

# Aperçu sur la fabrication additive : technologies, matériaux, applications

## An Overview on Additive Manufacturing: Technologies, Materials and Applications

Omar Lkadi<sup>1</sup>, Mohammed Nassraoui<sup>2</sup>, Otmane Bouksour<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, omar.lkadi-etu@etu.univh2c.ma

<sup>2</sup> Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, mohammed.nassraoui@univh2c.ma

<sup>3</sup> Laboratoire de mécanique productique et de génie industriel (LMPGI), Ecole Supérieure de Technologie, Université Hassan 2, Casablanca, Maroc, otmane.bouksour@univh2c.ma

**RÉSUMÉ.** La fabrication additive construit les objets à partir de fichier numérique et cela couche par couche. De nos jours, les technologies de fabrication additive sont en pleine développement, et sont utilisées dans plusieurs domaines industrielles : médicale, automobile, aéronautique, agriculture. Elle présente un nombre important d'avantages, notamment la réduction de masse, la liberté de conception, la réduction des déchets et le prototypage rapide. Avec une large sélection de matériau possible à utiliser. Dans ce papier, un aperçu sur les différentes technologies englobant le terme fabrication additive, ainsi que les différents matériaux de fabrication, y compris une étude sur ses avantages et ses inconvénients comme point de référence pour la recherche et les développements futurs.

**ABSTRACT.** Additive manufacturing builds objects from digital files and this layer by layer. Nowadays, additive manufacturing technologies are in full development, and are used in several industrial fields: medical, automotive, aeronautics, agriculture. It has a significant number of benefits, including mass reduction, design freedom, waste reduction and rapid prototyping with a wide selection of possible material to use. In this paper, an overview of the different technologies encompassing the term additive manufacturing as well as the different manufacturing materials, including a study on its advantages and disadvantages as a reference point for future research and development.

**MOTS-CLÉS.** Fabrication additive, Matériaux, Aérospatial, Médical, Automobile.

**KEYWORDS.** Additive Manufacturing, materials, Aerospace, medical, automotive.

## 1. Introduction

Parmi les technologies clés qui forment les éléments constitutifs et stimulent la recherche sur l'industrie 4.0, on trouve la fabrication additive. Dans la technologie de fabrication additive, les produits sont fabriqués couche par couche à partir d'un modèle 3D qui permet la production des géométries qui seraient difficile à réaliser par un procédé traditionnel. Bien que les avantages offerts par les technologies de FA sont nombreux, mais elles imposent certaines limites : taille des pièces, matériaux, qualité des pièces (Di Nicolantonio, Rossi, et Alexander 2020). L'évolution de la fabrication additive a considérablement affecté le monde industriel et académique et les développements continue dans l'objectif d'améliorer en continue le processus, le matériau, la conception. L'utilisation de la FA est souvent liée à la question des avantages qu'elle présente par rapport aux processus et technologies existants, et plus souvent de savoir s'il est moins cher à utiliser pour fabriquer. (Salmi 2021)

## 2. Fabrication additive

### 2.1. Définition

La fabrication des pièces par les procédés conventionnels, comme l'usinage, nécessite un objet initial qui est « le brut », ce brut subit une soustraction de matière afin d'obtenir la pièce finale.

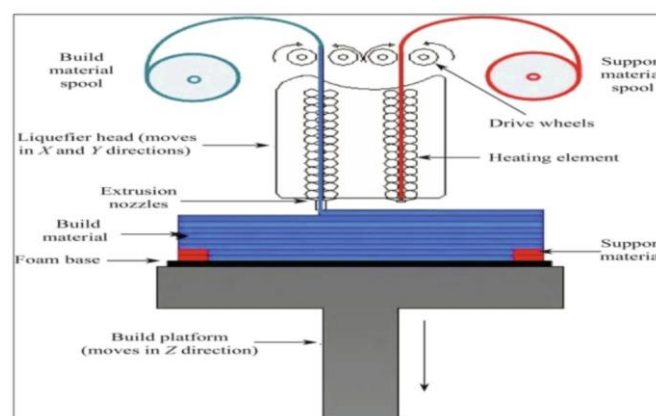
C'est pour cela que ces procédés sont désignés soustractives. A l'inverse, on trouve les procédés dites additives (FA) qui, à partir d'un modèle numérique 3D crée par un logiciel de CAD, la pièce est créée par ajout successive de matière généralement couche par couche. Ces procédés sont désignés par fabrication additive (FA). Le terme FA est le terme officiel qui englobe les technologies pour ce que l'on appelait autrefois le prototypage rapide et ce que l'on appelle couramment l'impression 3D.(Gibson et al. 2021) (Thompson et al. 2016) les débuts de la FA revient aux années 77 ou les recherches ont commencées sur la stéréolithographie menées parallèlement en France et aux Etats-Unis, en 1986 La Stéréolithographie, est le premier procédé de fabrication additive permettant de réaliser des pièces, et depuis ce temps le développement des procédés de FA n'a cessé de révolutionner le monde industriel et touche de plus en plus nombreux domaines tels que l'alimentaire, l'automobile, l'aérospatiale, le médical..... (Orquéra, s. d.2020 ) (Bahnini et al. 2018) (Leong, Chuah, et Tee, s. d., 0 2020) (Attaran 2017) (Pinna et al., s. d.) (Han 2017)

## 2.2. Les différentes technologies de FA

Dans son début la technologie de FA a été utilisé pour fabriquer des prototypes (prototypage rapide), les outillages (outillage rapide). Et depuis, ces procédés non pas cessé de se développer. A ce jour, avec les nouveaux procédés de FA, nous pouvons fabriquer des pièces en série ou petite série. Selon la norme ASTM F2792, les procédés de FA sont catalogués en sept groupes :le jet de liant (the binder jetting), le dépôt par énergie dirigée (directed energy deposition), l'extrusion de matériaux (material extrusion), le jet de matériaux (material jetting), la fusion sur lit de poudre (powder bed fusion), la stratification de feuilles(sheet lamination) et la photopolymérisation en cuve(vat photopolymerization ), ces procédés se différent suivant le type de matériau utilisé ou suivant l'état sous laquelle se présente le matériau initial.

### 2.2.1. L'extrusion de matériaux (Material Extrusion)

La technologie la plus connu dans cette catégorie est le Dépôt de fil fondu (Fused Deposition Modelling (FDM)), cette technique consiste à déposer de la matière par couche, il utilise en général un filament de matière en Polymère qui est fondue à l'état liquide dans une tête de liquéfaction et extrudé à travers une buse comme le montre la Figure 1 pour construire la pièce couche par couche.(Diegel, Nordin, et Motte 2019) (Patel et al. 2022). Pour cette technologie de fabrication, une variétés de matériaux comme l'acide polylactique (PLA) polycarbonate (PC), l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et le mélange de mélange PCABS sont utilisés dans la fabrication des pièces.(Patel et al. 2022)



**Figure 1.** Les composants principaux d'une machinde de dépôt de fil fondue (source (Patel et al. 2022))

#### 2.2.1.1. Avantages

Les principaux avantages du dépôt de fil fondu sont :

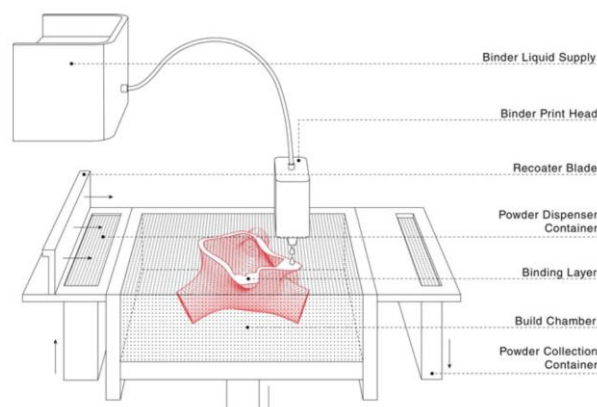
- Le rapport coût/production est très bon.
- La plupart des filaments utilisés sont à base de plastique, ils peuvent donc être réutilisés. Ils peuvent être facilement remodelés sous forme de filament en les chauffant et en les redressant. Il existe différentes machines qui sont disponibles pour recycler le filament très facilement.
- Les imprimantes FDM sont l'une des machines d'impression 3D les plus simples et elles conviennent mieux à quelqu'un de nouveau dans le domaine.
- Facilement portable : Grâce à sa conception simple, les composants sont facilement détachables.
- Conception compacte : Les imprimantes basées sur la technologie FDM sont assez simples et ne prennent pas trop de place. Ensuite, en dehors du volume d'impression des pièces, ses autres pièces comme le cadre extérieur, l'unité d'alimentation, etc. ne prennent pas beaucoup de place.

#### 2.2.1.2. Inconvénients

- La Finition de surface : Les produits finis fabriqués par les imprimantes FDM n'ont pas de très bonne finition.
- Problèmes de qualité de surface dans le processus FDM tels que les erreurs volumétrique, les écarts de forme (Taufik et Jain 2022).
- Bouchage de la buse : Au cours d'impression, il arrive que le filament se coince dans la buse, ce qui provoque son obstruction. Cela se produit également en raison des réglages irréguliers de la température et aussi lorsque l'impression est très rapide par rapport au rythme de fusion du filament.
- Temps d'impression plus long : le temps total d'impression atteint parfois plusieurs jours pour un modèle normal de volume moyen.
- Problème d'adhésion des couches : les imprimantes FDM travaillent essentiellement couche par couche et, en travaillant avec ces couches, il est courant que l'adhérence entre les couches se détériore (Patel et al. 2022).

#### 2.2.2. Le jet de liant (*The binder Jetting*)

Le procédé de projection de liant consiste en l'injection sélective d'un liant sur un lit de poudre mince, liant les zones de la poudre ensemble pour former une pièce solide, une couche à la fois comme illustré dans la Figure 4 (Bañón et Raspall 2021). Cette technologie peut imprimer de gros articles en utilisant des métaux, des polymères, des sables, des céramiques et des matériaux hybrides.(Alfattni 2022), (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019). La technologie de jet de liant a été premièrement développée au Massachusetts Institute of Technology (MIT) et brevetée en 1993 par Emanuel Sachs, qui a développé le procédé en utilisant une poudre de type gypse et un liant glycérine/eau déposé par des têtes d'impression à jet d'encre à bulles thermiques. La technologie a été mise au marché par l'entreprise Z Corporation (Z Corp.), qui a donné à sa plate-forme des capacités de couleur et a surnommé la technique "impression 3D" (A. Mostafaei, A.M. Elliott, M. Chmielus 2020).



**Figure 2.** Différents équipements constituant l'impression par jet de liant ((Bañón et Raspall 2021)

Les matériaux couramment utilisés sont les sables, les céramiques et les métaux sous forme granulaire. L'utilisation de poudre de sable a plusieurs applications, notamment la fabrication de prototypes rapides et peu coûteux, qui peuvent être en couleur, et la production de grands moules pour la coulée de métal ou de béton (Bañón et Raspall 2021).

### 2.2.2.1. Avantages

Les principaux avantages de cette technologie sont :

- L'impression 3D métal par projection de liant permet de générer des modèles très précis et en vitesse (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019 ), (Bañón et Raspall 2021).
- Elle permet d'imprimer plusieurs alliages métalliques tels que les aciers inoxydables (A. Mostafaei, A.M. Elliott, M. Chmielus 2020).
- Le processus de mise en forme se déroule à température et atmosphère ambiantes, ce qui évite les problèmes liés à l'oxydation, aux contraintes résiduelles (A. Mostafaei, A.M. Elliott, M. Chmielus 2020).
- Le volume de construction des machines à jet de liant est parmi les plus importants par rapport aux autres technologies de FA (jusqu'à  $2200 \times 1200 \times 600$  mm) (A. Mostafaei, A.M. Elliott, M. Chmielus 2020).

### 2.2.2.2. Inconvénients

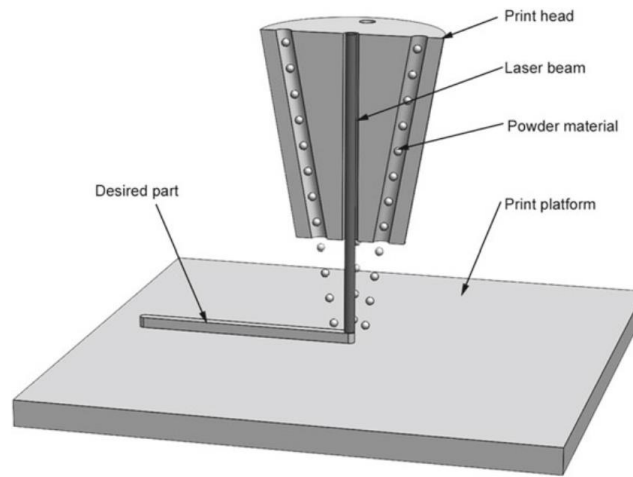
Les principaux inconvénients du jet de liant sont les suivants :

- Les pièces ont souvent une porosité et présente de mauvaises performances mécaniques, ce qui nécessite un post-traitement pour augmenter leur résistance (Bañón et Raspall 2021).
- Les pièces présentent une densité relative plus faible (~50%) par rapport aux procédés PBF, et la densification à partir de cet état entraîne généralement une distorsion importante de la géométrie (Gibson et al. 2021).

### 2.2.3. Le dépôt par énergie dirigée (*Directed Energy Deposition*)

Le DED est une méthode dans laquelle un matériau est directement déposé et fusionné à une pièce métallique grâce à un flux d'énergie guidée (faisceau laser, arc électrique, arc plasma, etc.). Le processus de dépôt par énergie dirigée est semblable dans son principe à l'extrusion de matériaux, mais la buse n'est pas fixée sur un axe spécifique et peut se déplacer dans plusieurs directions. En outre, le procédé peut être utilisé avec des céramiques, des polymères, mais il est généralement utilisé avec des métaux et des hybrides à base de métaux, sous forme de fil ou de poudre (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019). Cette technologie, qui permet de réparer des objets dont les dimensions vont du millimètre au mètre, gagne du terrain dans les secteurs de transport, de l'outillage, de l'aérospatiale, du pétrole et du gaz, en raison de son évolutivité et de sa souplesse, qui lui permettent d'effectuer de nombreuses tâches dans un seul système (Alfattni 2022). L'exemple de cette technologie est le dépôt laser et la mise en forme de filet d'ingénierie laser (LENS), Dépôt Direct de Métal (DMD), Construction Laser Additive Direct (CLAD).

Une machine DED typique se compose d'une buse montée sur un bras multi-axes, qui dépose de la poudre ou du fil sur la surface spécifiée et dans le chemin d'un faisceau d'énergie, où il fond et se solidifie (Diegel, Nordin, et Motte 2019). Le matériau, qui peut être déposé sous n'importe quel angle en raison de machines à 4 et 5 à axe, est fondu lors du dépôt avec un laser ou un faisceau d'électrons. Le processus est généralement utilisé avec des métaux, sous forme de poudre ou de fil (voir Figure 5).



**Figure 3.** *Système de fabrication par dépôt d'énergie dirigée* (Diegel, Nordin, et Motte 2019)

#### 2.2.3.1. Avantages

Les principaux avantages de cette technologie sont :

- Offre une fabrication de forme libre, sans outils ni matrices, par rapport aux procédés de fabrication traditionnels, tels que le moulage, le forgeage.
- L'évolution de la technologie permet de construire de très grandes structures.
- Permet d'utiliser plusieurs matériaux dans une même construction.
- L'utilisation d'une charge de fil réduit les problèmes de sécurité liés à la poudre (incendie, explosion).
- Les technologies DED hybrides ordonnent la fabrication additive et les procédés d'usinage traditionnels (usinage CNC) et offrent la possibilité de produire des pièces entièrement usinées sur une seule machine.

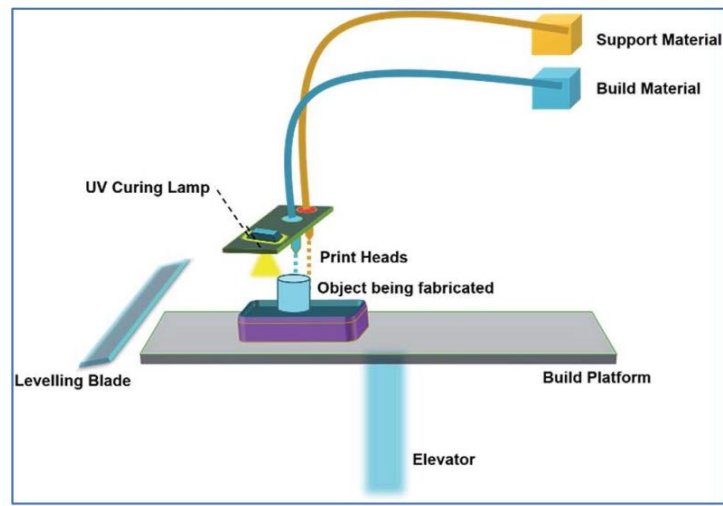
#### 2.2.3.2. Inconvénients

- Les pièces présentent des contraintes résiduelles et doivent souvent être détendues.
- La rugosité de surface est plus élevée que celle des technologies d'AM, telles que la fusion sur lit de poudre et le jet de liant.

#### 2.2.4. Jet de matière (*material jetting*)

Conformément aux normes ASTM, le jet de matériau est un procédé dans lequel des gouttes de matériau de construction sont déposées de manière sélective. Dans ce procédé, une tête d'impression est utilisée, semblable à celle d'une imprimante à jet d'encre, pour déposer goutte à goutte un matériau photopolymère liquide pour chaque tranche du modèle, avec une source de lumière UV attachée à la tête d'impression, qui durcit les gouttes de matériau déposées lorsqu'elles passent au-dessus d'elles. La tête d'impression est conçue pour déposer à la fois le matériau de la pièce, ainsi que tout matériau de support requis, pour chaque tranche du modèle (voir Figure 6) (Diegel, Nordin, et Motte 2019).





**Figure 4.** Représentation schématique du procédé Jet de matière (Gülcan, Günaydın, et Tamer 2021)

#### 2.2.4.1. Avantages

Les principaux avantages du jet de matière sont :

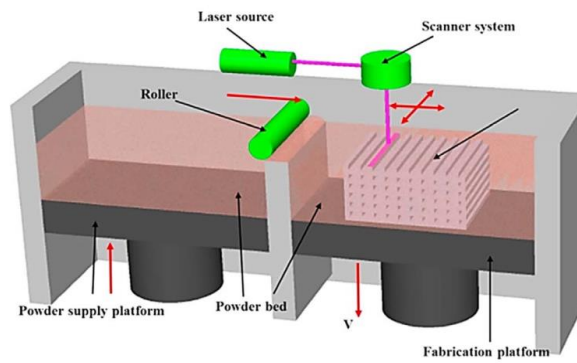
- Impression de pièces avec une grande précision dimensionnelle avec faible rugosité de surface (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019), (Gülcan, Günaydın, et Tamer 2021).
- La capacité à imprimer des pièces multi matériaux et en couleur (Gülcan, Günaydın, et Tamer 2021), (Bañón et Raspall 2021).

#### 2.2.4.2. Limitations

- Par rapport à d'autres technologies d'AM, les machines MJ sont encore chères, ce qui rend leur utilisation défavorable pour certaines applications (Gülcan, Günaydın, et Tamer 2021).
- Bien qu'il soit plus facile de l'enlever, la plupart des pièces nécessitent souvent des supports et une étape de post-traitement (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019).
- On ne peut effectivement pas encore fabriquer de pièces de grandes dimensions (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019).

#### 2.2.5. La fusion sur lit de poudre (powder bed fusion)

La technologie de fusion sur lit de poudre regroupe la technique de fusion par faisceau d'électrons (EBM), le frittage sélectif par laser (SLS) et le frittage sélectif par la chaleur (SHS) (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019). Toutes ces technologies consistent à fondre des particules de poudre métallique grâce à une source de chaleur – un laser ou un faisceau d'électrons – pour former une pièce plus ou moins complexe (voir Figure 7). Les matériaux utilisés dans ce processus sont divers : les métaux comprennent l'acier inoxydable, l'aluminium, le titane, le chrome cobalt (Diegel, Nordin et Motte 2019) céramiques, polymères, composites (Attaran 2017), (Shahrubudin, Lee et Ramlan 2019), (Ngo et al. 2018).



**Figure 5.** les composants de base du procédé de fusion sur lit de poudre (Ngo et al. 2018)

#### 2.2.5.1. Avantages

- Possibilité de produire des composants à pleine résistance qui sont relativement isotropes (Diegel, Nordin, et Motte 2019).
- Elles peuvent produire des pièces dans une variété de polymères (dans le cas de LS) et de métaux (dans le cas de SLM et EBM) (Diegel, Nordin, et Motte 2019).
- Une résolution fine avec une haute qualité d'impression, qui la rendent adaptée à l'impression de structures complexes (Ngo et al. 2018).
- Cette technologie est largement utilisée dans diverses industries pour des applications avancées telles que les échafaudages pour l'ingénierie tissulaire, les treillis, l'aérospatiale et l'électronique (Ngo et al. 2018), (Jones et al. 2021).
- Le lit de poudre est utilisé comme support, ce qui permet de surmonter les difficultés d'enlèvement du matériau de support (Ngo et al. 2018).

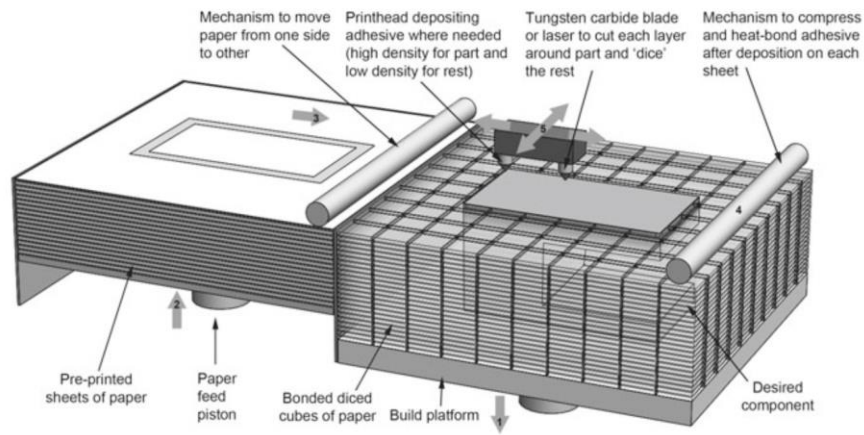
#### 2.2.5.2. Inconvénients

Cependant, les principaux inconvénients de la fusion sur lit de poudre sont :

- Le processus est lent, comprennent des coûts élevés (Ngo et al. 2018).
- Les pièces comprennent une porosité élevée lorsque la poudre est fusionnée avec un liant (Jones et al. 2021), (Ngo et al. 2018).

#### 2.2.6. La stratification de feuilles (sheet lamination)

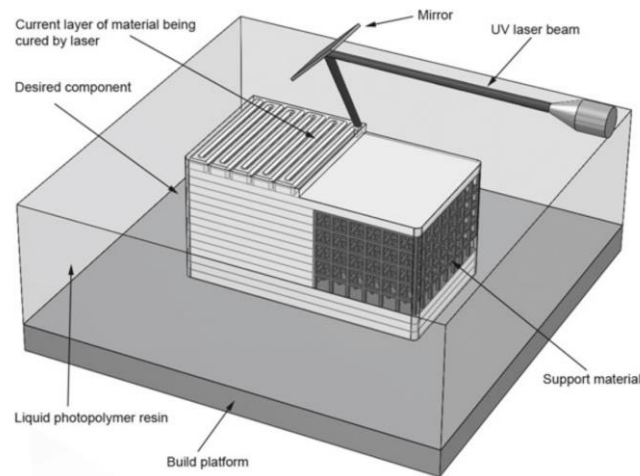
Tel que défini par l'ASTM, c'est un processus de fabrication additive dans lequel des feuilles de matériaux sont collées ensemble pour produire une partie de l'objet comme sur la Figure 8 (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019). Les exemples de technologies qui utilisent ce procédé sont : la fabrication d'objets laminés (laminated object manufacturing LOM), fabrication additive par ultrasons (Ultrasonic Additive Manufacturing) et le laminage par dépôt sélectif (Selective Deposition Lamination). Une grande variété de matériaux sont possibles à utiliser tels que le papier, le polymère, la céramique et le métal (Diegel, Nordin, et Motte 2019), (Alfatni 2022), (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019), (Ngo et al. 2018). Les objets stratifiés sont souvent utilisés pour des modèles esthétiques et visuels et ne sont pas généralement adaptés à un usage structurel (Diegel, Nordin, et Motte 2019).



**Figure 6.** Exemple de système de fabrication additive de laminage de feuilles (Diegel, Nordin, et Motte 2019)

### 2.2.6. La photopolymérisation en cuve (vat photopolymerization )

C'est une technique de fabrication additive dans laquelle un photopolymère liquide est durci par polymérisation activée par la lumière dans une cuve (voir Figure 9) (Khorram Niaki et Nonino 2018). La stéréolithographie (SLA) et le traitement numérique de la lumière sont deux exemples de technologies d'impression 3D utilisant la photopolymérisation (DLP). Les matériaux utilisés sont au départ liquide et durcissent lorsque le liquide est exposé à la lumière ultraviolette. Cette technique convient à la production des pièces de haut gamme avec de bons détails et de haute qualité de surface (Alfattni 2022), (Shahrubudin, Lee, et Ramlan 2019), (B.A et al. 2022).



**Figure 7.** Système de photopolymérisation en cuve (Diegel, Nordin, et Motte 2019)

## 3. Domaines d'application de la fabrication additive

Avec l'avancement rapide des technologies, la FA s'est développée rapidement au cours des dernières années pour inclure des applications dans différents domaines de la vie quotidienne. Du prototypage et de l'outillage à la fabrication directe de pièces en secteurs industriels tels que le médical, le dentaire, l'aérospatiale, l'automobile, etc. (Leong, Chuah, et Tee, s. d., 0 2020).

### 3.1. Domaine médical

Le domaine de la médecine est l'une des utilisations de la FA les plus intéressantes et qui changent de plus en plus la vie de plein de personne à travers le monde en offrant des solutions prometteuses aux problèmes chirurgical.(Geng et Bidanda 2021) La disponibilité des produits médicaux, tels que les robots, les prothèses, etc., souffre depuis longtemps de leur prix élevé et de leur inaccessibilité. La FA a montré son importance dans ce domaine surtout pendant l'épidémie de



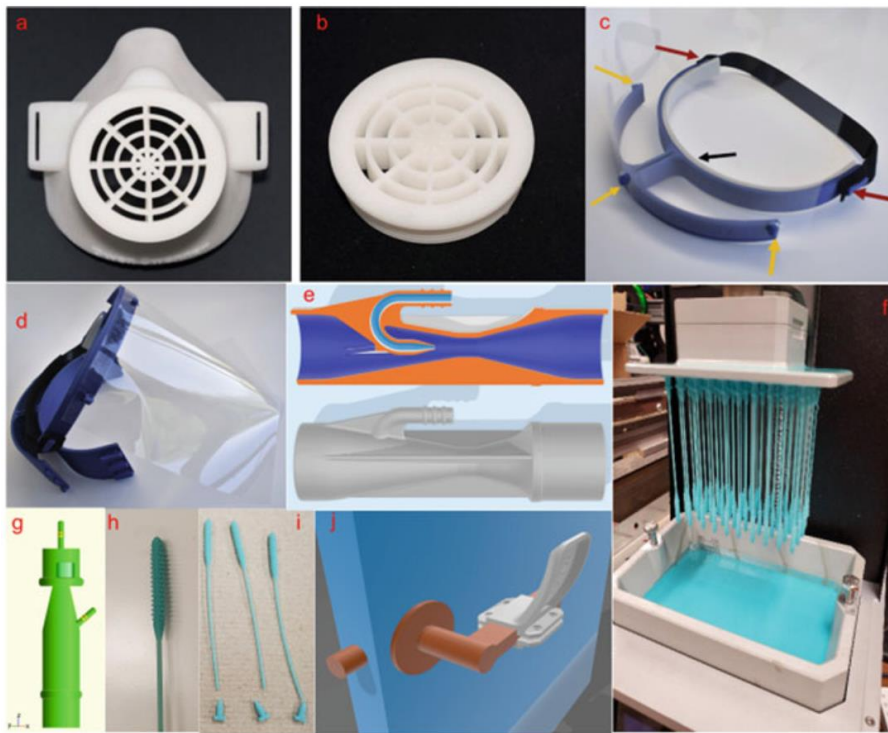
COVID 19, à travers les produits offerts par cette technologie pour répondre au besoin immense en termes de produit de protection et de réanimation (Sandhu et al. 2022, 19).

L'impression 3D ouvre des opportunités intéressantes pour ceux qui travaillent dans le domaine de l'anaplastologie et les différents experts qui fabriquent exclusivement des pièces. Les informations sur les organes manquants ou des parties d'organes sont tirées de l'imagerie réparatrice, de la refonte 3D, et la démonstration 3D conséquente par programmation. Cette information est idéalement fondée sur la réflexion. L'organe contrefait idéal doit être ajusté indépendamment de la situation de chaque patient. Pour abréger ce système et permettre aux experts de l'anaplastologie de se concentrer sur ses aptitudes centrales, la partie structurée est réalisée par impression 3D (Leong, Chuah, et Tee, s. d. 2020).

### *3.1.1. Le rôle de la FA dans l'épidémie de COVID-19*

Le terme Covid-19 fait référence à « Coronavirus Disease 2019 », la maladie provoquée par le virus SARS-CoV-2. Son origine est encore débattue, elle a émergé en décembre 2019 dans la ville de Wuhan en Chine. Elle s'est rapidement propagée provoquant une épidémie mondiale déclarée par l'organisation internationale de la santé en 30 janvier 2020. Les chercheurs à travers le monde entier et dans les différents domaines n'ont pas cessé de contribuer dans les efforts pour lutter contre cette épidémie.

Malheureusement, les réponses incohérentes à la COVID-19 et aux confinements ont provoqué une perturbation de la chaîne d'approvisionnement mondiale, causant des problèmes avec les importations de produits de base (Hagen et al. 2021) à la suite de ces interruptions, Il y a eu un manque d'équipement de protection individuelle (EPI), et d'équipement médical disponible pour les professionnels de la santé (kits de dépistage, les masques et d'autres, écrans faciaux, etc.) (Sandhu et al. 2022). Une insuffisance de ventilateurs, qui sont nécessaires pour traiter les patients atteints d'insuffisance respiratoire aiguë sévère, a résulté de l'interruption de la chaîne d'approvisionnement.(Nicola et al. 2020). Afin de réduire l'écart entre l'offre et la demande en temps de la crise, et répondre à l'insuffisance mortelle de ces équipements, une des solution utilisée c'est l'utilisation des procédés de FA (Hagen et al. 2021). Cela comprend le développement d'équipements de protection personnelle (EPI) efficaces, de meilleurs agents thérapeutiques, etc. (Sandhu et al. 2022).



**Figure 8.** Exemples d'équipement produits par procédé de FA :Masques de visage, support de membrane filtrante, Cadre du masque de protection, etc. (Sandhu et al. 2022)

### 3.2. Industrie automobile

Les constructeurs automobiles, été parmi les premiers usagers de la FA lorsqu'elle est apparue à la fin des années 1980 pour les opérations du prototypage rapide (Leong, Chuah, et Tee, s. d.) et depuis ce temps, Les constructeurs automobiles accélèrent l'adoption des technologies de fabrication additive afin de rester compétitifs à l'ère de l'industrie 4.0.

Actuellement, la FA est utilisée à toutes les étapes de l'industrie automobile, de la fabrication de prototypes et d'outils aux produits finis, ce qui permet aux constructeurs automobiles de rester souples et créateurs.(Khan et Jappes 2022) De plus, avec l'utilisation de la FA métallique, les constructeurs automobiles sont en mesure de développer des pièces de qualité supérieure avec des formes et des structures complexes. Les pièces comprenaient celles du moteur, des panneaux de carrosserie, des ressorts de suspension, des cadres de siège et des systèmes de refroidissement des gaz d'échappement.....etc. (Leal et al. 2017). L'utilisation de la FA dépasse même la fabrication des pièces seules, la FA est également capable de produire l'ensemble de la voiture imprimée en 3D pour une utilisation finale. Le plus gros inconvénient est que la FA est incapable de produire en masse des composants de véhicules en grande quantité. En conséquence, l'avenir de la fabrication additive dans les automobiles est qu'elle fonctionne comme une fabrication de masse de composants pour répondre à la demande des consommateurs (Khan et Jappes 2022).

### 3.3. Industrie aérospatiale

Dans le secteur aérospatial, les procédés de FA permettent aux entreprises de relever certains défis auxquels elles sont confrontées. La possibilité de concevoir des géométries complexes par les procédés de FA permettent aux fabricants de réduire le nombre d'étapes de fabrication et d'alléger les structures.

D'une manière générale, les opérations aérospatiales comprennent une fabrication de grande valeur et de faible volume, ce qui correspond bien aux principaux avantages de l'AM (Khorram Niaki et Nonino 2018) d'autre part, les gains en matériaux offerts par les procédés de FA, est un avantage essentiel pour l'industrie aérospatiale. De plus, les pièces aérospatiales sont trop chères,

d'où un grand pourcentage de leurs pièces sont en titane, plastique et autres matériaux légers (Khorram Niaki et Nonino 2018).

### 3.4. Biens de consommation

Les clients d'aujourd'hui sont de plus en plus exigeants, Ils exigent des produits personnalisés qui sont adaptés à leurs besoins distinctifs. cadres de vélo, manches de rasoir, bijoux en céramique aux chaussures personnalisées (Khorram Niaki et Nonino 2018), les entreprises modernes adaptent leurs produits de consommation pour répondre aux exigences modernes. L'utilisation des procédés de FA à proposer de nouvelles opportunités tout au long des phases de conception, d'outillage et même de production de pièces en série, tout en diminuant ou éliminant le besoin d'outillage et permet ainsi de diminuer les coûts et le temps de développement de prototypes et de pièces fonctionnelles durables.

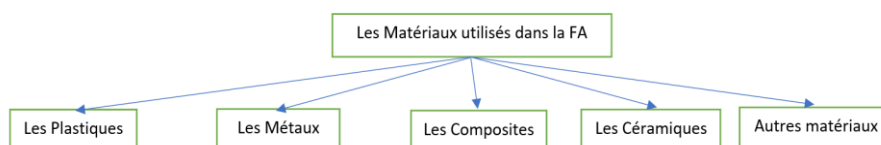
### 3.5. Architecture et Construction

A ce temps, l'utilisation principale de l'impression 3D dans le secteur de l'architecture est de générer des modèles réduits pour la représentation. De nouvelles utilisations des composants fonctionnels du bâtiment se développent à mesure que la technologie d'impression progresse. A part des avantages offertes par l'impression 3D comme : le gain remarquable en temps de fabrication vu que les pièces sont directement produites sans qu'il soit nécessaire de recourir à des équipements particuliers et coûteux, la réduction des coûts de fabrications, et la liberté de forme... D'autre part, les dimensions constitue un obstacle majeur, car les dimensions des bâtiments sont très grandes par rapport aux dimensions des pièces produites par l'impression 3D, pour cette raison uniquement certaines parties peuvent être produites par les technologies actuelles de l'impression 3D (Bañón et Raspall 2021). Il existe une variété de technologies commerciales bien connues qui sont utilisées dans le domaine de l'architecture, chacune ayant son principe technologie de base (comme les lasers et la technologie d'extrusion) et sa propre matière première (comme les polymères liquides, les matériaux fondus). Les plus courantes : La fabrication de filaments fondus (FFF), Le frittage laser direct de métal (DMLS), la technologie de fabrication additive par projection de liant, aussi nommée Binder Jetting, Impression 3D par extrusion de béton, Impression 3D d'argile par extrusion (Bañón et Raspall 2021). Le besoin en nouvelle méthode assurant l'augmentation de la productivité avec réduction des coûts, pousse les industriels de la construction à se concentrer sur les méthodes de numérisation des tâches industrielles les plus complexes, d'où l'intrusion des technologies de FA dans ce secteur classé parmi l'un des plus grandes industries du monde (El-Sayegh, Romdhane, et Manjikian 2020).

## 4. Matériaux

Dans les processus comme l'usinage, le matériau a une quantité connue. La pièce commence sous la forme d'un bloc de matériau et sa forme change au cours du processus d'usinage, mais ses propriétés matérielles intrinsèques sont déjà définies. Cependant, Dans la fabrication additive, les propriétés du matériau sont établies en même temps que la géométrie de la pièce. La matière première a un impact mais les paramètres du processus jouent également un rôle dans des facteurs tels que la résistance, la ductilité, et la finition de surface de la pièce finale.

Les principales catégories de matériaux utilisées aujourd'hui dans l'impression 3D sont indiquées sur la Figure 9 ci-dessous :



**Figure 9.** Les différents matériaux utilisés dans la fabrication additive (Leong, Chuah, et Tee, s. d.)

## 4.1. Plastiques

Les plastiques sont des polymères généralement mélangés avec d'autres additifs, leurs utilisations dans les procédés de fabrication additifs a commencé avec l'invention du premier procédé, et constitue encore une grande partie des matériaux utilisés (Leong, Chuah, et Tee, s. d 2020). Vu leurs propriétés physiques, chimiques, mécaniques et structurelles, les avancements réalisés dans le domaine des composites ont permis leur utilisation dans les applications de la science et de l'ingénierie (Dizon 2018) a donné des informations précieuses sur quelques propriétés mécaniques des polymères utilisés dans quelques procédés de FA. A partir de ces données et de d'autres données (Ngo et al. 2018) les concepteurs de pièces peuvent alors choisir le matériau adéquat à utiliser (et donc la technologie d'impression) pour une application particulière. Le développement de diverses méthodes et de divers matériaux permettant de fabriquer des composites polymères améliorés et plus performants est l'objectif de recherches continues qui vise à remédier aux mauvaises caractéristiques mécaniques des polymères imprimés en 3D (Ngo et al. 2018).

## 4.2. Métaux et alliages

La fabrication additive métallique a connu une croissance considérable, l'utilisation de la FA métallique trouve son emploi dans plusieurs secteurs, aérospatiale, biomédicale, automobile (Ngo et al. 2018) d'une manière générale, le processus FA de métaux consiste à faire fondre une matière première métallique (poudre ou fil) à l'aide d'une source d'énergie telle qu'un laser ou un faisceau d'électrons. Le matériau fondu est transformé couche par couche pour former une pièce solide. Les techniques les plus couramment utilisées pour l'impression des métaux sont la fusion sur lit de poudre (PBF) et le dépôt par énergie directe (DED), le jet de liant, le soudage par friction-malaxage, l'écriture directe sur métal. Ces procédés permettent d'atteindre une précision ou une vitesse plus élevée (Ngo et al. 2018).

## 4.3. Céramiques

Les matériaux céramiques sont définis comme des matériaux non métalliques et inorganiques obtenus par l'action de hautes températures. Ce sont ces hautes températures qui déclenchent une transformation irréversible au cœur de la matière première qui donne à la céramique ses propriétés finales (résistance thermique, isolation, robustesse, résistance mécanique, etc.). A cause de ces caractéristiques, les céramiques sont des matériaux difficiles à mettre en forme. D'autre part, le post-traitement des pièces en céramique frittées dans la forme souhaitée est un processus long et coûteux (Ngo et al. 2018) et selon (Shahrubudin, Lee et Ramlan 2019). Les matériaux céramiques peuvent être utilisés dans les applications dentaires et aérospatiales. On trouve dans cette catégorie comme exemple de matériau l'alumine, les verres bioactifs et la zircone (Shahrubudin, Lee et Ramlan 2019).

## 4.4. Les composites

Les exemples de matériaux composites sont les composites polymères renforcés de fibres de carbone et les composites de polymère renforcés de fibres de verre. Les structures composites en polymères renforcés de fibres de carbone sont largement utilisées dans l'industrie aérospatiale en raison de leur rigidité spécifique élevée, de leur résistance, de leur bonne résistance à la corrosion et de leurs bonnes performances en fatigue. Dans le même temps, les composites polymères renforcés de fibres de verre sont largement utilisés pour diverses applications dans les applications d'impression 3D et ont de grandes applications potentielles en raison de la rentabilité et de la haute performance. La fibre de verre a une conductivité thermique élevée et un coefficient de dilatation thermique relativement faible (Shahrubudin, Lee et Ramlan 2019).

## 4.5. Autres matériaux

### 4.5.1. Biomatériaux

Les biopolymères, soit naturels ou synthétiques, sont imprimés en 3D pour être utilisés en médecine régénérative et en transplantation d'organes. Le chitosan, l'alginate de sodium et les polymères à base d'acrylates sont parmi les matériaux utilisés (Alfattni 2022). Les applications biomédicales ont des besoins spécifiques comme :

- Haute complexité. La FA permettra le développement de nouveaux implants biomédicaux, de tissus et d'organes modifiés (Ngo et al. 2018).
- Petites quantités de production. La FA est plus rentable par rapport aux méthodes de fabrication traditionnelles pour des volumes de production plus faibles, qui sont typiques de l'industrie biomédicale (Ngo et al. 2018).
- Accès public facile. Les fichiers CAO peuvent être facilement partagés entre les chercheurs.

#### 4.5.2. Matériaux hybrides

L'impression 3D d'hybrides est une direction importante dans le domaine de l'impression qui combine différents matériaux et techniques d'impression pour obtenir de meilleures propriétés des pièces imprimés (Alfattni 2022).

#### 4.5.3. Nourriture

L'impression 3D offre la possibilité de traiter et produire la forme et la géométrie souhaitées en utilisant des matériaux alimentaires comme le chocolat, la viande, les bonbons, la pizza, les spaghettis, la sauce, etc. L'impression 3D des aliments peut produire des aliments sains et propre, en permettant aux clients d'ajuster les ingrédients des matériaux sans réduire le goût des ingrédients. (Shahrubudin, Lee et Ramlan 2019).

### 5. Conclusion

Ce papier donne un bref aperçu sur les types, les applications et les différents matériaux utilisés dans les divers procédés de fabrication additive. La fabrication additive est polyvalente en termes de type de matériaux, elle utilise les métaux, les polymères, les céramiques, les composites et autres matériaux. Actuellement, de nouveaux matériaux comme les matériaux intelligents, les biomatériaux, les nanomatériaux sont développés afin d'accroître les propriétés mécaniques de ces derniers. D'autre part, les polymères sont encore considérés comme des matériaux omniprésents pour la FA et les polymères les plus couramment utilisés sont l'ABS, le PLA. Les métaux sont également utilisés principalement sous forme de poudres ou de fils. Malgré les avantages irréprochables de la fabrication additive, il existe quelques inconvénients (coûts élevés, la vitesse de fabrication, les états de surface de pièce...) qui nécessiteraient des recherches et des développements additionnelles pour concurrencer les méthodes traditionnelles dans la production de masse de produit. Actuellement, la fabrication additive n'est plus considérée comme processus autonome, mais plutôt comme composante essentielle d'une chaîne intelligente de fabrication. Vu la croissance rapide des moyens informatiques et technologiques qui soutiennent continuellement le développement de l'industrialisation dans le monde entier.

### Bibliographie

- Alfattni, Rami. 2022. « Comprehensive Study on Materials Used in Different Types of Additive Manufacturing and Their Applications ». *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences* 7 (1): 92-114. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2022.7.1.007>.
- Attaran, Mohsen. 2017. « The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing over Traditional Manufacturing ». *Business Horizons* 60 (5): 677-88. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>.



- B.A, Praveena, Lokesh N, Abdulrajak Buradi, Santhosh N, Praveena B L, et Vignesh R. 2022. « A Comprehensive Review of Emerging Additive Manufacturing (3D Printing Technology): Methods, Materials, Applications, Challenges, Trends and Future Potential ». *Materials Today: Proceedings* 52: 1309-13. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.059>.
- Bahnini, Insaf, Mickael Rivette, Ahmed Rechia, Ali Siadat, et Abdelilah Elmesbahi. 2018. « Additive Manufacturing Technology: The Status, Applications, and Prospects ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 97 (1-4): 147-61. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1932-y>.
- Bañón, Carlos, et Félix Raspall. 2021. *3D Printing Architecture: Workflows, Applications, and Trends*. SpringerBriefs in Architectural Design and Technology. Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8388-9>.
- Di Nicolantonio, Massimo, Emilio Rossi, et Thomas Alexander, éd. 2020. *Advances in Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping, July 24-28, 2019, Washington D.C., USA*. Vol. 975. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-20216-3>.
- Diegel, Olaf, Axel Nordin et Damien Motte. 2019. *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8281-9>.
- Dizon, John Ryan C. 2018. « Mechanical Characterization of 3D-Printed Polymers ». *Additive Manufacturing*, 24.
- El-Sayegh, S., L. Romdhane et S. Manjikian. 2020. « A Critical Review of 3D Printing in Construction: Benefits, Challenges, and Risks ». *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 20 (2): 34. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w>.
- Geng, Zhaohui, et Bopaya Bidanda. 2021. « Medical Applications of Additive Manufacturing ». In *Bio-Materials and Prototyping Applications in Medicine*, édité par Paulo Jorge Bártolo et Bopaya Bidanda, 97-110. Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35876-1\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35876-1_6).
- Gibson, Ian, David Rosen, Brent Stucker et Mahyar Khorasani. 2021. *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
- Gülcan, Orhan, Kadir Günaydın et Aykut Tamer. 2021. « The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review ». *Polymers* 13 (16): 2829. <https://doi.org/10.3390/polym13162829>.
- Hagen, Andrew, Megan Chisling, Kevin House, Tal Katz, Laila Abelseth, Ian Fraser, Stephen Bradley, et al. 2021. « 3D Printing for Medical Applications: Current State of the Art and Perspectives during the COVID-19 Crisis ». *Surgeries* 2 (3): 244-59. <https://doi.org/10.3390/surgeries2030025>.
- Han, Pinlian. 2017. « Additive Design and Manufacturing of Jet Engine Parts ». *Engineering* 3 (5): 648-52. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.017>.
- Jiménez, Mariano, Luis Romero, Iris A. Domínguez, María del Mar Espinosa, et Manuel Domínguez. 2019. « Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects ». *Complexity* 2019 (février): 1-30. <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>.
- Jones, Alistair, Martin Leary, Stuart Bateman et Mark Easton. 2021. « Effect of Surface Geometry on Laser Powder Bed Fusion Defects ». *Journal of Materials Processing Technology* 296 (octobre): 117179. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117179>.
- Khan, M. Adam et J. T. Winowlin Jappes, éd. 2022. *Innovations in Additive Manufacturing*. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6>.
- Khorram Niaki, Mojtaba et Fabio Nonino. 2018. *The Management of Additive Manufacturing*. Springer Series in Advanced Manufacturing. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56309-1>.
- Leal, R., F. M. Barreiros, L. Alves, F. Romeiro, J. C. Vasco, M. Santos et C. Marto. 2017. « Additive Manufacturing Tooling for the Automotive Industry ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92 (5-8): 1671-76. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0239-8>.
- Leong, Wai Yie, Joon Huang Chuah et Boon Tuan Tee. s. d. « The Nine Pillars of Technologies for Industry 4.0 », 577.
- Ngo, Tuan D., Alireza Kashani, Gabriele Imbalzano, Kate T.Q. Nguyen et David Hui. 2018. « Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges ». *Composites Part B: Engineering* 143 (juin): 172-96. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.

- Nicola, Maria, Zaid Alsafi, Catrin Sohrabi, Ahmed Kerwan, Ahmed Al-Jabir, Christos Iosifidis, Maliha Agha et Riaz Agha. 2020. « The Socio-Economic Implications of the Coronavirus Pandemic (COVID-19): A Review ». *International Journal of Surgery* 78 (juin): 185-93. <https://doi.org/10.1016/j.ijssu.2020.04.018>.
- Orqu ra, Myriam. s. d. « Conception pour la fabrication additive: approche méthodologique pour les systèmes mécaniques multicorps », 207.
- Patel, Ravikumar, Chirag Desai, Sagarsingh Kushwah et M.H. Mangrola. 2022. « A Review Article on FDM Process Parameters in 3D Printing for Composite Materials ». *Materials Today: Proceedings*, février, S2214785322010252. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.385>.
- Pinna, Claudia, Lucia Ramundo, Francesco G Sisco, Cecilia Maria Angioletti, Marco Taisch et Sergio Terzi. s. d. « Additive Manufacturing Applications within Food Industry: An Actual Overview and Future Opportunities », 7.
- Prakash, K. Satish, T. Nancharai et V.V. Subba Rao. 2018. « Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview ». *Materials Today: Proceedings* 5 (2): 3873-82. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>.
- Salmi, Mika. 2021. « Additive Manufacturing Processes in Medical Applications ». *Materials* 14 (1): 191. <https://doi.org/10.3390/ma14010191>.
- Sandhu, Kamalpreet, Sunpreet Singh, Chander Prakash, Neeta Raj Sharma et Karupppasamy Subburaj,  d. 2022. *Emerging Applications of 3D Printing During CoVID 19 Pandemic*. Lecture Notes in Bioengineering. Singapore: Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6703-6>.
- Shahrubudin, N., T.C. Lee et R. Ramlan. 2019. « An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications ». *Procedia Manufacturing* 35: 1286-96. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089>.
- Taufik, Mohammad et Prashant K. Jain. 2022. « Part Surface Quality Improvement Studies in Fused Deposition Modelling Process: A Review ». *Australian Journal of Mechanical Engineering* 20 (2): 527-51. <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1723342>.
- Thompson, Mary Kathryn, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard et al. 2016. « Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations, and Constraints ». *CIRP Annals* 65 (2): 737-60. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.