afin d'assurer la sécurité du personnel ainsi que sa formation.

**1.5.4 Quels moyens de contrôle**

Pour répondre à des cahiers des charges aussi complexes et exigeants que ceux de l'aéronautique par exemple, la qualité des pièces produites par fabrication additive doit être irréprochable. Or, le caractère hétérogène des pièces obtenues par fabrication additive implique de quantifier les défauts internes (particules infondues, vides, etc.) qui peuvent apparaître localement.

Ainsi, il est primordial d'utiliser des moyens de contrôle fiables, capables de détecter les défauts présents sur l'ensemble d'une pièce (cf. figure 12). Les constructeurs de matériel de caractérisation sont sur le pied de guerre : de nouvelles machines de contrôle spécifiques à la fabrication additive sont ainsi apparues ces dernières années pour répondre à ces nouveaux besoins de caractérisation [BM 7 950].



**Figure 9 – Le risque chimique est omniprésent en fabrication additive (extrait de la cartographie)**

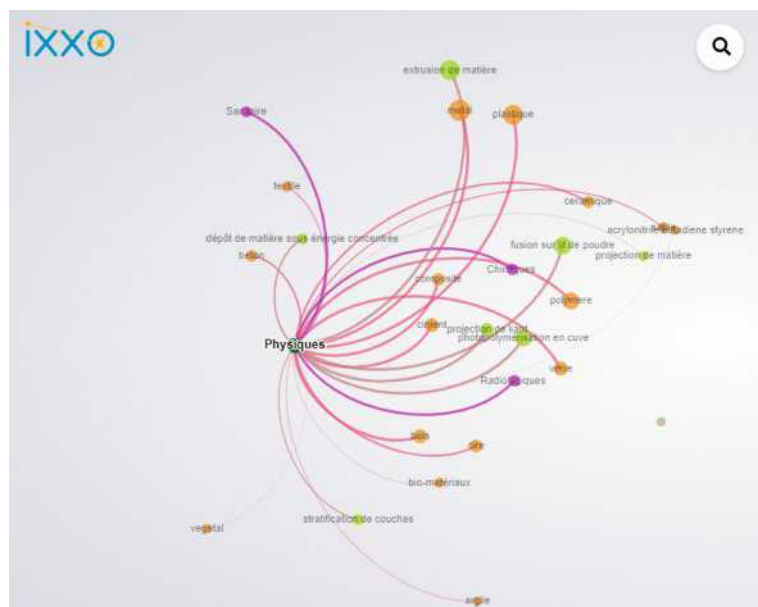


Figure 10 – Les risques physiques associés à la fabrication additive (extrait de la cartographie)

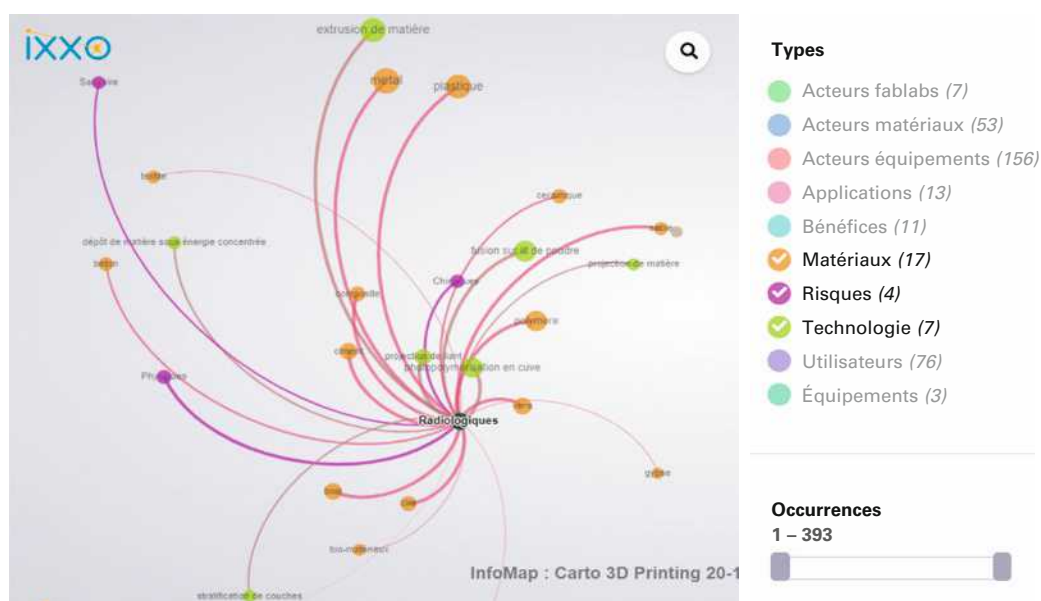


Figure 11 – Les risques radiologiques (liés notamment à l'utilisation des lasers) sont fréquents en fabrication additive... (extrait de la cartographie)

En combinant différentes modalités d'imagerie, le projet européen « MASHES » propose ainsi une approche révolutionnaire du contrôle des techniques de production utilisant des lasers. Estimation précise de la température et contrôle en temps réel font partie des bénéfices attendus [9].

### 1.5.5 Un besoin de standardisation et de certification

Si les contrôles qualité permettent de démontrer la présence ou non de défauts, leur utilisation industrielle nécessite une autre étape : la certification [17].

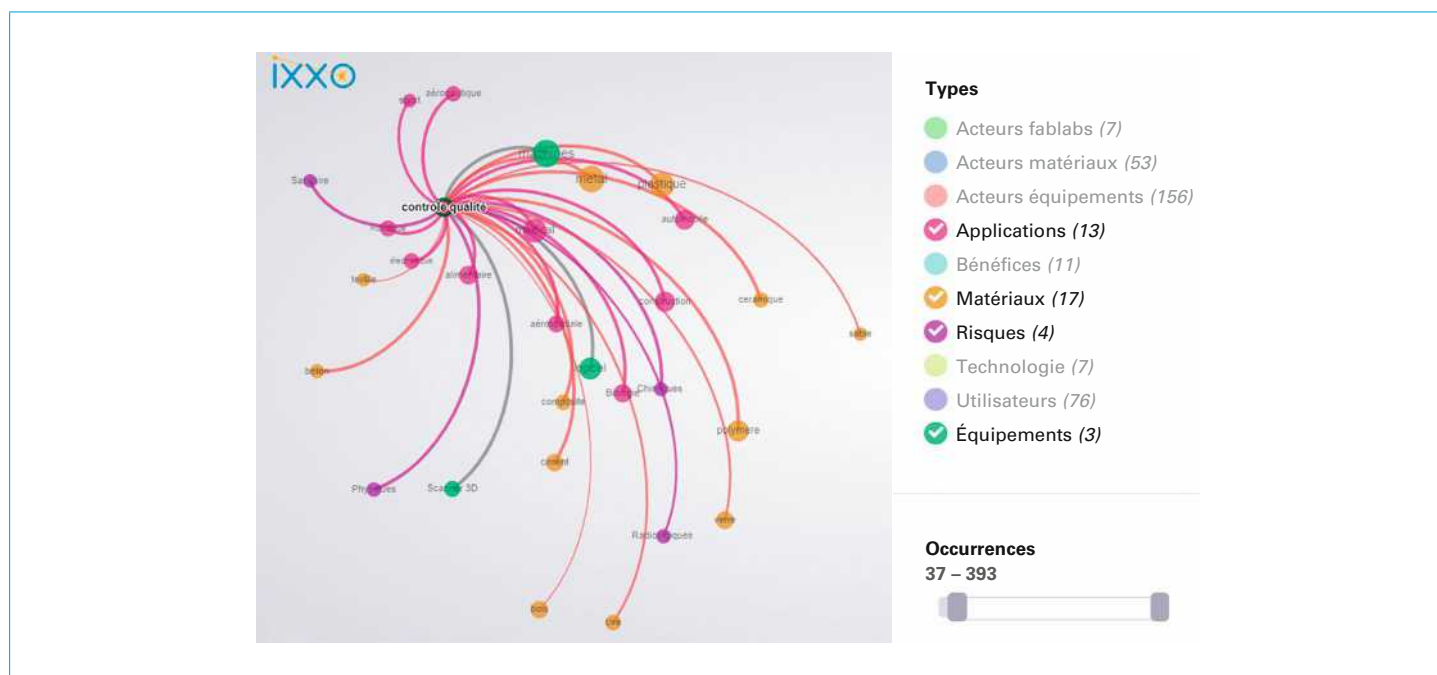


Figure 12 – Les problématiques de contrôle qualité concernent de nombreux secteurs (extrait de la cartographie)

D'une manière générale, les étapes de certification et de normalisation sont incontournables à une utilisation industrielle de la fabrication additive, surtout pour des domaines aussi exigeants que l'aéronautique, le spatial ou le médical. Les organismes de normalisation sont déjà à pied d'œuvre pour le développement de normes spécifiques aux matériaux pour la fabrication additive. Ainsi, l'ISO et l'ASTM ont signé un « plan conjoint pour le développement des normes en fabrication additive », dont voici quelques exemples (cf. tableau 3) [6].

Par ailleurs, il existe déjà des normes encadrant la caractérisation des poudres et des produits obtenus en fabrication additive.

Voici deux **exemples** :

- F3122-14 Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made *via* Additive Manufacturing Processes ;
- F3049 - 14 - Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes ;

Une liste plus détaillée des normes en fabrication additive est donnée, à titre indicatif, à la fin de cet article.

## 2. Fabrication additive : projets et acteurs

### 2.1 R & D et fabrication additive

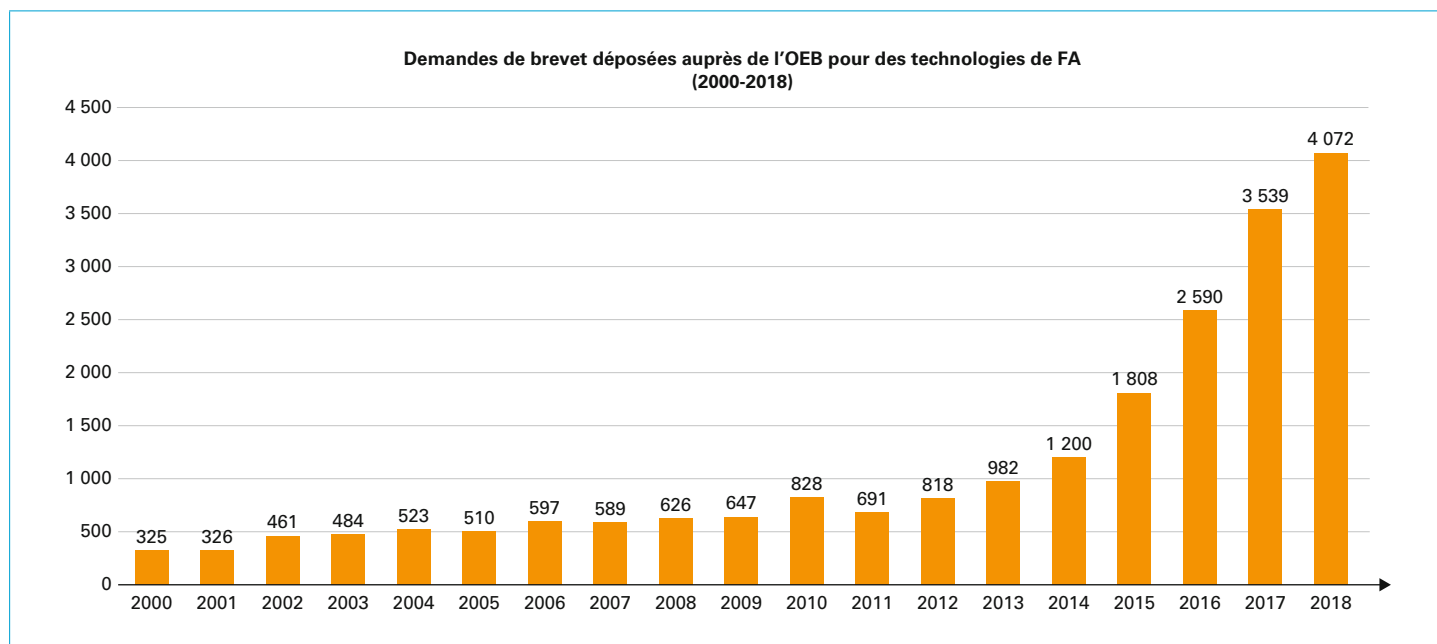
#### 2.1.1 Brevets au niveau Européen

Selon le rapport de l'office européen des brevets (OEB), intitulé « Brevets et fabrication additive – Tendances en matière de technologies d'impression 3D » : « **L'Europe et les États-Unis disposent d'une solide avance en matière d'innovation dans le domaine de la fabrication additive** ». En effet, entre 2010 et 2018, **47% des demandes de brevets** en matière de fabrication additive, déposées auprès de l'OEB provenaient d'inventeurs européens ou d'entreprises européennes, les États-Unis arrivant en seconde place avec 35 %.

Tableau 3 – Quelques normes encadrant la fabrication de poudres pour la fusion sur lit de poudre (PBF)

Normes	Matériaux concernés
<ul style="list-style-type: none"> <li>• F2924-14 Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion ;</li> <li>• F3001-14 Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion ;</li> </ul>	Poudre Ta6V
<ul style="list-style-type: none"> <li>• F3055 - 14 - Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion ;</li> <li>• F3056 - 14 - Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion ;</li> </ul>	Alliages de nickel
<ul style="list-style-type: none"> <li>• F3091/F3091M-14 Standard Specification for Powder Bed Fusion of Plastic Materials ;</li> </ul>	Poudres polymères
<ul style="list-style-type: none"> <li>• F3184-16 Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion ;</li> </ul>	Poudres d'acier inoxydable





**Figure 13 – Depuis 2015, la demande de brevets déposés auprès de l'OEB en fabrication additive explose (source : European Patent Office)**

On observe, par ailleurs, une progression fulgurante de l'innovation en fabrication additive entre 2015 et 2018 (cf. figure 13). L'OEB constate ainsi :

- une augmentation significative des demandes de brevets liés à la fabrication additive : + 36 % entre 2015 et 2018 ;
- que le secteur de la santé est celui qui génère le plus grand nombre de brevets. [18]

### 2.1.2 Brevets de classe internationale

Selon une étude du *Global Economic Dynamics (GED) project*, en 2019 les États-Unis arrivent largement en tête du nombre total de brevets de classe internationale déposés dans le domaine de la fabrication additive. L'Allemagne est en deuxième position, suivie du Japon et de la Chine. [19]

### 2.1.3 Thématiques de recherche scientifique

La recherche scientifique en fabrication additive se porte bien : chaque année, des milliers de publications scientifiques sont produites sur ces sujets. Une analyse par mots-clés permet de mettre en évidence que la biologie et le médical sont des domaines d'application au cœur des préoccupations des chercheurs, de même que les problématiques d'économie de matière et de sécurité (Cf. figure 14).

## 2.2 Exemples d'applications par secteurs

L'Europe fait figure de modèle en matière de soutien à la recherche et développement en fabrication additive. En effet, la Commission européenne, les états membres de l'UE et les institutions régionales apportent un soutien financier important au développement des technologies de fabrication additive. Ainsi, selon le rapport Wohlers 2020 [7] :

- l'UE finance des projets de recherche en fabrication additive depuis la fin des années 1980 ;
- l'UE a accordé plus de 320 millions d'euros de financement entre 2007 et 2019 ;
- la grande majorité des projets ont été financés dans le cadre d'Horizon 2020 ;

– Horizon 2020 sera suivi d'un nouveau programme Horizon Europe pour la période 2021-2027 ;

### 2.2.1 Aéronautique

Traditionnellement, les pièces métalliques complexes pour l'aéronautique sont réalisées par fabrication soustractive, autrement dit par usinage, ce qui génère énormément de déchets tout en consommant énormément de temps, d'énergie et d'argent, surtout dans le cas du titane.

La fabrication additive métallique apparaît comme une solution adaptée aux cadences de production de l'aéronautique et aux besoins de pièces à forte valeur ajoutée. Pour l'aéronautique, la fabrication additive est une aubaine, car elle permet de concevoir des pièces beaucoup plus légères et donc de faire des économies de carburant (Cf. figure 15). [20]

À titre d'exemple, l'optimisation de la géométrie d'une pièce charnière de nacelle pour l'A320 a permis de gagner 64 % en masse, soit 10 kg par avion ! [BM 7 940 v1]

### 2.2.2 Spatial

Cela fait déjà plusieurs années que des pièces conçues en fabrication additive sont présentes dans l'espace. En 2017, 45 satellites de télécommunications étaient mis en orbite. Ces satellites réalisés sous la maîtrise d'œuvre de Thales Alenia Space embarquaient tous des pièces obtenues par fabrication additive, par exemple des supports d'antenne en aluminium. [21] [BM 7 940]

Conquise par ces nouvelles technologies, Thales Alenia Space s'est ainsi lancée dans la fabrication additive en série. Les plateformes Spacebus Neo intègrent désormais des supports de roue imprimés en 3D. Selon entreprise, ceci lui a permis de répondre aux nouveaux besoins du marché [22] :

- en réduisant le coût de 10 % ;
- en gagnant 1 à 2 mois sur son planning fabrication ;
- par un gain de masse de 30 % ;
- une nette amélioration des performances ;

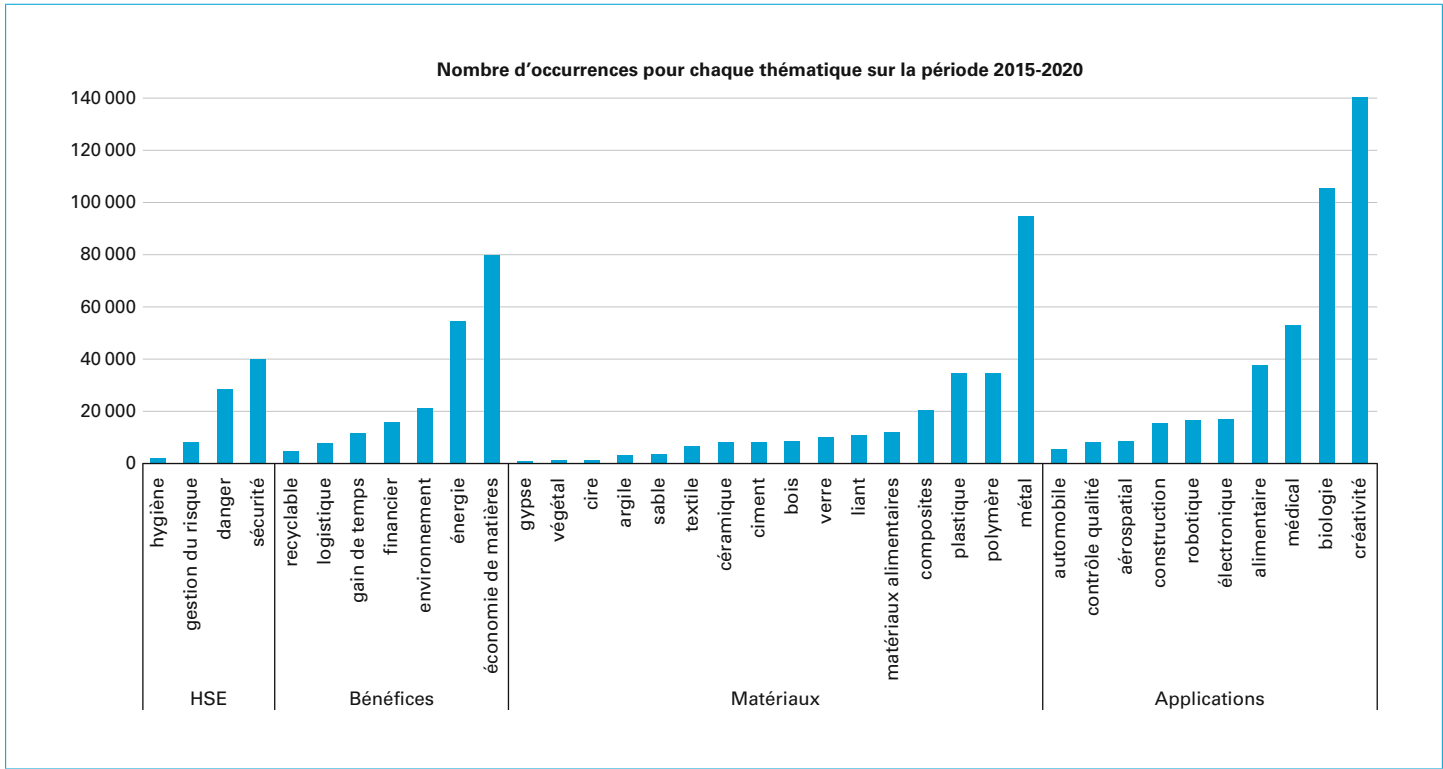


Figure 14 – Nombre total d'occurrences pour chaque thématique, détectées sur près de 39 000 publications scientifiques relevées entre 2015 et juin 2020 et abordant la fabrication additive (sources : MDPI, Springer, IEEExplore)

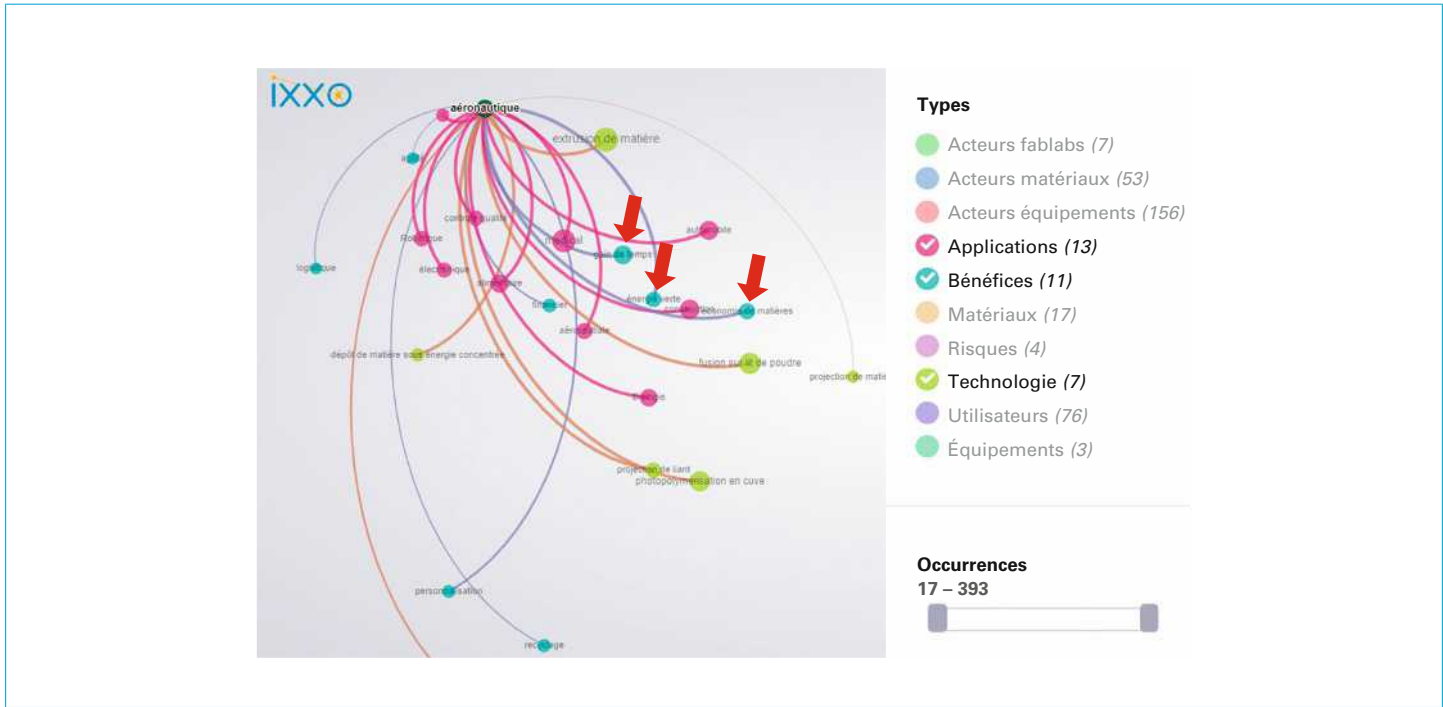


Figure 15 – On voit que les principaux bénéfices pour le secteur aéronautique sont le gain de temps et le gain d'énergie (énergie verte) et l'économie de matière.

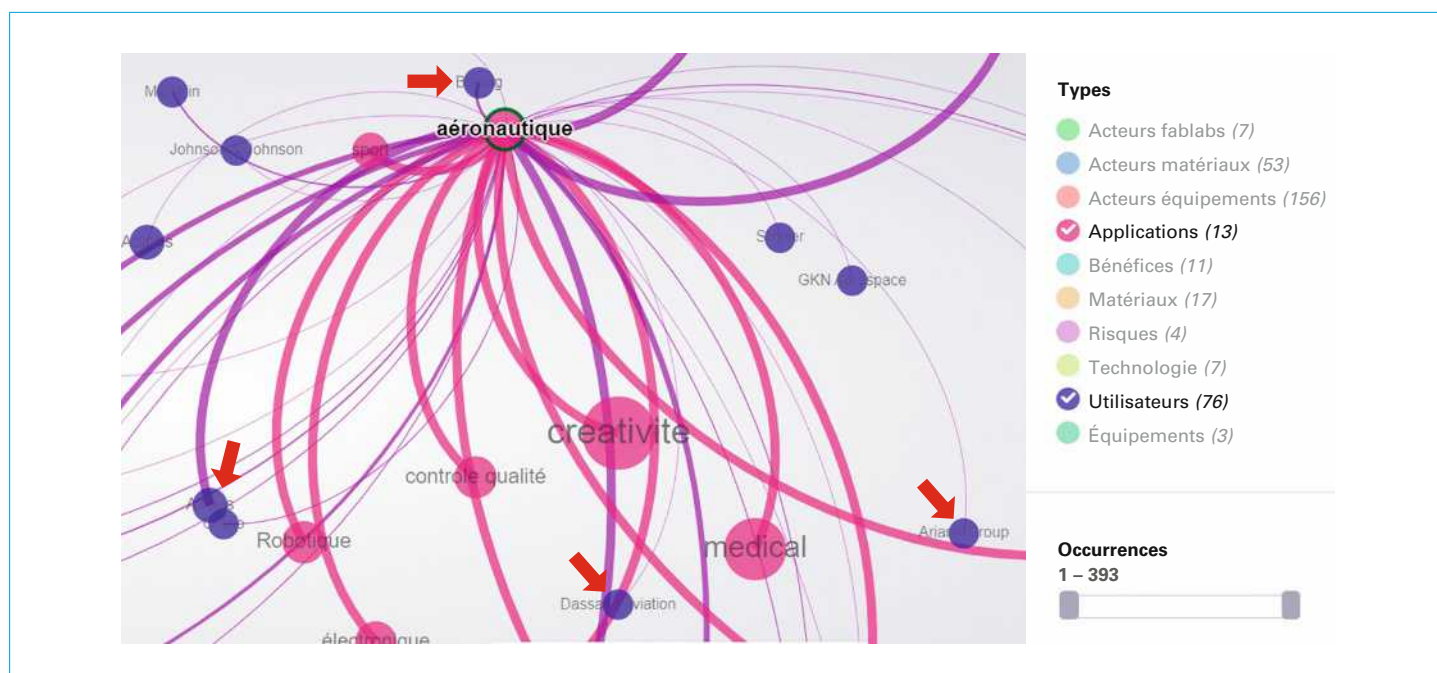


Figure 16 – Airbus, Thales, Dassault Aviation, Ariane Group... des grands noms de l'aéronautique utilisant la fabrication additive (extrait de la cartographie)

ArianeGroup travaille également depuis de nombreuses années sur la fabrication additive, ce qui lui a permis d'acquérir une grande expérience (cf. figure 16). Le réacteur réutilisable, à bas coût, Prometheus sera ainsi fabriqué en quasi-totalité par impression 3D. [23]

La fabrication additive est donc en train de prendre une place de premier plan dans le domaine spatial. Pour Ariane 6, 10 références de pièces conçues par fabrication additive ont déjà été qualifiées, alors que sur Ariane 5 une seule pièce était fabriquée par impression 3D (croix de cardan du moteur Vulcain 2). [24]

### 2.2.3 Automobile

Selon le cabinet d'études SmarTech Publishing, « en 2029, l'impression 3D automobile aura généré 9 milliards de revenus, seulement en ce qui concerne la production de pièces finales ». Le cabinet a ainsi mis en évidence que le groupe Volkswagen était celui qui avait le plus recours à l'impression 3D métal pour la conception de pièces finies et d'outillages.

Continental AG, l'un des principaux fabricants de pneus au monde est également un équipementier automobile qui possède son propre centre de compétences en conception et fabrication additive (AdaM). Continental utilise ainsi la fabrication additive thermoplastique au quotidien, aussi bien pour la fabrication de pièces finales que de prototypes ou d'outillages pour ses propres procédés de production (gabarits, fixations, etc.). La fabrication additive leur permet de fabriquer des pièces de rechange rapidement, à faible coût et ainsi de limiter les temps d'arrêt de production. [25]

### 2.2.4 Médical

En 2018, le médical représentait 11 % du marché de la fabrication additive. Plus de la moitié du chiffre d'affaires de l'impression 3D médicale a été généré par l'orthopédie. Le médical est ainsi, avec l'automobile et l'aéronautique, l'un des trois secteurs phares de la fabrication additive (cf. figure 17).

Pourquoi un tel engouement ? La première raison est la possibilité offerte par l'impression 3D de créer des solutions uniques

pour chaque patient, à un coût relativement faible par rapport aux procédés « traditionnels ».

Ainsi, à l'heure actuelle près de 100 % des prothèses auditives sont conçues par impression 3D et le même phénomène est en train de se produire dans le secteur dentaire. [26]

### 2.2.5 Transport ferroviaire

Alors que les réseaux de chemin de fer européens sont en pleine mutation, en 2018, le projet de modernisation des véhicules ferroviaires « Run2Rail » a été lancé, dans le cadre du programme européen « Shift2Rail ». La fabrication additive est présentée dans ce projet comme une solution permettant la production de pièces moins bruyantes, plus respectueuses de l'environnement et plus légères. [27]

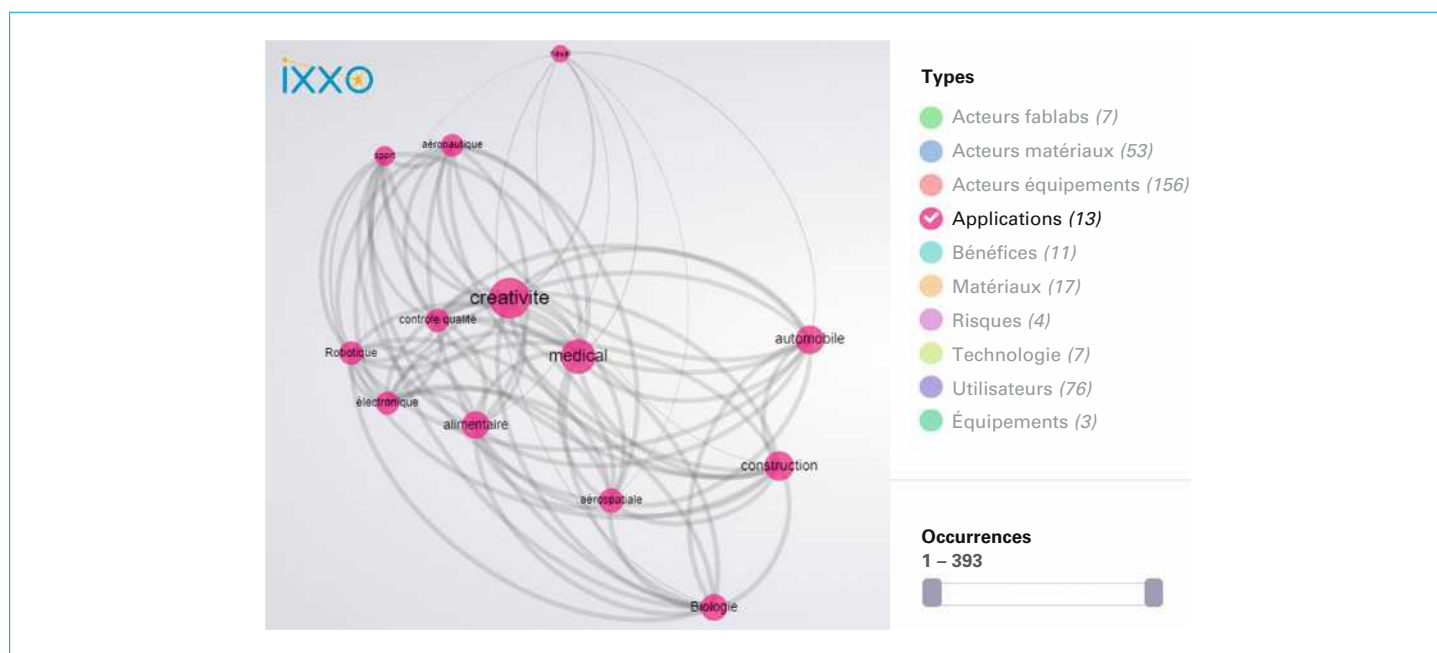
Par ailleurs, la production de pièces détachées par fabrication additive s'annonce comme un moyen de repenser la gestion des stocks et d'accélérer le remplacement des pièces endommagées, l'enjeu étant de limiter la durée d'immobilisation des trains.

Ainsi, l'équipementier Alstom investit depuis 2015 dans la fabrication additive, et pas seulement en fabrication additive métallique. Alstom travaille par exemple au développement d'un filament FDM dédiée au secteur ferroviaire et répondant à la norme feu/fumée EN45-545, en partenariat avec le chimiste français Armor. [28]

### 2.2.6 Construction et architecture

La fabrication additive ne se limite pas à l'industrie manufacturière ni aux machines de petite dimension. En effet, l'utilisation de la fabrication additive par le secteur de la construction est une réalité et la faisabilité de construire des bâtiments par impression 3D a été prouvée.

Ainsi, le projet HINDCON (Hybrid INDUSTRIAL CONstruction) concerne le développement de machines hybrides, capables de réaliser des structures en béton par fabrication additive et soustractive pour le secteur de la construction. [29]



**Figure 17 – Parmi les secteurs fortement impactés par le développement de la fabrication additive, on trouve le médical et la biologie (extrait de la cartographie)**

Très original, Constructions-3D est un projet à impact social et collaboratif, dont le but est de coupler les technologies d'impression 3D à l'utilisation de matériaux de proximité. Le principe est simple : l'ensemble du matériel d'impression 3D est livré sur le chantier dans un conteneur et déployé sur le site. Les porteurs du projet espèrent que ce système permettra la construction massive et rapide (une maison par jour) dans des lieux sinistrés par des catastrophes naturelles. [30]

#### Exemple

En France, c'est en 2018 que la première maison imprimée en 3D a vu le jour. Construite en 54 heures, dans le cadre du projet Bati-print3D, cette maison a un coût de 200 000 € : c'est environ 20 % de moins qu'une maison équivalente avec des méthodes traditionnelles.

Néanmoins, l'impression 3D pour la construction a ses propres défis, en lien avec les matériaux utilisés, les ciments épais, trop liquides ou contenant des cailloux trop gros étant difficiles à mettre en oeuvre, voire incompatibles avec le procédé d'extrusion. [13]

## 2.3 Niches applicatives porteuses

### 2.3.1 Bioprinting

L'impression de tissus pour le vivant est actuellement l'une des promesses les plus passionnantes de l'impression 3D, car elle permettra peut-être un jour d'imprimer des organes fonctionnels et de réduire les listes d'attente pour les greffes.

En attendant, les partenariats se développent et les innovations fleurissent, en voici quelques **exemples** [31] :

- partenariat Poietis/L'Oréal pour la création de cheveux par bio-impression laser de follicules capillaires [RE 268] ;
- impression inkjet de tissus humains fonctionnels pour réparer des organes comme le foie.

### 2.3.2 Impression 3D alimentaire

L'extrusion de matière est le procédé de mise en forme le plus polyvalent de l'impression 3D, car il permet aussi bien d'imprimer des plastiques ou du ciment que des pâtes alimentaires. Ainsi, le secteur alimentaire est lui aussi concerné par l'impression 3D : chocolat, pâte à pizza, fromage, gâteaux sablés, en sont quelques exemples. [13]

### 2.3.3 Autres niches

Les niches applicatives de l'impression 3D sont nombreuses et de nouvelles applications très techniques sont régulièrement présentées, souvent à l'initiative du monde de la recherche.

Voici quelques **exemples** [BM 7 970] :

- impression de matière programmable, ou impression 4D ;
- systèmes microfluidiques ;
- micro-actionneurs imprimés en 3D ;
- microélectronique ;
- microrobotique et robotique molle.

## 3. Intégrer la fabrication additive dans son industrie

### 3.1 Se faire aider par des organismes indépendants

Les technologies de fabrication additive étant nombreuses et les machines présentes sur le marché pas toujours totalement fiables, il est conseillé de se tourner en premier lieu vers des experts indépendants, qui n'ont pas de lien direct avec les fournisseurs de machines commerciales.

Pour se lancer dans la fabrication additive il est conseillé de se tourner vers des experts du domaine qui savent orienter vers la

technologie de fabrication additive qui convient à l'application en question. En voici quelques-uns.

#### ■ Le centre technique des industries mécaniques (CETIM)

Créé en 1965 à la demande des industriels de la mécanique, le CETIM est aussi l'une des références françaises en matière de fabrication additive. Le CETIM propose ainsi diverses formations et prestations d'accompagnement en fabrication additive.

Pour sauter le pas vers la fabrication additive, le CETIM propose à ses adhérents de télécharger l'ouvrage « Fabrication additive métallique : les fondamentaux ». Ce guide, réalisé par des experts scientifiques du CETIM et édité en partenariat avec les Éditions Techniques de l'Ingénieur fait le point sur les principales technologies disponibles et leurs applications.

<https://www.cetim.fr/mecatheque/Resultats-d-actions-collectives/Fabrication-Additive-Metallique-Les-fondamentaux-Version-francaise-et-anglaise>

#### ■ France Additive

France Additive est une association qui réunit l'ensemble de la filière impression 3D française. Les acteurs de la recherche, de l'industrie, de l'innovation, de la création ainsi que les start-ups qui y adhèrent mutualisent leurs compétences pour avancer ensemble.

<https://franceadditive.tech/>

#### ■ Le Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites (CT-IPC)

Ce centre technique spécialisé en plasturgie accompagne les industriels dans l'amélioration de leurs procédés de plasturgie, dans le but d'améliorer leur compétitivité. Comme tout centre technique résolument tourné vers l'innovation, CT IPC est un expert indépendant en fabrication additive polymère, métal et composite.

<https://ct-ipc.com/>

#### ■ Les instituts de recherche technologique (IRT)

Les IRT ont pour mission d'accélérer le développement et l'industrialisation, en permettant aux industriels d'investir dans des technologies émergentes.

Au moins quatre d'entre eux sont impliqués dans le développement de briques technologiques pour la fabrication additive :

- IRT Saint-Exupéry (Toulouse) ;
- IRT M2P (Metz) ;
- IRT Jules Verne (Nantes) ;
- IRT SystemX.

#### ■ Les Instituts Carnot

Les Instituts Carnot sont des structures de recherche publique labellisées par le ministère de la recherche. Ces 39 structures offrent un spectre de compétences très large et plusieurs d'entre elles sont impliquées activement en fabrication additive :

- Institut Carnot Cetim ;
- Institut Carnot Icél ;
- Institut Carnot CEA LIST ;
- Institut Carnot MINES ;
- Institut Carnot Ingénierie@Lyon ;
- Institut Carnot Mica.

<https://www.instituts-carnot.eu/fr/node/1792>

## 3.2 Les fabricants d'équipements et de matériaux

Les fabricants de machines et de matériaux pour la fabrication additive sont tellement nombreux qu'on ne peut en donner une liste exhaustive. Pour en découvrir quelques-uns, nous vous invitons à consulter la cartographie (cf. figure 18).

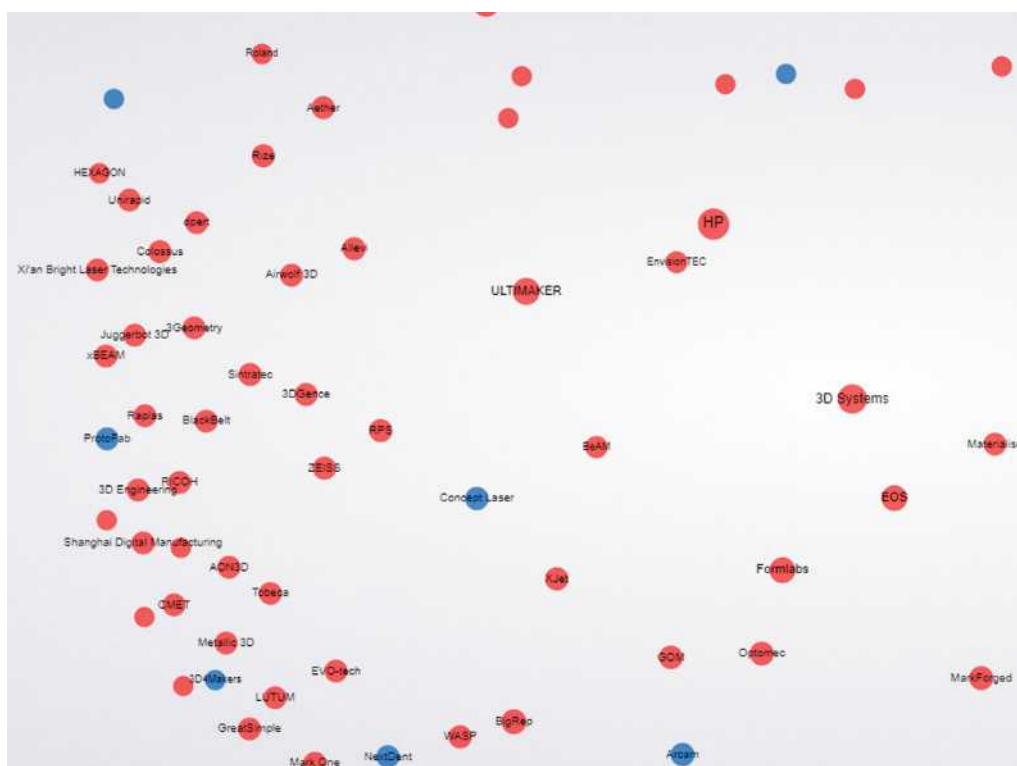


Figure 18 – Il existe des centaines de fabricants d'équipements (points rouges) pour la fabrication additive et des dizaines d'acteurs dans la fabrication de matériaux (points bleus) (extrait de la cartographie)



Tableau 4 – Principales normes et projets de normes en fabrication additive	
Référence de la norme	Titre
NF E 67-010	Fabrication additive – Poudre – Spécifications techniques
NF EN ISO 17296-2	Fabrication additive – Principes généraux – Partie 2 – Vue d’ensemble des catégories de procédés et des matières premières
NF EN ISO 17296-3	Fabrication additive – Principes généraux – Partie 3 – Principales caractéristiques et méthodes d’essai correspondantes
NF EN ISO 17296-4	Fabrication additive – Principes généraux – Partie 4 – Vue d’ensemble des échanges de données
NF EN ISO/ASTM 52900	Fabrication additive – Principes généraux – Terminologie
NF EN ISO/ASTM 52901	Fabrication additive – Principes généraux – Exigences pour l’achat des pièces
NF EN ISO/ASTM 52915	Spécification normalisée pour le format de fichier pour la fabrication additive (AMF) Version 1.2
NF EN ISO/ASTM 52921	Terminologie normalisée pour la fabrication additive – Systèmes de coordonnées et méthodes d’essai
EN ISO/ASTM 52910	Fabrication additive – Conception – Exigences, lignes directrices et recommandations
XP E 67-006	Fabrication additive – Guide de sécurité, hygiène et environnement – Exigences liées aux matériaux métalliques
EN ISO/ASTM 52902	Fabrication additive – Pièces types d’essais – Ligne directrice normalisée pour l’évaluation de la capacité géométrique des systèmes de fabrication additive
EN ISO/ASTM 52907	Fabrication additive – Spécifications techniques sur les poudres métalliques
EN ISO/ASTM 52911-1	Fabrication additive – Lignes directrices techniques de conception pour la fusion sur lit de poudre – Partie 1 : Fusion laser sur lit de poudre métallique
SO/ASTM DTR 52905	Fabrication additive – Principes généraux – Contrôle non destructif des produits obtenus par fabrication additive
XP E67-305	Fabrication additive – Particularités à respecter pour la fabrication d’un dispositif médical
EN ISO/ASTM 52911-2	Fabrication additive – Lignes directrices techniques de conception pour la fusion sur lit de poudre – Partie 2 : Fusion laser sur lit de poudre polymère
Normes en projet	
EN ISO/ASTM TR 52912	Technical Report for the Design of Functionally Graded Additive Manufactured Parts
EN ISO/ASTM 52903-2	Fabrication additive – Spécification normalisée pour la fabrication additive de matériaux plastiques à base d’extrusion – Partie 2 : Procédé – Équipement

3.3 Les normes

Voici quelques-unes des principales normes utilisées en fabrication additive (cf. tableau 4).

4. Conclusion

Trop longtemps considérée par les industriels comme une solution de niche, la fabrication additive a fait beaucoup de chemin depuis son apparition et entre désormais en phase de maturité.

On ne peut plus douter de l’avenir radieux de ces technologies, au regard des progrès qui ont été accomplis depuis 10 ans. Pour s’en convaincre, il suffit de regarder l’évolution du marché de la fabrication additive. Avec une croissance de plus de 20 % par an et un marché global qui devrait doubler tous les trois ans, la fabrication additive impacte quasiment tous les secteurs d’activité, tant en R & D qu’en production.

5. Acronymes et symboles

Acronyme	Signification
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
ACV	Analyse du cycle de vie CAGR
BJ	Projection de liant
CAGR	Taux de croissance annuel composé
CETIM	Centre Technique des Industries Mécaniques
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
DED	Dépôt de matière sous énergie concentrée

Acronyme	Signification
FA	Fabrication additive
FDM	Dépôt de fil fondu
HAP	Hydroxyapatite
HSE	Hygiène sécurité environnement
INRS	Institut national de recherche et de sécurité
KET	Technologies clés génériques

Acronyme	Signification
OEB	Office européen des brevets
PA	Polyamide
PC	Polycarbonate
SLA	Stéréolithographie
SLS	Frittage laser sélectif

# Fabrication additive : état des lieux d'une veille sectorielle et technologique

par **Arnaud MOIGN**

Ingénieur-Rédacteur

## Sources bibliographiques

- [1] TI. – *Les nouveaux défis de la fabrication additive*, Techniques de l'Ingénieur, 22 Novembre 2019. [En ligne]. Available: <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-nouveaux-defis-de-la-fabrication-additive-71380/>.
- [2] FABULOUS. – *L'impression 3D : son histoire pour une révolution en marche*, [En ligne]. Available: <https://www.fabulous.com.co/guide-impression-3d/en-bref/histoire>.
- [3] HEIDEN (P.). – *Pourquoi l'industrie manufacturière doit-elle adopter la fabrication additive*, 3 mars 2020. [En ligne]. Available: <https://www.alliancy.fr/expertise/industrie/2020/03/03/pourquoi-lindustrie-manufacturiere-doit-elle-adopter-la-fabrication-additive>.
- [4] MAGISTRELLI (G.). – *Les matériaux en fabrication additive : une croissance soutenue et solide*, 25 juin 2019. [En ligne]. Available: <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/toutes-industries/croissance-materiaux-fabrication-additive>.
- [5] 3DMIX, *céramiques pour impression 3D*, [En ligne]. Available: <https://3dceram.com/fr/ceramiques-pour-impression-3d/>.
- [6] MAGISTRELLI (G.). – *Les nouveaux matériaux en fabrication additive*, 26 Juin 2018. [En ligne]. Available: <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/toutes-industries/nouveaux-materiaux-fabrication-additive>.
- [7] LEFEVRE (G.). – *Le rapport Wohlers 2020 et la fabrication additive en Europe*, 14 avril 2020. [En ligne]. Available: <https://www.a3dm-magazine.fr/news/toutes-industries/rapport-wohlers-2020-fabrication-additive-europe>.
- [8] 3D HUBS. – *3D printing trends 2020 - Industry highlights and market trends*, 2020. [En ligne]. Available: [https://downloads.3dhubs.com/3D\\_printing\\_trends\\_report\\_2020.pdf](https://downloads.3dhubs.com/3D_printing_trends_report_2020.pdf).
- [9] MAGISTRELLI (G.). – *Les projets européens en fabrication additive*, 5 février 2018. [En ligne]. Available: <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/projets-rd/projets-europeens-fabrication-additive>.
- [10] Covid-19 : *Formlabs imprime en 3D 150 000 écouvillons nasaux par jour*, 31 mars 2020. [En ligne]. Available: <http://www.primante3d.com/ecouvillon-nasal-31032020/>.
- [11] *L'incroyable deuxième vie des imprimantes 3D des hôpitaux de Paris*, 30 juillet 2020. [En ligne]. Available: <https://www.leparisien.fr/economie/l-incroyable-deuxieme-vie-des-imprimantes-3d-des-hopitaux-de-paris-30-07-2020-8360835.php>.
- [12] KERBRAT (O.). – *Considérations environnementales dans la prédiction de performances des procédés de fabrication additive*, 28 mai 2019. [En ligne]. Available: <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/toutes-industries/impacts-environnementaux-de-fabrication-additive>.
- [13] BERCHON (M.). – *Le grand livre de l'impression 3D*, Eyrolles (2020).
- [14] CETIM. – *Fabrication additive métallique- Les fondamentaux*, Techniques de l'Ingénieur, (2019). [En ligne]. Available: <https://www.cetim.fr/mecatheque/Resultats-d-actions-collectives/Fabrication-Additive-Metallique-Les-fondamentaux-Version-francaise-et-anglaise>.
- [15] M. G. (INRS). – *Hygiène et sécurité du travail* - numéro 233, décembre 2013.
- [16] *L'INRS répond sur les risques liés à l'utilisation des poudres métalliques en fabrication additive*, 16 septembre 2019. [En ligne]. Available: <http://www.primante3d.com/securite-impression-3d-16092019/>.
- [17] MARION GARREAU (G.V.). – *Dans l'impression 3D, il y a un réel besoin de certification pour les pièces critiques, estime Anne-Françoise Obaton*, du LNE, 20 Mai 2020. [En ligne]. Available: <https://www.usinenouvelle.com/editorial/dans-l-impression-3d-il-y-a-un-reel-besoin-de-certification-pour-les-pieces-critiques-estime-anne-francoise-obaton-du-lne.N965281>.
- [18] *L'Europe, pôle mondial d'innovation en matière d'impression 3D*, 13 juillet 2020. [En ligne]. Available: [http://documents.epo.org/projects/babylon/eponet.nsf/0/C2F0871212671851C125859F0040BCCA/\\$FILE/additive\\_manufacturing\\_study\\_executive\\_summary\\_fr.pdf](http://documents.epo.org/projects/babylon/eponet.nsf/0/C2F0871212671851C125859F0040BCCA/$FILE/additive_manufacturing_study_executive_summary_fr.pdf).
- [19] BDTR et BREITINGER (J.C.). – *World class patents in cutting-edge technologies*, 2020. [En ligne]. Available: [https://www.bertelsmannstiftung.de/fileadmin/files/user\\_upload/BS-T\\_World\\_class\\_patents\\_2020\\_ENG.pdf](https://www.bertelsmannstiftung.de/fileadmin/files/user_upload/BS-T_World_class_patents_2020_ENG.pdf).
- [20] COUTO (A.). – *L'aéronautique est le premier de cordée dans la fabrication additive, pointe le directeur France d'EOS*, 10 juillet 2019. [En ligne]. Available: <https://www.industrie-techno.com/article/l-aeronautique-est-le-premier-de-cordee-dans-la-fabrication-additive-pointe-le-directeur-france-d-eos.56655>.
- [21] THALES. – *Une fabrication additive « additive », 15 janvier 2018*. [En ligne]. Available: <https://www.thalesgroup.com/fr/monde/espace/news/une-fabrication-additive-additive>.
- [22] THALES. – *Fabrication additive 3d : thales alenia space se lance dans la fabrication en série*, 21 mars 2019. [En ligne]. Available: <https://www.thalesgroup.com/fr/monde/espace/press-release/fabrication-additive-3d-thales-alenia-space-se-lance-fabrication-serie>.
- [23] THOUVEREZ (P.). – *Il nous paraît très probable que la réutilisation des lanceurs devienne la norme*, 28 août 2020. [En ligne]. Available: <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/prometheus-lanceurs-cnes-satellite-81791/>.
- [24] COUTO (A.). – *Sur la prochaine génération de moteurs-fusées, 50% de la valeur des pièces proviendra de la fabrication additive, lance Raphaël Salapète*, responsable R & D impression 3D chez ArianeGroup, 11 juin 2020. [En ligne]. Available: <https://www.industrie-techno.com/article/sur-la-prochaine-generation-de-moteurs-fusees-50-de-la-valeur-des-pieces-proviendra-de-la-fabrication-additive-lance-raphael-salapete-responsable-r-d-impression-3d-chez-arianegroup.60876>.
- [25] MOUSSION (A.). – *Continental accélère sa production automobile grâce à l'impression 3D*, 15 septembre 2020. [En ligne]. Available: <http://www.primante3d.com/continental-additive-15092020/>.
- [26] *Infographie : le marché de l'impression 3D médicale*, 19 Juin 2019. [En ligne]. Available: <http://www.primante3d.com/infographie-medecine-3d-19062019/>.
- [27] *Projet Run 2 Rail*, [En ligne]. Available: <http://www.run2rail.eu/Page.aspx?cat=HOME>.
- [28] MAGISTRELLI (G.). – *La fabrication additive sur de bons rails*, 25 février 2020. [En ligne]. Available: <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/toutes-industries/fabrication-additive-de-bons-rails>.
- [29] HINDCON. – *Hybrid industrial construction*, [En ligne]. Available: <http://www.hindcon3d.com/>.
- [30] C. 3D. – *Impression 3D appliquée à la construction et au bâtiment*, [En ligne]. Available: [http://www.machines-3d.com/nos-services-rd-pxl-66\\_73.html](http://www.machines-3d.com/nos-services-rd-pxl-66_73.html).
- [31] M. R. – *La bio-impression, futur de la médecine sur-mesure ?*, 7 Novembre 2019. [En ligne]. Available: <https://www.3dnatives.com/bio-impression-18052017/>.

[32] BIONIC AIRCRAFT. – *Bionic Aircraft Project*, [En ligne]. Available: Bionic Aircraft Project.

[33] A Y B A et RUSCHI MENDES SAADE (M.). – *How has LCA been applied to 3D printing ?*

*A systematic literature*, Journal of Cleaner Production, n° %1244, 20 Janvier 2020.

[34] FARINIA GROUP. – *En quoi la fabrication additive peut-elle aider l'industrie aéronautique et spatiale ?*, [En ligne]. Available: [https://](https://www.farinia.com/fr/fabrication-additive/fabrication-additive-industrielle/fabrication-additive-peut-elle-aider-industrie-aeronautique-et-spatiale)

[www.farinia.com/fr/fabrication-additive/fabrication-additive-industrielle/fabrication-additive-peut-elle-aider-industrie-aeronautique-et-spatiale](https://www.farinia.com/fr/fabrication-additive/fabrication-additive-industrielle/fabrication-additive-peut-elle-aider-industrie-aeronautique-et-spatiale)

## À lire également dans nos bases

ANDRE (J.C.). – *Recyclage des déchets d'impression 3D*. [BM 7 975] (2020).

CAMILLIERI (B.) et BUENO (M.A.). – *Tricots 3D : fabrication additive tricotée*. [N 4 610] (2019).

THOMAS (M.), DAVOINE (C.) et DRAWIN (S.). – *Fabrication additive en aéronautique et en spatial*, [BM 7 940] (2019).

CHARTIER (T.), PATELOUP (V.) et CHAPUT (C.). – *Élaboration de pièces céramiques par fabrication additive*, [N 4 807] (2018).

Éditions T.I. – *Industrie du futur Infographie*. [IAG 8 002], Innovation | Industrie du futur (2018).

ANDRE (J.C.). – *Fabrication additive : révolution ou simple évolution sociétale*. [AG 115] (2017).

ANDRE (J.C.). – *Impression 3D : niches applicatives porteuses*. [BM 7 970] (2017).

ANDRE (J.C.). – *Stérolithographie par photopolymérisation*. [BM 7 910] (2017).

GUEDON (E.), MALAQUIN (L.) et ANDRE (J.C.). – *Bio-printing – État des lieux et perspectives*, [RE 268] (2017).

OBATON (A-F.). – *Fabrication additive : contrôles*, [BM 7 950] (2017).

LAVERNE (F.), SEGONDS (F.) et DUBOIS (P.). – *Fabrication additive. Principes généraux*, [BM 7 017] (2016).

## Normes et standards

NF EN ISO/ASTM 52900 Mai 2017

Fabrication additive – Principes généraux – Terminologie

NF ISO 17296-2

Décembre 2016

Fabrication additive – Principes généraux – Partie 2 : vue d'ensemble des catégories de procédés et des matières premières

## Annuaire

### Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

#### France Additive

<https://franceadditive.tech/>

**CT-IPC** - Le Centre Technique Industriel de la Plasturgie et des Composites

<https://ct-ipc.com/>

#### Les Instituts Carnot

<https://www.instituts-carnot.eu/>

### Documentation - Formation – Séminaires (liste non exhaustive)

#### Cetim

<http://www.cetim.fr/>

**Guide pratique de l'usine du futur**, 2016

<http://industriedufutur.fim.net/#consulter>

# Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable



RÉDIGÉE ET VALIDÉE  
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR  
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE  
SUR TOUS SUPPORTS  
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS  
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- Des Quiz interactifs pour valider la compréhension 

## SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



### Questions aux experts\*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



### Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



### Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



### Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



### Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

\*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

## Les offres Techniques de l'Ingénieur



### INNOVATION

- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente



### MATÉRIAUX

- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillessement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites



### MÉCANIQUE

- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D



### ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement



### ÉNERGIES

- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications



### GÉNIE INDUSTRIEL

- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception



### ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Electronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique



### TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information



### AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique



### INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime



### MESURES – ANALYSES

- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif



### PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire



### SCIENCES FONDAMENTALES

- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière



### BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques



### CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillessement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques