



**TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **BM7935 V1**

Matériaux pour l'impression 3D

Date de publication :
10 avril 2024

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

par **Jean-Claude ANDRÉ**

Mots-clés

innovation | matériaux |
impression 3D | fabrication
additive | procédés | Couplages

Keywords

innovation | materials | 3D
printing | additive
manufacturing | processes |
Couplings

Résumé La fabrication additive est une technique de fabrication numérique qui permet de construire des objets physiques à partir d'un modèle géométrique par l'ajout de matériaux. La personnalisation de masse et la fabrication de modèles libres sont des utilisations de plus en plus courantes de l'impression 3D dans les secteurs de l'agriculture, de la santé, des transports, de la mécanique, etc. En utilisant un modèle CAO comme point de départ, la technologie d'impression 3D peut construire un objet tridimensionnel couche par couche avec différents matériaux.

L'auteur a pris le parti de montrer comment une construction par étapes permet de choisir des matériaux « imprimables », tout en offrant des performances adaptées aux finalités industrielles. [...]

Abstract Additive manufacturing is a digital fabrication technique that allows physical objects to be built from a geometric model by adding materials. Mass customization and free model manufacturing are increasingly common uses of 3D printing in the agriculture, healthcare, transportation, mechanics, and other industries. Using a CAD model as a starting point, 3D printing technology can build a three-dimensional object layer by layer with different materials.

The author has therefore taken the side to show how a step-by-step construction allows the choice of materials that have the possibility of being "printable" first and foremost, while offering performances adapted to industrial purposes. In the same way, the desire to produce 3D objects can be associated with specific processes. [...]

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 : **03/11/2024**

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

© Techniques de l'Ingénieur | Tous droits réservés

Matériaux pour l'impression 3D

par **Jean-Claude ANDRÉ**

DR CNRS

LRGP – UMR7274 CNRS-UL, 1, rue Grandville, 54000 Nancy – France

1. Matériaux et fabrication additive	BM 7 935 – 3
1.1 Généralités	— 3
1.2 Un verrou important : l'imprimabilité	— 3
1.3 Principes de construction d'une pièce 3D	— 3
2. Naissance de la stéréolithographie (laser).....	— 4
2.1 Considérations générales	— 4
2.2 Autres photopolymérisations	— 5
2.3 Contraintes imposées par le procédé	— 5
2.3.1 Effet de l'oxygène en stéréolithographie	— 5
2.3.2 Loi de Stokes	— 6
2.3.3 Répartition de la lumière	— 6
2.3.4 Aspects mécaniques	— 7
2.3.5 Autres considérations	— 8
2.4 Synthèse	— 9
3. Autres technologies 3D – Généralités	— 10
3.1 Rappels sur les technologies de fabrication additive	— 10
3.2 Matériaux et procédés	— 11
3.2.1 Métamatériaux	— 12
3.2.2 Matériaux pour l'impression 4D	— 13
3.2.3 Relations qualitatives matériaux-procédés	— 13
3.2.4 Évolution générale et temporelle du choix en matériaux	— 13
3.2.5 Choix optimal d'un matériau 3D	— 13
4. Imprimabilité des matières et des matériaux 3D	— 16
4.1 Filaments thermoplastiques et extrusion	— 16
4.1.1 Imprimabilité	— 16
4.1.2 Filaments commerciaux	— 17
4.1.3 Extrusion de fluides	— 17
4.1.4 Imprimabilité et performances attendues	— 19
4.2 Poudres thermoplastiques, charges métalliques, minérales et céramiques	— 19
4.2.1 Approvisionnement	— 20
4.2.2 Traitement direct de poudres	— 20
4.2.3 Aspects physico-chimiques et contraintes liées au procédé ..	— 20
4.2.4 Procédé CLAD (ou WAAM, NPJ, etc.)	— 22
4.3 Feuilles et objets massifs	— 22
4.4 Quels matériaux pour quelle technologie ?	— 23
4.4.1 Considérations générales	— 23
4.4.2 Vers un index « matériaux 3D »	— 25
4.4.3 Problème inverse	— 25
4.4.4 Pour aller plus loin demain ?	— 25
5. Conclusion.....	— 26
6. Glossaire	— 26
Pour en savoir plus.....	Doc. BM 7 935

Sur la lancée de la stéréolithographie, d'autres technologies de fabrication additive sont apparues, en même temps que des travaux continuaient à se développer avec plusieurs préoccupations présentes et engagées vers des

aspects plus prospectifs (et profitables) :

- montrer que la fabrication additive s'inscrit dans un processus industriel permettant de réduire le « time-to-market » ;
- trouver de nouveaux débouchés à la technologie : du jeu pour enfants à l'impression d'organes, de la nanofabrication au BTP, du sable à la matière vivante ;
- innover pour maintenir la dynamique et durer : approche incrémentale sur des procédés nouveaux et surtout des matériaux, méta et multimatériaux ;
- réaliser des preuves de concept et communiquer ; les démonstrateurs initiaux se développent dans des structures légères avec un investissement modeste, mais avec une forte créativité ;
- fabriquer des produits finis en un nombre d'étapes le plus limité possible.

Ces éléments cachent en fait un invité incontournable : la matière ou le matériau. Ce dernier, pris au hasard, ne peut normalement pas conduire à la réalisation d'un objet avec une machine 3D « type » commerciale : il y a en effet une relation spécifique ou presque avec le procédé...

Avec le développement rapide des technologies de fabrication additive, on est passé du prototypage à la fabrication avancée de composants fonctionnels dans l'industrie. L'intellectualisation et l'industrialisation des procédés et des équipements de fabrication additive auraient pu constituer des goulots d'étranglement pour les applications industrielles, mais le procédé générique continue à se développer (environ 20 % par an).

Les matériaux, sous différentes formes, jouent un rôle clé dans tous les processus de fabrication additive en raison de leur caractère intrinsèque des formes retenues et de performances contrôlables. Des matériaux métalliques, polymères, céramiques et naturels sont ainsi utilisés dans différents procédés, soit purs, soit sous forme de composites ou d'alliages pour obtenir des propriétés adaptées/augmentées, voire des coûts plus bas relativement à leur usage actuel. Cette diversité a donné naissance à un ensemble de matériaux très variés utilisables en fabrication additive.

Sur cette base, parler de matériaux 3D « tous azimuts » relève d'une grande difficulté pour une présentation un peu raisonnée. C'est la raison choisie par l'auteur d'entrer dans cet article par une approche historique, l'invention de la stéréolithographie (interaction lumière-matière et polymérisation résolue dans l'espace) qui se focalise sur une seule famille de matières (les résines polymérisables). En effet, ce savoir initial a plusieurs avantages :

- il permet de juger de l'attractivité du procédé vis-à-vis de l'industrie ;
- il définit un certain nombre d'avantages (et de limites) relativement aux procédés (soustractifs) de fabrication ;
- il sert de repère comparatif vis-à-vis de nouveaux procédés de fabrication additive.

Si des méthodes de détection d'une innovation un peu révolutionnaire se démarquant de protections industrielles antérieures existent, il faut déjà qu'elle soient connues ! Ensuite, un ensemble de compétences spécifiques est nécessaire, comme la capacité de « traduction » et d'établissement de passerelles entre R&D et applications pour tester la capacité de transformer les découvertes en produits profitables... Ainsi, le fil conducteur de l'article s'appuie sur les évolutions de la demande de progrès techniques (procédés et matériaux) avec d'autres innovations de rupture 3D avec des voies applicatives liées à ces couples procédés-matériaux originaux.

1. Matériaux et fabrication additive

Le grand défi dans les domaines des matériaux et de leur traitement est de toujours améliorer la qualité, la cohérence des processus, la répétabilité et la fiabilité d'une plus grande diversité de matériaux, si possible au meilleur rapport qualité-prix final [1]. Aujourd'hui, la liberté de conception, la personnalisation de masse, la réduction des productions de déchets de fabrication et la capacité à réaliser en une étape des structures complexes, ainsi que le prototypage rapide, sont les principaux avantages de la fabrication additive.

1.1 Généralités

Les applications révolutionnaires de ce mode de fabrication 3D dans les domaines du biomédical, de l'aérospatiale, du textile, des bâtiments, de la domotique et des structures de protection ne peuvent se développer que parce que l'on dispose de matériaux adaptés métalliques, organiques, vivants, etc. Toutefois, pour atteindre un objectif d'utilité, plusieurs procédés spécifiques existent avec quelques défis de traitement (reconception allégée, évitement d'assemblages, métamatériaux, comportements anisotropes, conception par ordinateur et transfert des résultats facilité, etc.). Ces éléments sont inclus au moins partiellement dans cet article.

En effet, tout ne pourra pas être présenté dans un spectre de publications déjà considérable depuis l'émergence de la fabrication additive en 1984 (au total plus de 190 000 publications) avec une concentration sur les classes de matériaux principales.

Depuis, les technologies 3D se sont développées pour atteindre un marché économique crédible avec plusieurs technologies, et surtout un nombre considérable de matériaux (20 % d'augmentation par an). Dans cet article, seules les grandes familles de ces matériaux sont présentées. À l'intérieur de couplages entre procédés et matériaux, ne serait-ce que durant la fabrication, les matières et/ou les matériaux de base subissent une transformation (souhaitée) par le procédé.

Pour rappel, tout processus de fabrication implique des matériaux, homogènes ou non, parce que l'on recherche un certain nombre de propriétés (optiques, mécaniques, biocompatibilité, etc.) d'une part, des fonctionnalités (de couleur, catalytiques, évolutives, etc.) d'autre part à un coût donné. Cette fabrication sert à réaliser des outils et/ou des dispositifs utiles à la société humaine. Tel est le cas des procédés de fabrication additive, déployés aujourd'hui dans sept grandes technologies génériques principales couplant numérique, procédés de fabrication et matériaux.

1.2 Un verrou important : l'imprimabilité

Un élément fédérateur à tous les matériaux et à toutes les technologies 3D est relié au concept d'imprimabilité des matières utilisées dans les différents procédés. Les fabricants proposent, jour après jour, de nouveaux matériaux associés à diverses technologies de fabrication (cf. [2] [3] [4]) ; le lecteur pourra aussi se reporter aux articles de référence présentés dans la rubrique « À lire dans nos bases » de l'annexe) allant même, très récemment, jusqu'à utiliser des éléments lunaires [5] ou des cyanobactéries pour bâtir sur Mars [6], ce qui peut poser la question de savoir si on ne peut pas rendre tous les matériaux imprimables ! C'est d'ailleurs déjà possible avec des matériaux vivants (bio-printing), de la nourriture (3D Food), du sable, du béton, etc. Il n'y a aucune raison de s'arrêter !

Il n'y a pas, à ce jour, de moyens simplifiés de relation entre matériaux et besoin exprimé, juste des cadres généraux ou des « jurisprudences » (et des produits commerciaux accessibles). La petite révolution 3D a au départ été conçue comme indépendante

d'usages spécifiques (stade de la preuve de concept) et se traduit aujourd'hui par la refonte d'un certain nombre de modes de pensée et surtout l'élargissement indispensable du concept 3D à la satisfaction de besoins applicatifs réels.

En dehors de l'élimination immédiate de certains matériaux non facilement « imprimables » selon le procédé (et réciproquement), les relations intimes et multiples entre procédé, matériaux, logiciel imposent de prendre en compte l'ensemble de ces considérations, et c'est bien ce qui est observé.

L'idée basique de la fabrication additive ou de l'impression 3D est présentée sur la figure 1 qui fait intervenir une stimulation énergétique pour réaliser un volume élémentaire appelé « voxel » (possiblement différent en termes de nature du matériau initial) qui, déplacée dans l'espace, conduit à une suite de voxels qui ne devient un objet 3D qu'à la condition qu'existe une cohésion suffisante entre les dits voxels (notion d'imprimabilité).

Parce que l'on savait depuis longtemps « jouer » avec le stigmatisation de la lumière, il a été tout d'abord possible d'imaginer une transformation de la matière par l'énergie portée par la lumière : polymérisation par excitation électronique d'une résine, polymérisation induite thermiquement, etc. Dans ces conditions, on passe d'un fluide (la résine) à un voxel solide. Dans le premier brevet de 1984 [7], les auteurs n'avaient pas encore étudié l'évolution de la résolution induite chimiquement sur le résultat final. Ainsi, la résolution globale est une association entre deux phénomènes interdépendants, l'un lié à la puissance lumineuse présente en un point de l'espace, l'autre à la chimie de polymérisation (et surtout à son exothermicité).

1.3 Principes de construction d'une pièce 3D

En fabrication additive, il peut être avantageux de tenir compte de la direction de construction, de la taille des voxels et de l'épaisseur des couches [8] [9]. L'optimalité de la conception dépend en fin de compte de l'orientation de la fabrication : par exemple, la fabrication de bas en haut peut nécessiter une conception différente de celle de haut en bas, tout comme le choix des tailles des voxels et de l'épaisseur de couches (qui ont déjà un rôle dans la résolution spatiale). Elle peut également limiter le nombre de supports. On fait donc apparaître un nouveau couplage avec la conception numérique de fabrication de l'objet. Pour des méthodes de construction par fusion (filament ou poudres), le procédé doit prendre en compte la température de fusion :

- PLA : 175 °C ;
- ABS : ~ 200 °C ;
- PEEK : 343 °C ;
- aluminium : 660 °C ;
- titane : 1 668 °C ;
- acier : 1 400 à 1 500 °C (en fonction de la composition) ;
- tungstène : 3 400 °C [10] avec des interactions non linéaires entre énergie et transformation des matériaux.

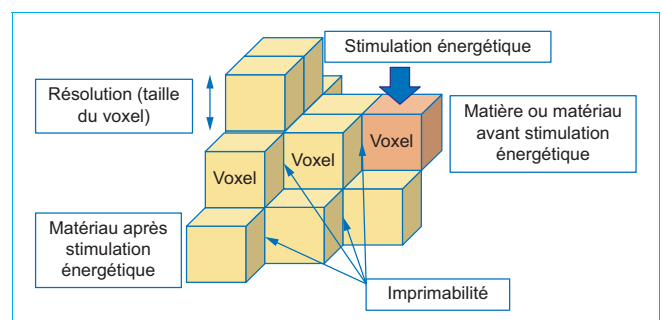


Figure 1 – Les fondamentaux de la fabrication additive (source : JCA)

Aujourd'hui, on dispose d'autres voies de stimulation énergétique (avec sept grandes familles de procédés de fabrication additive) [11], les procédés utilisant la lumière gardent leurs intérêts dans de nombreux domaines comme la microfabrication, la production de pièces prototypes, le bio-printing, la réalisation indirecte de pièces en bonne matière (céramiques, verres, etc.), etc. De manière évidente, les performances qui sont atteintes dépendent des méthodologies et des matériaux qui jouent sur les aspects de résolution spatiale et d'imprimabilité.

La liberté de conception, la personnalisation de masse, la réduction des productions de déchets de fabrication et la capacité à réaliser en une étape des structures complexes, ainsi que le prototypage rapide, sont les principaux avantages de la fabrication additive.

Mais, les applications révolutionnaires de ce mode de fabrication dans les domaines du biomédical, de l'aérospatiale, du textile, des bâtiments, de la domotique et des structures de protection ne peuvent se développer que parce que l'on dispose de matériaux adaptés métalliques, organiques, vivants, etc. avec les bonnes technologies 3D. Ainsi, pour atteindre cet objectif d'utilité, plusieurs procédés spécifiques existent avec quelques défis de traitement (reconception allégée, évitement d'assemblages, métamatériaux, comportements anisotropes, conception par ordinateur et transfert des résultats facilité, etc.). Ces éléments sont inclus au moins partiellement dans cet article.

Nota : il est très peu fait mention ici de matériaux pour l'impression 4D [12] [13] ou d'aspects 3D Food [14], un article spécifique leur étant consacré [BM 7 937].

2. Naissance de la stéréolithographie (laser)

2.1 Considérations générales

C'était en 1984... Alain Le Méhauté s'adresse au CNRS et à l'auteur en parlant de brevets de Battelle, car il souhaite faire en vrai ce qu'il a lu : fabriquer avec des lasers des objets tridimensionnels. Il s'agissait de réaliser, par voies photophysiques et par lasers, des pièces 3D par excitation lumineuse (à deux photons, issus de deux sources lumineuses), exploitant un processus d'absorption non linéaire de la lumière. En se décomposant, des molécules excitées électroniquement (amorçeurs photochimiques) devaient être capables d'amorcer des réactions de polymérisation et par suite être susceptibles de transformer un fluide (le monomère/la résine) en un solide (le polymère). Comme dans une construction par éléments (par exemple des briques appelées voxels), on déplaçait (au moins sur le papier) les faisceaux lumineux et on construisait de proche en proche l'objet souhaité. Par analogie avec le pixel, ce volume élémentaire a été désigné comme étant un voxel (figure 1).

Pour différentes raisons [11], les procédés proposés antérieurement par Battelle n'étaient pas réalisables commodément, même dans un laboratoire de génie photonique. L'idée a été d'utiliser une seule source de photons, la plus stigmatique possible, pour des raisons de résolution surfacique, en s'appuyant sur un concept simplissime, celui d'épaisseur optique μ (transmission de $1/e$ de l'amplitude de la lumière incidente à la distance μ) qui, en particulier, dépend de la concentration d'un produit absorbant, susceptible d'engendrer des réactions chimiques en chaînes (amplification chimique). Alors, avec des sources stigmatiques continues de faible puissance, il était aisé de réaliser sur une couche e d'épaisseur inférieure à μ une polymérisation résolue en surface (pour l'épaisseur e). Donc, tout était disponible pour réaliser, couche par couche, un objet réel, à partir de la connaissance des coordonnées de cet objet, mémorisées dans la mémoire d'un ordinateur qui pilotait

les mouvements de miroirs galvanométriques pour transformer un liquide en solide par polymérisation d'une couche fluide de résines acryliques multifonctionnelles, voxel après voxel (d'où l'expression initiale de fabrication additive). L'ajout d'une deuxième couche, puis d'une troisième, etc. permettait de créer en principe la pièce prototype souhaitée qu'il fallait enfin extraire (et laver) du fluide non phototransformé. Ces différentes considérations font l'objet de la figure 2. L'un des atouts de cette technologie relativement à d'autres procédés d'élaboration émergents et/ou traditionnels est sa capacité à mettre en forme des matériaux en très peu d'étapes, avec une très grande liberté en termes de conception et de production, avec des économies de matière très importantes.

La chance pour cette opération a été de disposer d'un laboratoire ami situé en proximité immédiate (c'est important) qui travaillait sur des macromolécules complexes... On maîtrisait encore mal le photon, cette matière que l'on est allé emprunter, déjà sous forme de résine acrylique monofonctionnelle (le polymère naissant se dissolvait dans la résine !), puis une résine fluide multifonctionnelle (figure 3). Plusieurs situations furent observées :

- le polymère ne se dissolvait plus dans la résine qui lui donnait naissance ;
- le polymère était plus dense que le monomère initial, ce qui entraînait des retraits (comme en fonderie), et si l'objet n'était pas supporté, sa chute (loi de Stokes) au fond du réacteur ;
- une déformation complexe liée au procédé (anisotropie des tensions dans une couche et déformation globale) ;
- une obligation de post-traitement, sinon un vieillissement accéléré pouvant entraîner la destruction en quelques jours de l'objet réalisé (surtout avec des résines très fluides qui conduisaient à des retraits de 17 %).

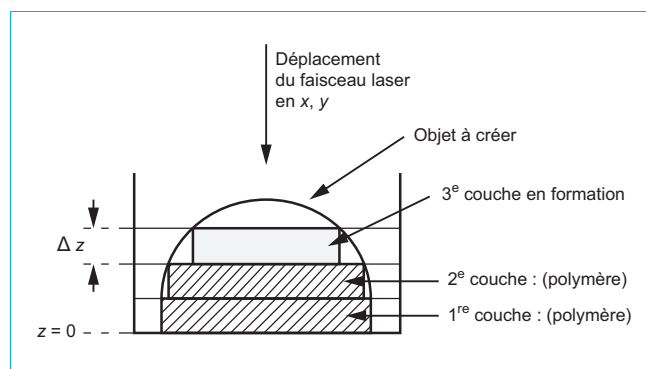


Figure 2 – Schéma historique du principe de réalisation d'un objet couche par couche (source : [11])

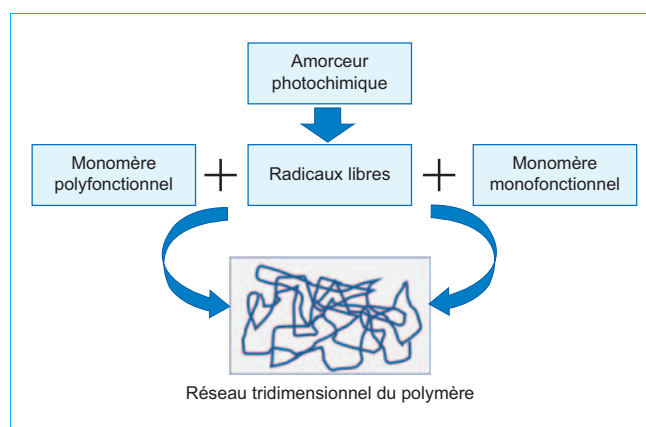


Figure 3 – Polymérisation radicalaire d'acryliques (source : JCA)

Des objets furent cependant réalisés « pour voir » et un premier cahier des charges (ou feuille de route préliminaire) a pu être produit rapidement :

- changer de résine, en choisir une plus visqueuse de type oligomère pour un retrait volumique plus faible ;
- envisager des supports lors de la fabrication de l'objet pour permettre sa construction et pour éviter/limiter les déformations (avec la question de l'élimination des supports) ;
- jouer sur la gestion de la fabrication pour limiter les déformations (déplacement optimisé du faisceau laser) ;
- trouver des moyens de réaliser des couches fines (figure 3), par exemple par le biais de racleurs ou d'autres « astuces » ;
- valider le fait que la polymérisation ne se propageait pas à l'ensemble du volume de résine (résolution chimique inférieure à 0,01 μm [11]) ;
- envisager des étapes de post-traitement ;
- envisager la synthèse de résines fluides et à retrait « acceptable » ;
- élargir le procédé à d'autres résines et à des charges.

Ainsi, à partir de l'idée initiale, en l'absence de laser, en utilisant comme source stigmatique le soleil, une preuve de concept a pu être réalisée (avec des propositions d'améliorations immédiates). C'est sur cette base qu'une « vraie machine » a pu être construite (cf. <https://images.cnrs.fr/video/I191>) et qu'un principe d'imprimabilité d'une matière et/ou d'un matériau a été introduit. Ce qui est montré ici, c'est qu'un matériau est défini par tout un ensemble de propriétés dont une part contribue au procédé (en positif comme en négatif). Des recherches incrémentales ont été engagées, parce que depuis 1984 (premier brevet de André, Le Méhaut et de Witte [7]), la stéréolithographie a continué à se développer, mais avec également des ruptures technologiques, plus ou moins fortes, rappelées ci-après :

- remplacement des lasers commandés par des miroirs galvanométriques par des systèmes de projection surfaciques numériques ou par des masques numériques (évitement du déplacement en x et y). C'est sur cette base qu'a été développé le procédé DLP (pour *Digital Light Processing*, en français « traitement numérique de la lumière » [15]) ;
- amorçage thermique (avec risque de propagation en dehors de la zone concernée à cause de la chaleur produite durant la polymérisation) ;
- procédé « divergent » utilisant une projection surfacique et une fenêtre transparente à la lumière et à l'oxygène (transformation d'un problème en solution originale [16]) ;
- procédés volumiques (plutôt à deux photons) et micro et nano-stéréolithographie (à deux photons) ;

- autres résines qu'acryliques (polymérisations ioniques) ;
- résines chargées (poudres de céramique ou de matériaux conducteurs par exemple) ;
- etc.

2.2 Autres photopolymérisations

À partir d'une composition époxy (monomère cationique) et d'un photoamorceur, la polymérisation sous l'effet d'une irradiation lumineuse conduit à la transformation liquide/solide recherchée. Certaines compositions adaptées aux applications de stéréolithographie à un photon sont disponibles dans le commerce ; elles comprennent des monomères, typiquement des époxy ou des acryliques et l'amorceur. En dehors des composés de cette famille, il est possible d'utiliser un grand nombre de monomères décrits de manière synthétique dans [17]. La figure 4 illustre une partie de ces évolutions en stéréolithographie.

Des compositions adaptées aux applications de stéréolithographie à un et à deux photons sont disponibles dans le commerce, en particulier chez les fournisseurs de machines 3D (cf. Annuaire en annexe). Ces compositions comprennent des monomères, typiquement des résines époxy ou acryliques avec possiblement des charges minérales et l'amorceur. En dehors des composés de ces familles, il est possible d'utiliser un grand nombre de monomères décrits de manière synthétique dans [17].

2.3 Contraintes imposées par le procédé

Les éléments présentés ci-après correspondent à certaines propriétés qui participent à la performance globale des matériaux procédés, tels que mis en évidence en stéréolithographie (SLA) et liés aux résultats des interactions lumière-matière.

2.3.1 Effet de l'oxygène en stéréolithographie

L'oxygène est un inhibiteur puissant de la polymérisation radicalaire des acryliques [11]. S'il peut être consommé dans des zones profondes, il ne l'est pas en surface puisqu'il est réintroduit depuis l'atmosphère. Il existe donc au voisinage de la surface un gradient de polymérisation. Lorsque l'on dépose la deuxième couche, et qu'on la polymérise, le lien se fait grâce à cette zone intermédiaire qui peut, par emprisonnement, être polymérisée. La relation d'une couche sur l'autre est un autre élément d'imprimabilité à prendre

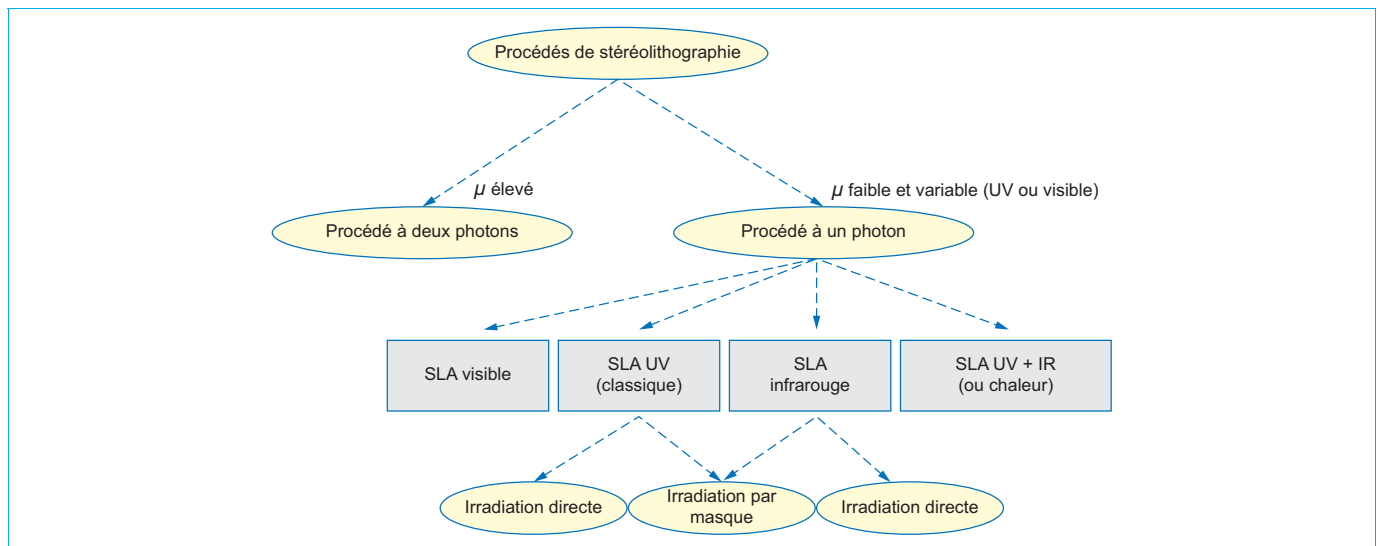


Figure 4 – Différentes méthodes de stéréolithographie (SLA) – μ correspond à l'épaisseur optique (source : [18])

en considération (c'est pour cela que les objets réalisés par cette technologie sont collants).

2.3.2 Loi de Stokes

Il est nécessaire de compenser en impression à un photon/deux photons le changement de volume lié à la réaction de polymérisation en attachant l'objet en construction à un support ou en réalisant un mélange entre la résine et une charge qui dispose d'une viscosité suffisamment élevée pour que l'objet ne « coule pas »... [19]. Dans les dispositifs à un photon, il est nécessaire de soutenir la pièce en construction quand existent des porte-à-faux. Ces substructures peuvent être détruites ou déplacées par la mise en place de la couche supérieure, ce qui impose d'associer à la fabrication de l'objet celle de supports en même matière qui maintiendront l'objet dans cette phase. Cette nécessité conduit donc à un post-traitement avec élimination des supports (quand l'objet le permet !). Ils ont généralement l'apparence de colonnes minces avec quelques petits points de contact avec le modèle pour économiser du matériau (ou de lames minces), du temps de fabrication et de post-traitement. Le nombre de supports, leur emplacement, l'endroit où ils touchent l'objet et leur structure sont à calculer et dépendent de la complexité de la pièce à produire. D'autres techniques 3D nécessitent également la présence de supports.

Dans les travaux de Pétilion [20], en travaillant avec plusieurs bacs de résines acryliques colorées, il a été possible de réaliser des objets colorés dans la masse. Cette méthode un peu fastidieuse illustre la possibilité de réalisation de supports issus de matériaux différents (cas classique dans les méthodes à fusion de filaments).

2.3.3 Répartition de la lumière

2.3.3.1 Imprimabilité en stéréolithographie

Il est possible d'identifier différents critères qui vont définir les qualités des matériaux ou des matières « imprimables » qui, avec une technologie donnée, vont conduire à l'objet souhaité. Le tableau 1 indique des références de matériaux utilisables et commerciaux. Il s'agit essentiellement de matières liquides ou pâteuses acryliques ou ioniques, chargées ou non, plutôt multifonctionnelles, contenant un amorceur photochimique [11]. Le marché existe !

Tableau 1 – Quelques résines applicables dans les différentes stéréolithographies	
Quelques résines commerciales	Références
Résines acryliques et amorceurs photochimiques (cétones aromatiques) : exemples : 2-Hydroxyethyl methacrylate, 1,6-Hexanediol diacrylate, Pentaerythritol tetra-acrylate, etc.	Fluka [21] ; Catalogues de Sigma-Aldrich ; Quick Parts ; Merck ; Arkéma [22] ; Norland [23] ; Yosra [24] ; nanoscribe ; etc.
Monomères de polymérisation ionique	Fiedor <i>et al.</i> [25]
Charges	Catalogue Evonik, 3D Ceram
Materialise	Materialise [26]
Accura AMX Durable Natural 3D printing resin (3D Systems)	Sertoglou [27] ; Additive 3D [28]
Résines chargées céramiques	3D Ceram [29] ; Mélanie [30] ; Chartier et Chaput [31] ; Chen <i>et al.</i> , [32]

En général, une résine commerciale est définie pour une certaine épaisseur et pour une certaine longueur d'onde d'excitation. La figure 5, issue de [33], présente un spectre d'un dérivé de la benzophénone, la 2-hydroxy-4-(3-methacryloxy-2-hydroxypropoxy) benzophenone (BPMA) dans une résine acrylique. Si ϵ est le coefficient d'extinction moléculaire (lié à la substance), l'intensité absorbée I suit une loi de la forme :

$$I(x) = dF/dx = \epsilon \cdot C \cdot F_0 \cdot \exp(-\epsilon \cdot C \cdot X)$$

- où F_0 le flux incident (supposé perpendiculaire à la couche à polymériser),
- x la profondeur,
- c la concentration en l'amorceur.

On définit par épaisseur optique μ l'inverse de $\epsilon \cdot c$. μ est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur polymérisée e (mais $\mu > e$ pour qu'il y ait accrochage des couches entre elles) et dépend de la longueur d'onde. Il n'est ainsi pas toujours possible d'utiliser une résine commerciale avec une machine 3D issue d'un autre fournisseur qui utilise des concentrations d'amorceurs et de longueurs d'onde différentes. Indépendamment de cet aspect, les résines acryliques contiennent un inhibiteur (oxygène en solution, hydroquinone et ses dérivés) qui empêche la polymérisation dans le contenant (et permet le transport et le stockage de la résine). Avec l'apport de la lumière, il faut tout d'abord « consommer » l'inhibiteur pour que la photopolymérisation commence.

2.3.3.2 Épaisseur optique

Avec un procédé à un photon, la présence de charges absorbantes ou non absorbantes limite l'épaisseur optique, mais n'empêche pas la polymérisation. Il est ainsi possible de réaliser des pièces contenant des particules de céramique qui peuvent être ensuite déliantées et frittées (diminution de μ). Avec les procédés à deux photons, il faut, au contraire, atteindre au sein du réacteur la zone à polymériser, ce qui impose de grandes épaisseurs optiques à la longueur d'onde d'irradiation (plusieurs centimètres), pour ne pas dégrader la puissance lumineuse incidente, l'absorption de lumière dépendant de la puissance locale au carré.

Pour faire simple, dans un processus à un photon, un voxel occupe un volume de μ^3 approximativement. μ est défini par le coefficient d'extinction moléculaire dépendant de la substance (compris entre 0 et $10^5 \text{ mole}^{-1} \cdot \text{L} \cdot \text{cm}^{-1}$), la concentration de l'amorceur et la longueur d'onde. μ est généralement voisin de 0,1 mm, mais on peut disposer pour une meilleure précision de valeurs beaucoup plus faibles. Alors, si le temps de polymérisation du voxel ne dépend pas de sa taille, le temps de réalisation de l'objet

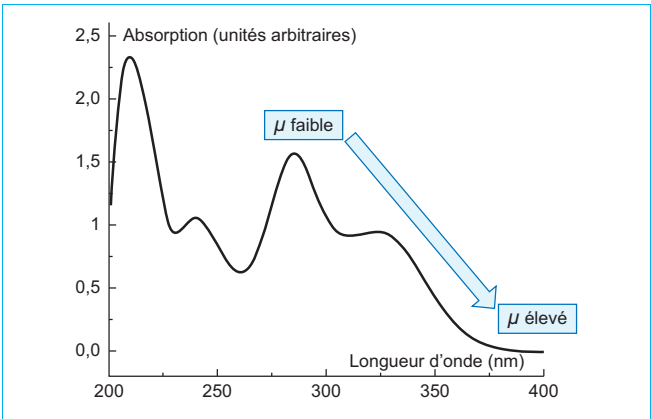


Figure 5 – Spectres d'absorption d'un dérivé de la benzophénone (source : [33])

est proportionnel à $1/\mu^3$ (par exemple si $\mu = 10 \mu\text{m}$ au lieu de $100 \mu\text{m}$, le temps de fabrication est multiplié par 1 000 !).

2.3.3.3 Épaisseur optique de résines chargées

Avec des résines dont la polymérisation sert de structure 3D (notion de pièce verte), il est possible de réaliser par exemple des pièces prototypes. L'ajout à la résine de différents matériaux, dont des particules de céramiques, conduit à des objets qui, par des techniques connues par les spécialistes, sont déliantés puis frittés, ce qui permet d'éliminer la composante organique pour ne laisser que la partie minérale. L'objet est alors produit indirectement en plusieurs étapes [29] [31].

L'épaisseur optique ne dépend pas que de la longueur d'onde comme dans les résines transparentes. En présence de charges, la lumière incidente peut être soit diffusée, soit absorbée, ce qui se traduit par une réduction de μ selon André [11]. L'épaisseur de pénétration E_p est définie, en l'absence d'absorption par la résine contenant son amorceur photochimique, de manière approximative par :

$$E_p = 2 \cdot D_{50} / (3 \cdot Q \cdot C)$$

où les symboles suivants représentent :

- D_{50} : le diamètre moyen des particules (supposées sphériques) ;
- Q : le paramètre de diffusion de la lumière défini par $h \cdot \Delta n^2 / \lambda$ avec :
 - h : la distance interparticulaire,
 - λ : la longueur d'onde d'irradiation,
 - Δn : l'écart des indices de réfraction entre la résine et la charge minérale (avec des indices qui sont de l'ordre de 2) ou organique ;
- C : la densité de charge.

Avec l'amorceur, si μ est l'épaisseur optique en l'absence de charge, l'épaisseur μ_c en présence d'additifs solides s'exprime par la relation approchée suivante :

$$1/\mu_c = 1/\mu + 1/E_p$$

2.3.3.4 Stéréolithographie à plusieurs photons

L'utilisation d'une source laser femtoseconde permet des absorptions biphotoniques et ne nécessite pas de fabriquer un objet par couches ou dépôts successifs. Dans ces conditions, le matériau monomérique ne change pas, c'est l'amorceur qui produit les

radicaux libres porteurs de chaînes qui impose le procédé (ou le contraire). Pour un amorçage simultané à deux photons, comme à un photon, on utilise des molécules de la famille de la benzophénone ; pour un amorçage séquentiel, des molécules plus complexes sont utilisées (par exemple Regehy *et al.* [34]). Pour un amorçage thermique, des produits classiques comme le peroxyde de benzoyle ou l'AIBN (Azobisisobutyronitrile) peuvent être à l'origine d'une polymérisation avec le risque, comme la transformation est exothermique, d'une polymérisation totale. Alors, il n'est plus possible de parler de fabrication additive.

Récemment, Habibi *et al.* [35] ont utilisé des méthodes acoustiques avec focalisation pour produire des bulles de cavitation capables de réaliser des polymérisations radicalaires en chaînes...

2.3.4 Aspects mécaniques

2.3.4.1 Comportement mécanique

Le module de Young, module d'élasticité ou module de traction, est la constante qui relie la contrainte de traction et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope. La loi d'élasticité est la loi de Hooke de la forme :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

- où
- | | |
|---------------|--|
| σ | la contrainte (en unité de pression), |
| E | le module de Young (en unité de pression), |
| ε | l'allongement relatif (adimensionnel). |

L'unité internationale est le pascal (Pa). Cependant, en raison des valeurs élevées que prend ce module, il est en général exprimé en mégapascal (MPa). Gojzewski *et al.* [36] ont défini une cartographie du module de Young de contact lié à l'anisotropie de construction par couche... La figure 6 donne des indications sur les valeurs des modules de Young en fonction de différents types de matériaux 3D.

Rappelons que le module de Young d'un métal est de l'ordre de 100 GPa ou plus, 1 000 GPa pour le diamant... C'est un paramètre important pour des applications mécaniques (et dans le choix des matériaux).

2.3.4.2 Composites

L'un des principaux avantages des mélanges grâce à la conception 3D est qu'il est en effet possible d'obtenir des comportements variés, soit avec une machine multimatériaux, soit à partir d'une

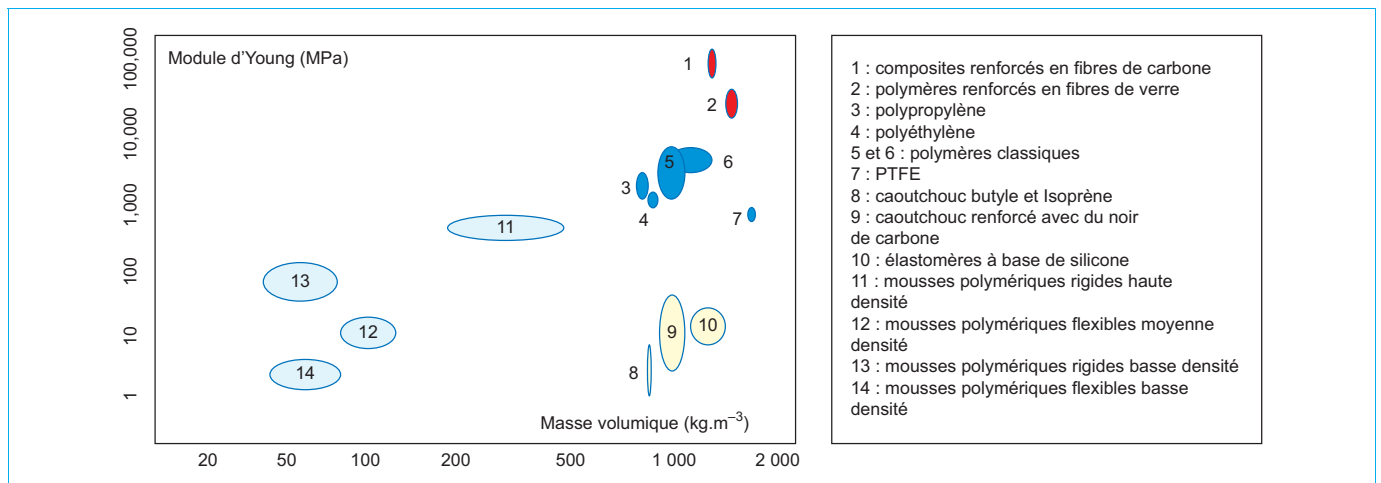


Figure 6 – Cas de polymères classiques selon Lecomte-Beckers (2010) – <http://dhaouadiramzi.e-monsite.com/medias/files/ch-8.pdf>

variation de la répartition intime desdits matériaux en continu (avec un problème de compatibilité entre ces matériaux).

Ce développement a été fortement amélioré par l'impression 3D multimatériaux, où différents matériaux peuvent être placés avec précision dans l'espace 3D ([1] [37] [38]). La conception d'une structure composite ayant des performances localisées dans l'espace de l'objet 3D est possible [39], mais est un défi car elle nécessite la résolution d'un problème inverse avec un comportement non linéaire de matériaux spatialement hétérogènes. Hamel *et al.* [40] ont proposé une approche d'apprentissage automatique pour la conception de telles structures. Dans un article de *L'Usine Nouvelle* [41], il est par ailleurs envisagé l'usage de composites contenant des matériaux autocicatrisants...

Dans les travaux de Petillon [20], en travaillant avec plusieurs bacs de résines acryliques colorées, il a été possible de réaliser des objets colorés dans la masse. Mais, cette méthode un peu fastidieuse illustre également la possibilité de réalisation de supports issus de matériaux différents de celui utilisé pour l'objet (cas classique dans les méthodes à fusion de filaments devenant possible en stéréolithographie).

2.3.4.3 Matériaux auxétiques ou métamatériaux

Les structures en treillis ont des caractéristiques géométriques spécifiques signalées comme ayant un coefficient de Poisson négatif (métamatériau auxétique), c'est-à-dire que l'étirement induit une expansion dans la direction transversale [42] [43] [44]. En analysant le mécanisme de déformation associé au comportement auxétique, il est possible de montrer que le comportement macroscopique résulte d'un effet lié à la structure à cause d'un réseau de renforts architecturés ou périodiques [45] [46] [47] [48]. Les mousses restent le domaine de prédilection des matériaux auxétiques [49]. Une voie de conception consiste à répartir spatialement des matériaux ayant différentes propriétés au sein de structures en treillis pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées. Des techniques avancées d'impression 3D multimatériaux permettent de concevoir et de fabriquer par fabrication additive des structures cellulaires multimatériaux pour lesquelles le module élastique et le coefficient de Poisson peuvent être adaptés indépendamment dans différentes directions (anisotropes) [50] [51].

Un exemple désormais classique est la nacre, constituée d'un assemblage de type brique (aragonite fragile) et mortier (chitine) [52]. Malgré la faible ductilité de l'aragonite, l'arrangement géométrique sur plusieurs échelles confère à la nacre une ténacité supérieure à celle de ses deux constituants pris séparément [53]. Les formes de « collage » peuvent disposer d'avantages spécifiques.

La figure 7, extraite de [54], présente une mousse auxétique mise en forme à partir de diagrammes de Voronoï. Avec ces structures légères, d'aucuns pensent que l'on peut obtenir des structures plus solides avec du PLA (acide polylactique) qu'avec du métal massif. En effet, en dehors de la possibilité d'incorporer plusieurs matériaux, il est également envisagé par Zheng *et al.* [55] de réaliser des structures fractales de métamatériaux. Dans leur publication, ils utilisent sept changements d'échelle, allant de quelques dizaines de nanomètres à des dizaines de centimètres. En conséquence, ces matériaux en micro et nanoréseaux peuvent supporter un poids plus de 16 000 fois supérieur à leur propre poids et présentent une échelle quasi linéaire entre la densité de la structure et son module de Young. La figure 7 illustre un réel couplage entre matériaux et procédés.

2.3.5 Autres considérations

2.3.5.1 Coût

Pour évaluer le coût (cf. <https://www.3dnatives.com/budget-impression-3d-12072021/>) en dehors du temps de conception d'un objet de taille et de forme données, il faut prendre en considération l'amortissement de la machine (qui peut être influencé par l'arrivée d'une technologie plus performante) ; celui de la matière (dépend



Figure 7 – Mousse auxétique (source : [54])

du volume et/ou de l'approvisionnement auprès d'un vendeur de machines et de résines ou d'une préparation personnelle), des post-traitements, de la composante hygiène, sécurité, environnement (HSE) [56], des possibilités de recyclage, etc.

2.3.5.2 Transition de la pièce unique à la (petite) série

Selon Tatar [57], si en 2016 les polymères et le métal étaient les principaux matériaux utilisés par les entreprises pour l'impression en 3D, l'émergence de besoins plus spécifiques conduit au développement de matériaux spécialisés (cires, laywood, polymères, céramiques, biomatériaux, aliments...). Cette nouvelle offre participe à une transition opérationnelle vers la production en série. Ainsi, de nouveaux secteurs peuvent s'approprier des applications pour les transposer à leur cœur de métier [58]. Entre recherche académique et séries, l'accès à des matériaux spécifiques en quantités reliées à la demande (en même temps que leur coût) est posé. Cela signifie qu'il n'est plus toujours possible d'accéder à des masses de matière suffisantes pour une production en série donnée si la pièce le nécessite... Il existe à ce stade un verrou effectif entre la connaissance scientifique et la production commercialisable de matière et/ou de matériaux.

2.3.5.3 Qualité de la fabrication – Robustesse

Les matières et les matériaux peuvent voir leur transformation perturbée par la présence d'impuretés ou par leur environnement. Il peut en découler des ratages de pièces ou des déformations non souhaitées. Ce problème peut être associé à des difficultés de recyclage des matières ou matériaux [59]. L'aptitude des matériaux et/ou des procédés pour l'évitement de ce problème doit rentrer dans les choix optimaux en fabrication industrielle.

2.3.5.4 Considérations environnementales

La figure 8 représente les différents flux de matière et d'énergie impliqués en fabrication additive [60], avec différents effets sur l'environnement et sur l'être humain. Cette figure infirme la nature totalement écologique de l'impression 3D (qui, rappelons-le, est associée à l'informatique qui dispose déjà de ses propres nuisances), mais fait apparaître ces éléments comme nécessaires dans le choix d'une technologie 3D ou d'un matériau [61]. Cependant, on évite de gâcher de la matière.

2.3.5.5 Analyse du cycle de vie (ACV)

C'est, selon NAP [62], une technique d'évaluation des impacts environnementaux associés à toutes les étapes de la vie d'un produit, du « berceau à la tombe » (c'est-à-dire de l'extraction des matières premières à l'élimination ou au recyclage, en passant par le traitement des matériaux, la fabrication, la distribution, l'utilisation, la réparation et l'entretien). On ne dispose que très rarement des ACV pour les matériaux utilisés en 3D. Pour McKinsey & Company [63], jusqu'à quatre cinquièmes des émissions durant la durée de vie d'un produit sont déterminés par des décisions prises au stade de la conception... Ce processus est le plus rentable pour réduire l'empreinte écologique des futurs produits et services.

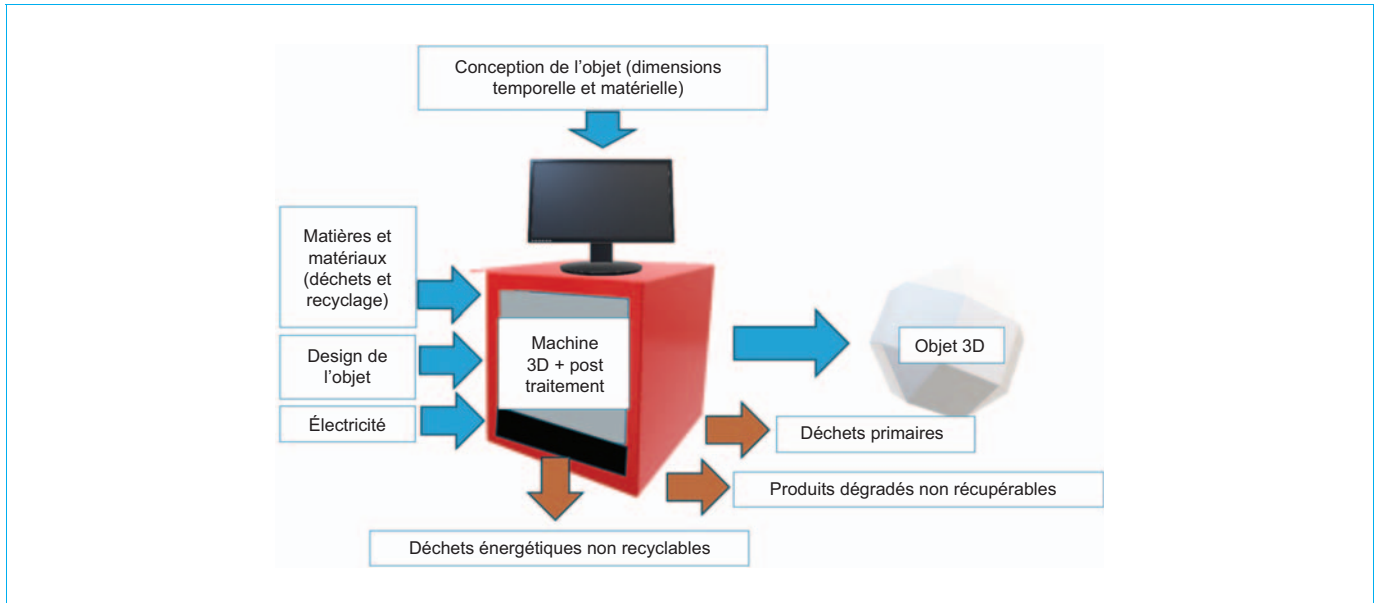


Figure 8 – Flux d'énergie et de matière en fabrication additive (source : [60])

Selon Goehrke [64], les entreprises suivantes impliquées dans la production et/ou la vente de matières et de matériaux pour la 3D se sont engagées à produire plus vert : AMEXCI, BASF 3D Printing Solutions, Danish AM Hub, DyeMansion, EOS, Fraunhofer Institute for Laser Technology (ILT), GE Additive, HP, Materialise, National Manufacturing Institute Scotland, Rusal America, Siemens Digital Industries Software, SLM Solutions, Stryker, TRUMPF, and 6K, etc.

2.3.5.6 Inerties

La stéréolithographie et la photopolymérisation de résines ont été à l'origine du concept d'additivité, avec nombre d'autres méthodes qui s'appuient sur ce concept... Si l'on avait suivi en 1984 les brevets de Battelle, les performances applicatives de l'impression 3D auraient été les mêmes ? En effet, un brevet est une publication qui informe les concurrents qui auraient pu suivre l'idée initiale et, dans ces conditions, la notion d'additivité dans la fabrication 3D n'aurait pas eu le même retentissement avec ses différentes technologies, et surtout avec un champ d'utilisation de matériaux plus restreint. Par ailleurs, même si des résines acryliques ont été utilisées dans la phase de conception (parce qu'elles étaient présentes dans un autre laboratoire), n'ont-elles pas imposé un choix par commodité dans la suite ? N'est-on pas orienté par son passé (même proche) ?

2.3.5.7 « Polissage » laser

Pour améliorer l'état de surface des pièces imprimées, il est possible de les nettoyer et de les polir par laser [65]. Le principe est de chauffer localement la surface du matériau, par absorption du rayonnement laser, de sorte que la température atteinte lisse les pics de topographie de surface (figure 9), soit plutôt par « refusion » que par enlèvement de matière, dans le but d'obtenir une rugosité amoindrie (sur la surface externe de l'objet).

2.4 Synthèse

D'une manière générale, les questions posées dans le processus de fabrication 3D, émergées depuis 1984 à partir de recherches en stéréolithographie et concernant directement ou indirectement les matériaux sont exposées dans le tableau 2.

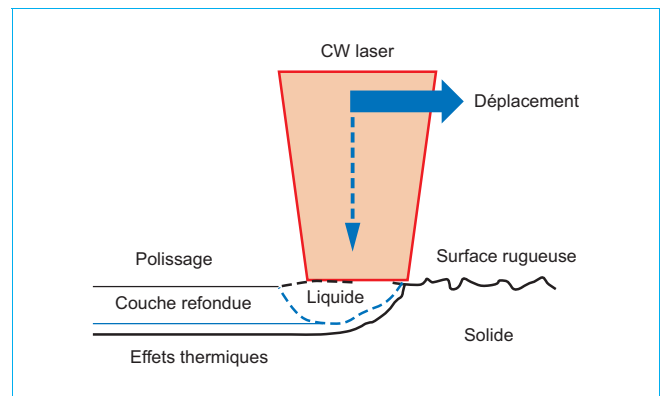


Figure 9 – Principe du polissage laser (source : [65])

En ayant choisi l'exemple historique de la fabrication additive, en l'occurrence la stéréolithographie (SLA), on fait émerger nombre de critères de faisabilité, ou au contraire des contraintes, à prendre en considération pour disposer de manière la plus optimale possible d'un couple matière ou matériaux et procédés. Pour ce qui concerne plus spécifiquement la stéréolithographie (SLA), les matières généralement fluides répondent à un cahier des charges plus important et plus spécifique que les critères déjà évoqués au tableau 2 (tableau 3).

Les industriels fabricants de machines 3D offrent la possibilité d'acheter leurs propres résines qui satisfont dans l'ensemble ce cahier des charges [3] [67]. Ils apportent leur savoir-faire et les connaissances du secteur nécessaires pour évaluer au plus juste les exigences spécifiques des clients et recommander/vendre des produits d'impression 3D les plus appropriés. Les liens entre procédés et matériaux traités dans la même entreprise confèrent à cette dernière une capacité inégalée à fournir « une chaîne de valeur complète ». Se pose alors la question difficile du choix qui dépend de la nature des objets à fabriquer [68].

Avec un marché mondial qui approche en 2024 les 30 milliards € par an et une croissance de l'ordre de 20 % par an, la technologie 3D

Tableau 2 – Éléments de performance des matériaux 3D	
Éléments critiques	Commentaires
Imprimabilité	Réalisation en production directe ou indirecte ; choix du procédé ; transformation induite thermiquement concernée dans la matière ou dans le matériau
Constructibilité de l'objet	Des supports, leur emplacement, leur contact avec la pièce et leur structure dépendent de la complexité de la pièce
Matériaux et multimatériaux	Optimisation : matière, présentation (par exemple, poudres, dispersité, etc.)
Métamatériaux	Modules de Young améliorés
Anisotropie de la fabrication	Effets sur les propriétés mécaniques (choix du procédé)
Tensions internes	Relation matériaux – procédés
Précision	Épaisseur des couches (ou équivalent)
Défauts, vieillissement et fatigue	Idem
État de surface	Idem
Adhérence entre voxels (multimatériaux)	Compatibilité des matériaux et/ou procédés adaptés ; même épaisseur optique
Compatibilité biologique	Matériaux adaptés
Recyclage	Possible pour la résine, pas pour le polymère réticulé
Hygiène et sécurité	Relation matériaux – procédés

a réussi à aller d'une idée toute simple s'appuyant sur des éléments disponibles à l'application. Sa désirabilité industrielle a été telle que la plupart des verrous évoqués dès 1984 ont pratiquement tous sauté... Il faut prendre en considération qu'en dehors du concept d'additivité se cache celui d'une transformation liquide solide avec la stéréolithographie. Or, ce principe (ou son inverse) peut être appliqué à d'autres champs des possibles : fusion localisée d'un polymère fusible, collage de poudres, fusion de poudres, etc. Bref, tout ce qui peut permettre une séparation localisée dans l'espace peut conduire à réalisation 3D avec des avantages et des inconvénients qui rejoignent les éléments présentés dans les tableaux 2 et 3 (pour autant que l'imprimabilité soit à l'œuvre). C'est alors le matériau qui est la pièce maîtresse d'une opération 3D.

À retenir
<ul style="list-style-type: none">• À l'origine, absorption d'un photon imposant une fabrication par couche par photopolymérisation.• Innovation de rupture.• Résolution excellente possible (meilleure que 0,1 mm).• Possibilité de réaliser des objets « verts » avec des résines chargées (puis déliantage et frittage).

Tableau 3 – Critères de choix de matières et de matériaux en stéréolithographie	
Critères de sélection d'une résine	Critères de sélection d'un matériau photopolymérisé
Imprimabilité ; multimatière	Masse volumique ; viscosité ; adhérence (multimatériau)
Épaisseur optique μ et autres qualités optiques	Transparence
Retrait	Microfissures, fissures, vieillissement ; autoréparation ; rapidité de production
Rendement photonique ; sensibilité	État de surface ; aspect général
Précision (liée à la réaction de photopolymérisation)	Élimination (aisée) des supports
Viscosité ou autres critères rhéologiques (effet des charges)	Module de Young ; élasticité ; constructibilité
Recyclage (de la résine)	Allongement à la rupture ; résistance à la flexion
Toxicité (HSE) https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=DC % 2029	Résistance aux chocs ; dureté [66]
Prix (machine 3D et matière)	Transition vitreuse (?)
Solvant du polymère...	Expansion thermique
Post-traitement (dont nettoyage)	Taux de déformation ; cohésion entre couches
Dégradation	Biodégradabilité

3. Autres technologies 3D – Généralités

3.1 Rappels sur les technologies de fabrication additive

Compte tenu de cette « feuille de route », le champ couvert et les aspirations industrielles et applicatives sont très larges [11], et clairement une seule technologie ne peut être à même de la couvrir. Ainsi si, au départ, la stéréolithographie a servi de démonstrateur pour illustrer l'intérêt du concept, d'autres technologies ont émergé, résultant pour une large part de la demande des utilisateurs de disposer d'objets 3D réalisés en « bonne matière », disposant chacune d'avantages et d'inconvénients, non seulement entre elles, mais également vis-à-vis d'autres technologies complémentaires ou concurrentes (cf. figure 10 inspirée de [69]). Aujourd'hui, la palette technologique est plus métissée que jamais avec des applications et services qui demandent à être agencés de façon spécifique suivant la capacité créative de chacun ou du « simple » besoin industriel. D'un point de vue historique, les technologies complémentaires à la stéréolithographie sont apparues approximativement dans les années précisées dans le tableau 4 [11] [18] [61] [70]. Certaines, cependant, sont restées dans les laboratoires de recherche, d'autres sont industrialisées...

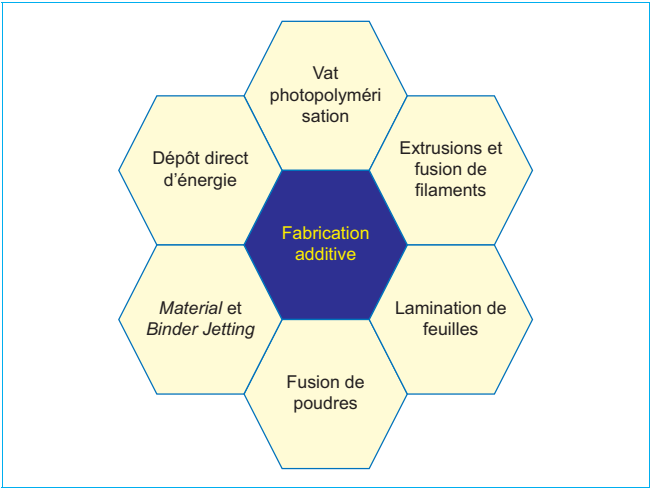


Figure 10 – Procédés classiques de fabrication additive (source : [69]) (cf. 4.3)

Depuis plusieurs années, ces procédés sont à l’origine de nouvelles voies de fabrication additive ; le lectorat intéressé pourra trouver dans la littérature anglosaxonne une grande partie des titres de ces nouveautés ; il s’agit en particulier (et de manière non exhaustive) de *Metal Additive Manufacturing* (MAM), *Fused Deposition Modelling* (FDM), *Selective Laser Sintering/Melting* (SLS/SLM), *Electron Beam Melting* (EBM), *Laser Engineering Net Shape* (LENS), *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM), *Nanoparticle Jetting* (NPJ), *Atomic Diffusion Additive Manufacturing* (ADAM), *Single Pass Jetting* (SPJ), *Stereolithography* (SLA), *2 Photon Stereolithography* (2PP), *Binder Jetting* (BJ), *Carbon 3D SLA* (DLS), *Polyjet* (PJ), *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), *Multi Jet Fusion* (MJF) ; *Digital Light Processing* (DLP), *Laminated Object Manufacturing* (LOM), *Direct Metal Deposition* (DMD), *Drop On Demand* (DOD)... Des matériaux et des mises en forme spécifiques peuvent être associés à ces technologies émergentes.

3.2 Matériaux et procédés

Comme le montre le tableau 4, l’impression 3D permet d’explorer l’espace (du nanomètre au décimètre) avec des matériaux de différentes natures et formes, et avec des volumes très variés. Pour tenter de se concentrer sur les matériaux principaux utilisés,

Tableau 4 – Procédés 3D (les appellations peuvent évoluer selon le temps, l’évolution de la technologie, le pays, la langue, etc.)		
Année approximative	Nom de la technologie	Principe
1984	Stéréolithographie – SLA	Photopolymérisation à un photon par couche résolue dans l’espace https://form-labs.com/fr/blog/sla-dlp-impression-3d-comparee/ – Charges céramiques [71]
1992	Lentilles optiques	Photopolymérisation sur supports fluides
1992	SLA Couleur	Pièces 3D en couleur
1996	SLA masque dynamique	Microstéréolithographie par masquage dynamique
2015	SLA Procédé CLIP de Carbon-3D	Utilisation de l’oxygène comme facilitateur du procédé [72]
2009	Nano-SLA/Micro-SLA	Photopolymérisation à 2 photons
2016	SLA Volumique	Photopolymérisation à 2 photons ; frittage de silice et à <i>N</i> sources
2000	Photoréduction	Photoréduction à 2 photons avec dépôt d’un métal
2006	Pièces optiques	Influence du flux lumineux pour modifier la profondeur de polymérisation
1992	FDM/FFF (<i>Fused Deposition Modeling/Fused Filament Fabrication</i>)	Fusion de filament associé éventuellement à un support que l’on peut éliminer. La matière se refroidit au contact de l’air et se solidifie. Par extension dépôt de pâtes au travers d’une seringue ou d’une vis-sans-fin. Du métal à la nourriture 3D, de céramiques à la construction de bâtiments !
2003	DCP (<i>Dynamic Chemical Plating</i>)	Électrolyse résolue dans l’espace
2012	Électrochimie	Libération d’atomes d’argent ou de cuivre
2016	Xjet	Dépôt de nanoparticules de métal ou de céramique associé à un support que l’on peut éliminer
2016	LIFT (<i>Laser-Induced Forward Transfer</i>) FEBID (<i>Focused Electron Beam Induced Deposition</i>)	Dépôt de nanoparticules sous impulsion laser impulsionnel ou faisceau d’électrons
2016	Gouttes projetées	Métal en fusion dirigé par un champ électromagnétique
2015	<i>Electrospinning</i>	Matériau polymérique chargé électriquement

Parution : avril 2024 - Ce document a été délivré pour le compte de 7200023220 - université de lorraine // 193.50.135.4

Tableau 4 – Procédés 3D (les appellations peuvent évoluer selon le temps, l'évolution de la technologie, le pays, la langue, etc.) (suite)		
Année approximative	Nom de la technologie	Principe
1995	3DP (<i>Three Dimensional Printing</i>) BJ (<i>Binder Jetting</i>) Material Jetting	Étalement d'une fine couche de poudre sur une plateforme suivi via une tête d'impression d'un dépôt de gouttes adhésives colorées (ou non) [73]
2010	Auto-organisation	Chimie suprananoparticulaire et maîtrise des interactions attractives
2006	Origamis	Chimie de l'ADN
1990	SDL (<i>Selective Deposition Lamination</i>) SL (strato-conception – <i>Sheet Lammination</i>)	Collage de feuilles éventuellement prédécoupées (métaux) ou de poudres
2000	SLS (<i>Selective Laser Sintering</i>) SLM (<i>Selective Laser Melting</i>) EBM (<i>Electron Beam Melting</i>)	Frittage ou fusion induits par laser ou faisceau d'électrons en surface plane
2010	CLAD (construction laser additive directe)	Apport simultané de matière et d'énergie lumineuse intense : matière fondue lors de son dépôt par une source thermique très dirigée – https://www.3dnatives.com/clad-technologie-290620218/#!
2018	Tissage 3D	Textile technique pour les propriétés mécaniques maintenu par une résine – https://www.a3dm-magazine.fr/news/toutes-industries/rencontre-3ditex-une-start-tisse-3d [74] [75]
2020	HP Metal Jet	Projection de liant et de poudre métallique, solidifiés couche par couche. Le liant est éliminé et on procède à l'étape de frittage – https://www.3dnatives.com/hp-metal-jet-imprimante-3d-100920183/

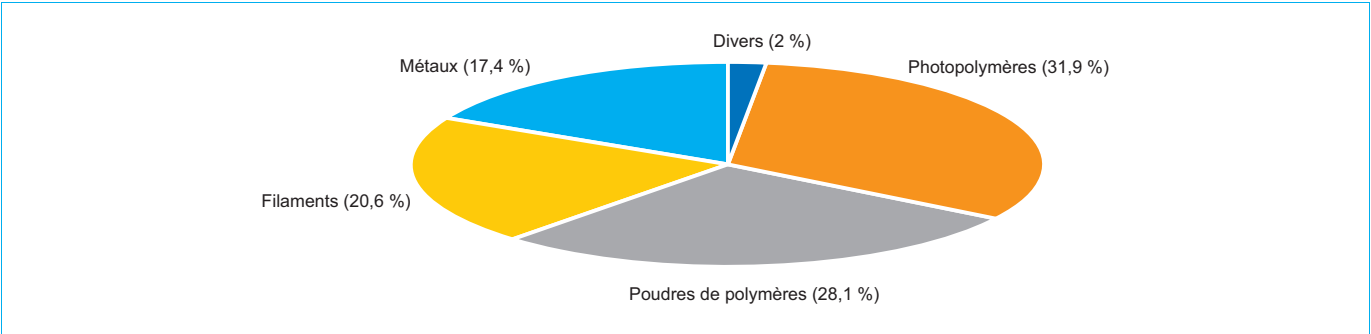


Figure 11 – Marché des matériaux (source : [84])

le tableau 5 – issu initialement de [11], complété par les travaux de Bourrel *et al.* [76], Ngo *et al.* [77], Bhatia et Sehgal [78], Jandyal *et al.* [79], Praveena *et al.* [80], Prakash, Nancharai et Subba Rao [81], Magistrelli [82], Mélanie [83] – présente une synthèse des relations procédé-matériaux sur les différents types de matières et de matériaux disponibles pour l'impression 3D.

Rappelons que, selon la nature du matériau final, l'objet peut être réalisé en une étape, avec ou sans un post-traitement (avec ou sans la nécessité d'ajouter des supports de constructibilité de l'objet 3D) ou nécessite un traitement complémentaire (frittage de charges, recristallisation, détensionnement, croissance de précipités...). La figure 11 issue de [84] donne une indication du marché en matériaux utilisés en impression 3D. Mais, très récemment, Dassault Systems [85] vient de publier une vidéo sur « Choisir le bon matériau d'impression 3D »... Quelques minutes pour (presque) tout savoir !

3.2.1 Métamatériaux

Partiellement abordé, dans le domaine de la conception de produits complexes, en fonction des modes de fabrication, deux grands axes de recherche ont vu le jour : la structure en treillis (figure 7) et la structure complexe. La première offre de grandes possibilités pour répondre aux exigences de haute résistance et de légèreté dans de nombreuses applications industrielles (métamatériaux, matériaux auxétiques, lattices). Il s'agit d'une structure ouverte formée par l'agencement de cellules unitaires désignées, dont les motifs influencent fortement les performances mécaniques. Peng *et al.* [86] avec Hanks *et al.* [87] ont, dans des graphiques de style Ashby ([88] [89]), proposé dix-huit topologies de cellules unitaires différentes qui constituent la maille du métamatériau. Or, les performances des technologies 3D autorisent la réalisation « profitable » de telles structures qui permettent

Tableau 5 – Relation qualitative matériaux-procédés de fabrication additive

	Résines	MV	TP - Polymère thermoplastique	TD - Polymère thermo-durcissable	Métal ou alliage	Céramiques et minéraux	Divers
SLA (stéréolithographie)	+++		+ C	+ C	+ C	+ C	Optique
SLA à 2 photons	+++					+++ C	Micro 3D
FDM/FFF (fusion de filament - Fused Filament Fabrication)		++	+++ C	+ C	+ C		3D food Bricolage
ME (Material Extrusion)		+++	++	+ C	+ C	+++	3D Food BTP
LIFT (Laser Induced Forward Transfer)		+++			++		Bio-printing Électronique Optique
MJ/BJ (Material/Binder Jetting)	++		+ C	++ C	++ C +++ C	++ C	Fonderie
PBF (Powder Bed Fusion)				+	+++	+	
SL (Sheet lamination – Stratoconception)			+	+ (papier ou fibres)	= C	= C	
DED (Direct Energy Deposition)					+++		
SUR (Soluble/unsoluble Reaction)			++		+ C	+ C	Stade laboratoire
SLS/SLM (frittage sélectif par laser)			+		+++	+	
EBM/LMD/CLAD/MPA (Electron Beam Melting, Laser Metal Deposition, construction laser additive directe, Metal Powder Application)					+++		Soudure 3D
C : charges ajoutées + : possible +++ : utilisation principale = : réalisation indirecte MV : matière vivante En vert (à gauche et à droite) : activités industrialisées (plus la couleur est intense, plus cette activité est forte) Pour les différents matériaux, il peut s'agir de matériaux massifs, en plaques ou en poudres							

d'envisager de nouvelles productions industrielles. Ce qui change, c'est la forme de la structure et, par suite, la plus ou moins grande difficulté de réalisation. En dehors de cette remarque, il ne sera ici pas plus fait mention de ces structures. La figure 7 rappelle qu'il est également possible de créer des structures non périodiques.

3.2.2 Matériaux pour l'impression 4D

Des matériaux « intelligents » dotés de certaines propriétés de réaction sous stimulations énergétiques sont également utilisés dans les procédés de fabrication additive pour produire des structures dont la forme ou les performances changent. Ils sont utilisés en impression 4D (trois paramètres d'espace et un paramètre de temps) et font l'objet de l'article [BM 7 937].

3.2.3 Relations qualitatives matériaux-procédés

Buford [90] a établi une liste des principales entreprises (de fabrication de machines, de vente de logiciels, etc.) mais ce n'est qu'une indication approximative, car apparemment, le nombre d'entreprises 3D fait plus que doubler tous les dix ans. Ce qui peut être remarqué à l'examen du tableau 5, c'est que le même matériau peut se retrouver sous différentes formes : comme charge particulière, comme solide (fil, plaque ou objet massif), voire en solution liquide, pâteuse ou solide. Il peut, comme l'indique le tableau 6, être utilisé sous la même forme avec des techniques différentes.

Pour cette raison, c'est plus la forme que la nature intime des matériaux qui va servir de ligne directrice à cet article.

3.2.4 Évolution générale et temporelle du choix en matériaux

Dans le rapport publié par le PIPAME [91] et d'après un rapport d'IDTech [92], les évolutions dans les choix des matériaux mettent en évidence une tendance forte de réalisation d'objets en métal pur ou sous forme d'alliage pour des utilisations directes. Cette tendance était sensible dans les développements de machines et confirme cette progression associée à une certaine reprise en main de la technologie 3D par les utilisateurs ou des fabricants de machines-outils. La figure 12 présente ces différentes évolutions (voir également [93] [76] [94] [95]).

3.2.5 Choix optimal d'un matériau 3D

La possession d'une machine de fabrication additive impose la plupart des critères sélectifs pour les matériaux. Les fabricants de machines fournissent des listes des matières et/ou de matériaux, ce qui permet un gain considérable de temps pour réaliser des pièces 3D (cf. Annexe de l'article). Mais, cela n'autorise pas toujours à aller beaucoup plus loin que ce que propose le fournisseur.

Mélanie [96] rappelle que les poudres polymères pourraient disposer d'un marché de 3 milliards de dollars d'ici 2029 alors que,

Tableau 6 – Matériaux principaux utilisés et technologies 3D

Matières et matériaux	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ABS										
Polycarbonate (PC)										
Alliage PC/ABS										
PLA										
Poly-éther-imide (PEI)										
Acryliques										
Acrylates										
Epoxy										
Polyamide (nylon 11 et 12)										
• Pur										
• Charge de verre										
• Charge de carbone										
• Charge d'aluminium										
• Réticulé										
Polystyrène										
Polypropylène										
Polyester										
PEEK [99]										
Polyuréthane thermoplastique										
Chocolat										
Papier										
Alliages d'aluminium										
Alliages cobalt-chrome										
Or										
Alliages de nickel										
Argent										
Acier inoxydable										
Titane										
Ti-6Al-4V										
Acier d'outillage										
Support gris : Propriétés des matériaux 1 : matériaux amorphes 2 : matériaux semi-cristallins 3 : matériaux thermodurcissables 4 : extrusion 5 : SLA 6 : Material Jetting 7 : fusion de poudre 8 : Binder Jetting 9 : lamination de feuilles 10 : dépôt direct d'énergie Autre couleur : usage spécifique										

pour les résines, cette valeur est estimée à plus de 750 millions de dollars. Elle complète son information par des listes de fournisseurs (cf. Annexe de l'article pour quelques exemples).

Dans beaucoup d'applications, il est utile de disposer de matériaux conducteurs sur des supports isolants. Nanoweb [97] présente des exemples de traitements de surface avec leurs performances. Mais, comme le montrent Yan *et al.* [98], il est également possible de disposer de matériaux massifs conducteurs imprimés « à froid »...

On peut imaginer que les travaux futurs se concentreront sur le développement de structures multifonctionnelles permettant des

fonctions multiples sans assemblage, de matériaux comme des céramiques [77] à ultra-haute résistance, de matériaux à gradation fonctionnelle (avec des verrous liés à la compatibilité des matériaux), etc.

La figure 13 fait état d'évolution des quantités de matériaux consommés en fabrication additive. Il est important de garder en mémoire que la consommation va de pair avec des méthodologies qui tendent à la maturité.

Les matériaux minéraux ou métalliques se présentent en fait sous différentes formes : poudre, pellet, fil, dispersion dans une matrice, feuille/plaque, etc. [101]. Ce que rappelle Magistrelli [84], ce sont les

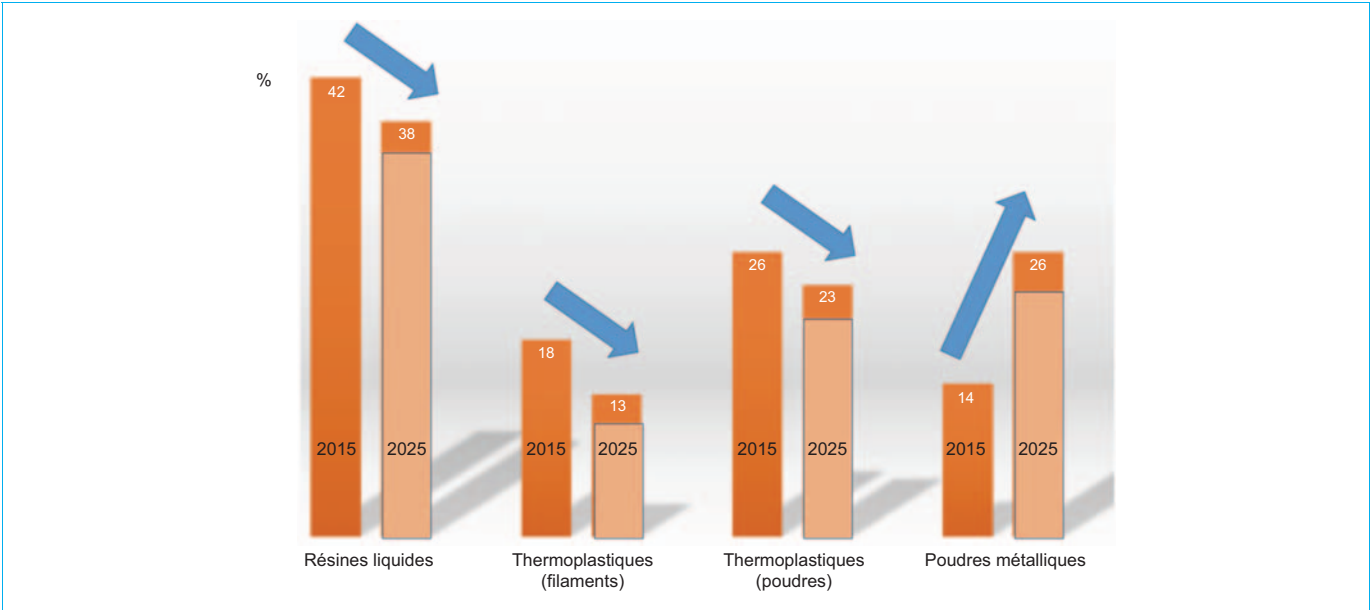


Figure 12 – Estimation des parts de marché en pourcentage des principaux matériaux utilisés en fabrication additive (le bio-printing, le BTP et la 3D Food ne sont pas considérés) (source : [11])

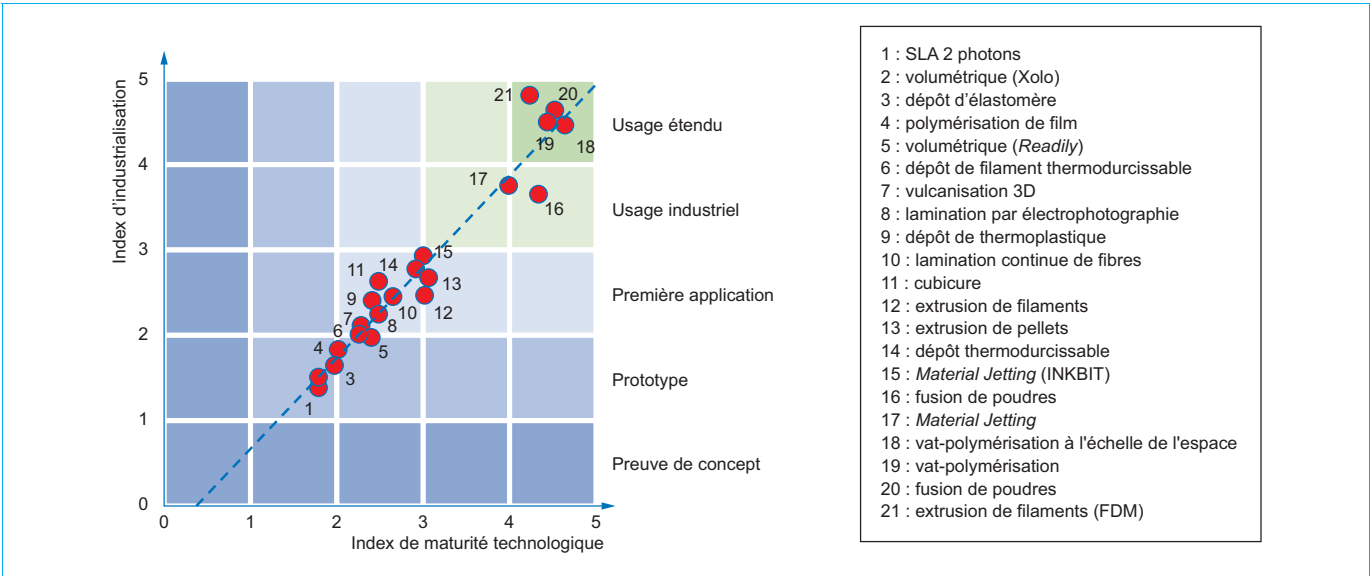


Figure 13 – Émergence des technologies de fabrication additive (source : [100])

coûts élevés des matériaux (principalement en raison des normes plus élevées de pureté et de composition requises pour la fabrication additive) : « Par exemple, les matériaux métalliques pour la fabrication additive coûtent en moyenne 500 dollars par kilogramme, un coût très élevé pour répondre à des applications générales augmentant les coûts du produit final. Les délais de production et les coûts de la fabrication additive métal empêchent toujours la plupart des fabricants de passer des procédés traditionnels à la conception additive, limitant l'adoption à grande échelle de l'impression 3D dans les principales industries d'utilisation finale ». Dilberoglu *et al.* [102] associent ces matériaux au développement du concept d'industrie 4.0 et la littérature récente, pour de petites séries, va dans ce sens.

À retenir

- Grand nombre de procédés additifs, voire d'impression 3D « vraie » avec des matériaux et des formes dédiés et parfois très spécifiques.
- Une quinzaine de grandes familles de matériaux organiques, minéraux et métalliques est concernée sous des formes diverses dont des alliages.
- Possibilité de réaliser aussi des objets dans des matériaux non organiques (céramique, silice, verre, métaux et alliages).

4. Imprimabilité des matières et des matériaux 3D

Le cas des résines utilisables en SLA a été largement présenté avec des résines fluides susceptibles de contenir des charges d'origines diverses. La présente section va se concentrer sur les matériaux classiques à partir de leurs formes, associés aux technologies principales de fabrication additive. Il s'agit pour l'essentiel de « *materials by design* », le matériau n'étant pas une matière première avec laquelle il faut composer, mais le produit d'un dessin.

4.1 Filaments thermoplastiques et extrusion

En 1988, Scott et Crump créent l'entreprise Stratasys pour le développement industriel du procédé FDM (*Fused Deposition Modeling*) qui sera breveté l'année suivante. L'impression 3D par dépôt d'un filament chauffé pour être fondu (FDM/FFF) est une technologie simple dans son principe (mais disruptive) de fabrication additive ; elle permet d'acquérir des machines 3D pour quelques centaines d'euros ! « Cette technologie a fait l'objet de nombreuses innovations concernant la variété des matériaux utilisables ou encore vis-à-vis de l'amélioration des performances de ces appareils (précision, reproductibilité, vitesse d'impression...). [...] Cependant, la technologie la plus répandue, la dépose de filament fondu, souffre de certaines limites. Cette technologie est très souvent restreinte à la production de prototypes du fait d'une compréhension encore incomplète de la relation procédé-architecture-propriétés conduisant à des propriétés mécaniques moyennes » [103].

Pour ces systèmes, la fusion d'un fil, généralement en polymère fusible à des températures de quelques centaines de degrés Celsius, permet une fabrication additive si le support sur lequel l'apport de matière s'effectue est suffisamment solide, d'où une petite optimisation entre la vitesse de déplacement, la température du fil en sortie d'extrudeuse et la forme de l'objet (et parfois son refroidissement). En effet, comme il y a apport de calories par le fil, l'écart de température entre ce dernier et l'objet en construction peut être préjudiciable à la bonne qualité de la pièce, d'où parfois une nécessité de refroidissement par ventilation de la pièce en construction.

Comme on ne cherche pas toujours une précision élevée, les conditions optimales ne sont pas forcément considérées comme essentielles ; généralement, la réalisation d'une pièce ne pose pas (trop) question. La modélisation de l'écoulement du polymère en présence de charges a fait l'objet d'une modélisation sur l'écoulement de fluides complexes en situation de gradients de température [104] [105]. Il faut en effet disposer des paramètres rhéologiques et de la température de fusion du filament pour savoir si le système d'impression permettra le dépôt de matière. Donc, pour faire simple, lorsque l'imprimante est réglée pour un matériau donné, on ne modifie pas les paramètres d'impression tant que l'on garde le même matériau (qui a disposé du même type de stockage).

Dans le cas précédent, celui de la stéréolithographie, il avait été montré que des supports devaient être envisagés pour que l'objet puisse être construit. On se retrouve dans la même situation ici. L'avantage du procédé est que l'on peut utiliser une machine disposant de plusieurs buses d'impression avec différents matériaux. Alors, si l'un de ceux-ci est soluble dans un solvant particulier (par exemple le PVA, alcool polyvinylique, soluble dans l'eau), les autres pas, les supports peuvent être constitués à partir du polymère que l'on peut dissoudre (pour autant que sa température de fusion lors de la construction soit proche, mais pas nécessairement la même que celle des autres matériaux de fabrication). Rupalin, Venkatesh et Arumaikkannu [106] ont apporté des améliorations à cette méthode de fabrication.

De plus, en dehors de cet aspect important de constructibilité, il est possible d'utiliser des matières colorées pour réaliser des objets

polychromes, ce qui est plus facile à réaliser qu'avec la stéréolithographie nécessitant plusieurs bacs de résine colorée avec des phases intermédiaires de lavage [20]. Enfin, certains exploitent la possibilité de refondre les polymères pour les réutiliser après extrusion, voire utiliser des matériaux domestiques en polymères fusibles issus de déchets ménagers pour réaliser des objets avec le procédé FDM [107] [108] [109].

Avec des matières pâteuses, il est également possible d'élargir le champ des applications du procédé pour la fabrication de pièces en céramiques [32], en métal et en nourriture et cuisine [14] [110]. Ce type de procédé est également utilisé pour l'impression en BTP de constructions en ciment [111]. La pièce n'est généralement pas terminée à ce stade : séchage puis cuisson (déliantage et frittage) pour les céramiques et les métaux, cuisson éventuelle en 3D Food, attente de la prise du béton, etc.

L'utilisation d'une extrudeuse permet à une matière pâteuse de passer au travers d'une buse. Comme dans le cas du fil fondu, on dépose une matière rendue fluide. Dans les deux situations, se posent des questions d'optimisation de la vitesse de sortie du matériau « fluide ou pâteux » dépendant des propriétés rhéologiques de ce dernier. Trop fluide, il coule ; trop peu fluide, il peut bloquer l'ajout de matière. Cette situation est valable pour les deux systèmes d'additivité. Dans le cas de la réalisation de mets alimentaires, il peut s'agir d'extrusion réactive, ce qui ajoute quelques paramètres à optimiser puisque l'on passe d'une matière qui en présence de chaleur « cuit » et devient quasiment solide [14].

4.1.1 Imprimabilité

Le filet de matériau fusible placé au-delà de sa température de transition T_c vient se solidifier sur la pièce en construction située à une température inférieure à T_c . Ce processus passe donc par un dépôt de fluide plus ou moins pâteux, le mouillage de ce fluide sur le solide, le transfert de chaleur entre l'ajout et le support permettant dans l'interface de dépasser T_c pour permettre une adhérence considérée comme satisfaisante par l'utilisateur.

La figure 14 illustre les aspects physicochimiques en cause. Ainsi, pour que l'ajout puisse adhérer au support (pièce en cours de création), il faut disposer d'un mouillage des deux parties. Rappelons que la mouillabilité est une caractéristique non totalement propre à la surface du solide, mais à une combinaison un peu plus subtile qui fait intervenir trois énergies ou tensions différentes. Mais, plus l'ajout va s'étaler, plus on décrite la surface comme mouillable, caractéristique étroitement liée à l'angle de raccordement (ou angle de contact) présenté sur la figure 14. Cet angle de mouillage dépend de la tension superficielle. La loi de Cassie indique que si l'angle de contact est compris entre 10° à 90° , alors le liquide est considéré comme mouillant [112] [113].

Si la qualité de la surface du support et de l'ajout en termes de propreté n'est pas suffisante, la tension superficielle des matériaux peut limiter la mouillabilité (qui peut changer avec la température). Or, une extrudeuse mal réglée peut conduire à une pyrolyse

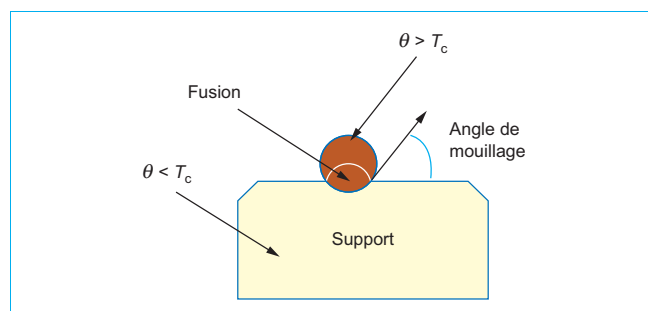


Figure 14 – Aspects physico-chimiques intervenant dans le procédé (source : [11])

partielle du polymère fusible avec formation de particules qui peuvent être responsables de pertes de mouillabilité.

• Hygiène et sécurité

Suite au commentaire présenté précédemment, Merlot et Mazzoni [114] s'expriment sur les risques associés aux procédés de fusion de polymères sous forme de fils ; ils montrent qu'ils sont susceptibles d'exposer les utilisateurs à certaines nanoparticules et à des gaz toxiques issus de ce processus. Comme il s'agit de plus en plus de petites machines à bas coût, et donc à application domestique, il est difficile de contrôler la qualité de l'air dans les lieux contenant une machine 3D, et donc d'estimer les risques subis par les utilisateurs, qui disposent rarement de boîtes à gants et/ou d'une ventilation adaptée.

• Couplage transport-réactivité

Deuxième aspect associé, le transfert de chaleur : si l'ajout a une taille trop faible, sa température peut décroître trop rapidement avant qu'il puisse faire fondre une partie superficielle du support. Il est alors possible de placer le système 3D dans une enceinte thermique pour limiter ce phénomène, d'augmenter la température de sortie de l'extrudeuse (avec les risques présentés ci-dessus). En tout état de cause, on fait apparaître une limitation liée à des aspects rhéologiques pour l'essentiel, en termes de résolution qui est sensiblement de l'ordre de 0,1 mm.

4.1.2 Filaments commerciaux

Le filament plastique, réel consommable, est généralement acheté en bobine de fil [115]. Il se déroule au fur et à mesure de l'impression 3D de l'objet dans un procédé FDM. Il est fondu dans une extrudeuse et déposé sur l'objet en construction. Parmi les matières plastiques utilisées en impression 3D selon [116], deux types de fils se détachent : le fil PLA (poly-(acide-lactique)) et le fil ABS (composé de trois monomères : l'acrylonitrile, le butadiène et le styrène), car souvent utilisés dans les applications domestiques et les imprimantes 3D « Open source », comme les RepRap. Selon cette même source, d'autres filaments plus techniques sont sur le marché (cf. Annexe de l'article et par exemple [117] [118] [119]). D'autres matériaux polymères peuvent être proposés [120].

Les bobines de filaments, qu'elles soient de type PLA ou ABS, disposent de deux diamètres devenus des standards : 1,75 et 3 mm. C'est en fonction des spécifications techniques de l'imprimante 3D que l'on utilise l'un ou l'autre des diamètres.

L'ABS est un polymère caractérisé par une bonne résistance aux chocs et aux écarts de température [121]. Le PLA, un bioplastique issu d'amidon de maïs, est biodégradable [122]. Son utilisation ne nécessite pas la présence d'un plateau chauffant mais est moins résistant à l'eau. Il est même possible de peindre l'objet 3D, le poncer, le vernir, etc. On peut aujourd'hui acquérir des filaments PLA colorés et qui astucieusement voient changer l'intensité de leur couleur [123] sous stimulation. Moetazedian *et al.* [124] proposent des post-traitements qui améliorent les tenues mécaniques des objets.

Il existe également des filaments composites [125] ou en TPU (polyuréthane thermoplastique) [126] [121] [96] [127] [128] [129]. NAP [130] signale que les choix des paramètres d'impression peuvent affecter la résistance, la rigidité et les propriétés fonctionnelles des matériaux imprimés. Par exemple, la rotation de la buse d'une certaine manière contrôlerait l'arrangement des fibres incluses dans le filament, ce qui affecterait la rigidité et la résistance de l'objet (ce qui pourrait être exploité pour de l'impression 4D).

Selon Primante 3D [131] et Mélanie [132], pour une impression 3D de type FDM (dépôt de matière fondue), il peut être utile de prévoir un support qui permet de soutenir la pièce sur le plateau pendant l'impression pour qu'elle reste stable. « Celui-ci se présente sous la forme d'une grille qui permet une meilleure accroche, ou d'une sorte d'échafaudage afin de soutenir certains éléments tels que le bras d'une figurine ou la base d'une fusée. Les matériaux

les plus utilisés sont alors le PVA et l'HIPS (*high-impact polystyrene*) qui tous deux peuvent se dissoudre dans de l'eau ou avec du d-limonène en l'espace de 24 h. Ce dernier s'utilise avec de l'ABS qui possède les mêmes températures d'extrusion et de plateau, de ce fait ce matériau ne concerne que les imprimantes 3D à double extrudeur ».

Au fil des jours, de nouveaux filaments apparaissent sur le marché. C'est par exemple le cas du fil souple, proposé par Ninja Flex. Ce filament aux propriétés étonnantes permet la production d'objets 3D déformables. Les objets produits en « soft PLA » reprennent leur forme originelle après déformation. Quan *et al.* [133], Caminero *et al.* [134], Hou *et al.* [135] proposent d'utiliser des polymères chargés en fibres, ce qui permet d'augmenter les performances mécaniques des objets ; par ailleurs, l'orientation de ces fibres peut être un moyen élégant de renforcement des qualités mécaniques des objets fabriqués. Krill Design réalise ses filaments à partir de déchets alimentaires lyophilisés [136], etc.

Ainsi, des matériaux de toutes sortes et de toutes formes peuvent être utilisés pour autant qu'ils soient fusibles, même des polymères issus de filières déchets [107] ou des métaux et alliages avec un équipement spécifique [137]. Dans cette veine de matériaux fusibles, le verre fondu a été utilisé comme preuve de concept (mais avec un état de surface encore fortement améliorable) dans lequel le fil fondant est remplacé par la fusion d'un fil de verre (changement de température de consigne de l'injecteur) ou par l'écoulement d'un filet de verre fondu qui se solidifie sur la surface en construction. Amini, Barthelat et Ehrlicher [138] proposent une voie plus complexe, mais plus performante. 3ders.org [139] présente quant à lui des objets réalisés en laiton. On utilise alors pour les métaux des fibres de polymères fusibles qui permettent une fabrication 3D suivie d'un déliantage et d'un frittage [140] [141].

L'extrusion de matériaux (MEX) permet d'utiliser une large gamme de thermoplastiques qui sont disponibles commercialement en bobines, satisfont presque toutes les exigences en matière de matériaux pour de nombreuses applications, et ont un prix modéré par rapport aux autres techniques de fabrication additive. L'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et le poly(acide lactique) (PLA), en raison de leur facilité de mise en œuvre, ont été utilisés en premier. Le prix des filaments commerciaux est d'environ 20 à 50 €/kg dans une grande variété de couleurs. Récemment, les alternatives de matériaux ont considérablement augmenté, conduisant à une variété élargie de thermoplastiques disponibles dans le commerce [142]. La figure 15 de ces auteurs résume la disponibilité semi-quantitative des types de polymères les plus importants en tant que filaments.

Outre le PLA et l'ABS, le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polycarbonate (PC) peuvent aujourd'hui déjà être déclarés comme des matériaux devenus standards.

Pour tenir compte des anisotropies et des tensions dans ces objets réalisés par fusion de fil, Shaffer *et al.* [143] proposent un post-traitement à l'aide de radiations ionisantes qui doivent renforcer la cohésion des fils polymériques fondus entre eux. Par ailleurs, si différents types de polymères peuvent être utilisés, dont certains permettant des applications biologiques, signalons la mise au point récente de fils chargés en graphène disposant de propriétés mécaniques et surtout électromagnétiques très intéressantes pour conduire l'électricité, servir d'écran électromagnétique, avec pour finalité la réalisation de capteurs, etc. [144] [145].

Le tableau 7, issu en partie de Koslow [146], André [11] et Al Rashid *et al.* [147], rappelle l'influence d'un certain nombre de facteurs sur la qualité des pièces 3D réalisées selon le procédé FDM. On y retrouve aussi des effets de déformation comme en stéréolithographie.

4.1.3 Extrusion de fluides

Des procédés voisins utilisant par exemple du plâtre encore fluide ou du béton (ciment liquide contenant des charges diverses) sont voisins de ceux présentés ci-dessus [149] [150]. L'adhérence est chimique au lieu d'être physique (solidification), mais le

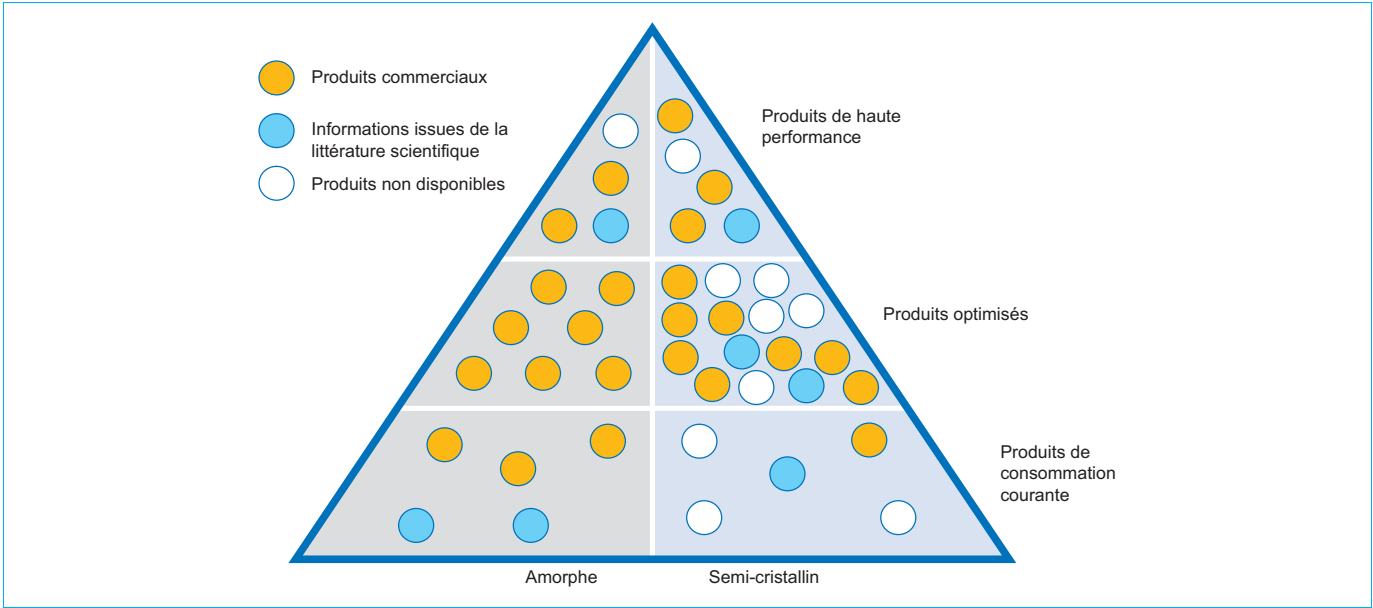


Figure 15 – Polymères utilisés dans le procédé FDM (parmi les principaux : polystyrène (PS), polyéther sulfone (PES), poly-butylène-téréphtalate (PBT), haute densité-polyéthylène (HDPE), chlorure de polyvinyle (PVC), poly-caprolactone (PCL), polyéthylène basse densité (LDPE), polyéthylène linéaire basse densité (LLDPE), Polyéthylène à ultra-haut poids moléculaire (UHMWPE), poly-oxyméthylène homopolymères (POM-H), poly-tetra-fluoroéthylène (PTFE) ou des polyamides (PA)) – cf. Urena *et al.* (2022) pour plus d’informations sur les matériaux polymères en cours d’utilisation (source : [142])

Tableau 7 – Synthèse des critères d’influence sur la performance de procédés FDM/FFF et extrusion			
Paramètre	Performance	Effet visuel	Autres commentaires
Matériaux	Doivent mouiller le solide	Dépend de la résolution	
Température d’extrusion (supérieure à T_c)	Peu d’effet sur la tenue mécanique La résolution baisse quand la température augmente	La qualité baisse quand la température augmente	Problèmes de pollution de l’air induite par la pyrolyse partielle du fil
Vitesse de déplacement/ diamètre du polymère en sortie de filière	Tensions mécaniques longitudinales Écarts à la consigne Adhérence critique pour des faibles diamètres	La qualité décroît avec la vitesse de déplacement	
Polymère chargé en fibres [103]	Tension spécifique dans l’orientation	Pas d’effet observé	Relaxation par chauffage
Orientation de fibres [105]	Anisotropie et impression 4D	Pas d’effet observé	Relaxation par chauffage
Tenue mécanique	Résistance au choc [148]		
Couleur	Pas d’effets observés	Pas d’effet observé	Tenue des colorants à la chaleur
Propreté des surfaces	Accrochage des ajouts Tenue mécanique	Accrochage	
Vieillessement	Besoin parfois de quelques jours pour stabilisation des contraintes (ou recuit), sinon bonne stabilité dans le temps	Pas d’effet observé	
Recyclage	Besoin d’un matériau plastique assez « propre »	Pas d’effet observé	Le matériau peut déjà être issu d’un recyclage
Remarque : si l’on peut inclure des charges de type céramiques ou métaux, la faisabilité de réalisation d’objets 3D à partir de fils métalliques aisément fusibles a été démontrée.			

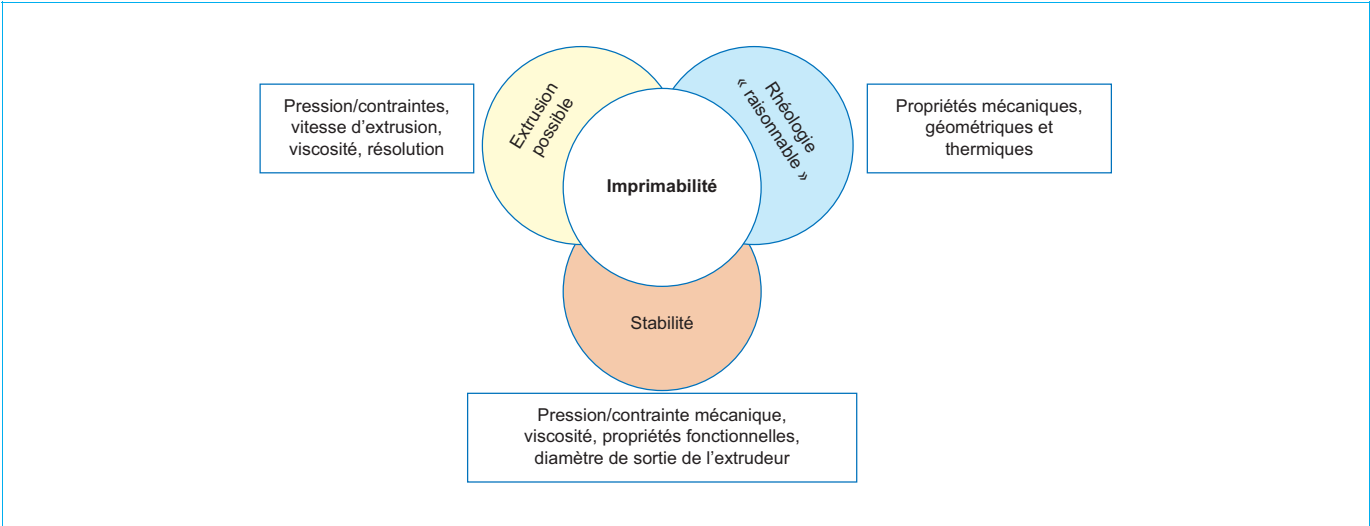


Figure 16 – Critères d'imprimabilité à prendre en considération avec une extrudeuse (source : [142])

principe général est sensiblement le même [151]. Pour rappel, si les voxels des matériaux sont trop « liquides », ils risquent de couler sur la pièce en construction, s'ils sont trop visqueux ou rhéologiquement très pâteux, il y a risque de non-liaison complète sur l'objet et de blocage de la vis de l'extrudeuse... C'est en général la cinétique de transformation chimique qui impose la vitesse d'écoulement du fluide.

Dans un autre cadre, mais utilisant le même principe, celui de la cuisine 4D ou 3D Food [14] [152] [153] : les fluides complexes que sont les aliments sont déposés et transformés par exemple par cuisson dans l'espace. D'autres aliments ou équivalents peuvent être utilisés comme le chewing-gum, le chocolat, etc. Selon André [11], d'autres matériaux peuvent être appliqués dans d'autres domaines comme le bois (en fait une pâte à bois composée à 50 % environ de poussières de bois et de résine polymérique pour réaliser des objets de taille décimétrique), de la pierre et du marbre (assemblage de poudres de pierre et de résine [154]), des couples de cires et de sables pour utilisation en fonderie (cire perdue et moulage artistique), du graphène [137], etc.

On peut également, selon ce mode, utiliser un monomère (ou un oligomère fluide), chargé ou non, qui en se déposant sur ce qui est déjà imprimé se polymérise. C'est le cas des silicones qui utilisent comme catalyseur l'humidité de l'air [155] [156]. Enfin, il est fait mention de gouttes de matériaux qui se déposent sur la pièce en construction : des métaux [157], du verre. La figure 16 [158] rappelle quels sont les critères généraux d'imprimabilité liés à ce mode de fabrication (voir également [133]).

4.1.4 Imprimabilité et performances attendues

Le tableau 8 rassemble les paramètres d'influence pour un choix de matériaux fusibles (hors 3D Food).

4.2 Poudres thermoplastiques, charges métalliques, minérales et céramiques

Un premier concept s'inspire de l'impression à jet d'encre de nos imprimantes, mais au lieu d'utiliser de l'encre, la tête de l'imprimante projette un polymère liquide/une colle pour lier un matériau pulvérulent, construisant ainsi une structure 3D couche par couche, sans avoir besoin en principe de support puisque la poudre maintient la pièce en construction. C'est par exemple le polymère (polyéthylène-imine ou PEI) de liaison qui confère à la poudre sa résistance. Selon Gilmer *et al.* [159], les objets imprimés par jet de liant

Tableau 8 – Critères de choix de matériaux en procédés FDM/FFF et extrusion	
Critères de sélection d'une résine (liquide)	Critères de sélection d'un matériau (solide)
Imprimabilité ; multimatière/ multimatériaux	Masse volumique
Épaisseur déposée ; vitesse de dépôt	Transparence
Retrait ; effet des charges additionnées	Microfissures, fissures, vieillissement ; autoréparation
Température de la transition vitreuse	État de surface ; aspect général
Précision (liée à la transition liquide-solide)	Élimination (aisée) des supports
Tension superficielle et effet des impuretés	Module de Young ; élasticité
Propriétés rhéologiques	Allongement à la rupture ; résistance à la flexion
Recyclage	Résistance aux chocs ; dureté
Toxicité (HSE) – https://www.inrs.fr/media.html?reflNRS=DC %2029 ; [56]	Transition vitreuse
Prix (machine 3D et matière)	Expansion thermique
(Solvant du polymère)...	Taux de déformation ; cohésion entre couches [159]
Post-traitement (dont nettoyage)	Recyclage [59]

sont initialement poreux. D'autres résines peuvent être ajoutées pour renforcer la tenue mécanique. Si l'on passe ici par une impression de fait multimatériaux (particules polymériques et matériau d'adhérence), il convient de disposer d'un minimum de compatibilité entre les différents matériaux. Il en est de même avec des poudres métalliques ou minérales (sable, verres, céramiques). La pièce doit disposer d'un minimum de tenue mécanique pour être déliantée et frittée dans des procédés de type *Binder Jetting* ou DED (*Direct Energy Deposition*) [160]. En revanche, avec le procédé CLAD, l'énergie de fusion et la transition solide-liquide-solide sont traitées au même point de l'espace et au même moment.

Le *Binder Jetting* est pour 3D ADEPT Mag [161] souvent appelée « impression 3D de sable ». Cette technologie permet également de produire des pièces métalliques à moindre coût, avec une plus grande liberté de conception et en moins de temps que les méthodes traditionnelles à condition que ces pièces aient les propriétés finales requises, mais avec des performances généralement moins bonnes que la plupart des autres technologies [162]. Pour le *Binder Jetting* « couleur », le liant coloré est déposé sur le solide granulaire. Dans ces conditions, il s'agit de résines polymérisables à l'air, de polymères en solution dont l'évaporation du solvant induit la cohésion interparticulaire [163], voire de l'eau pour des céramiques [164]. La taille de chaque goutte est d'environ 80 µm de diamètre, ce qui permet d'obtenir une bonne résolution. Après impression, la pièce reste encapsulée dans la poudre pour permettre le durcissement définitif du liant. Des objets en quadrichromie peuvent être infiltrés de résines acryliques fluides et d'enduits pour améliorer l'éclat des couleurs [165]. La réalisation d'une « pièce verte » (avant frittage des poudres agglomérées) utilise des poudres de différentes natures (métaux, alliages, céramiques, etc.), dont les tailles et les formes, les caractéristiques chimiques et microstructurelles sont optimisées.

4.2.1 Approvisionnement

Tous les matériaux fusibles et mouillants sont en principe éligibles dans ces procédés. Il peut s'agir de matériaux pulvérulents en polymère (Z Corporation/3D Systems [166] [167]), de cires, de microparticules [168], de métal (pour les matériaux métalliques, voir par exemple Farinia Group [169] pour les différentes poudres commerciales, SAE International [170] pour le « scalmalloy » alliage métallique aluminium-magnésium-scandium (AlMgSc) utilisé pour l'aéronautique, Kenzari *et al.* [171] pour des quasi-cristaux, Li *et al.* [172] pour l'alumine, Primante 3D [131], Frazier [173] pour l'alumide qui est un mélange de polyamide et d'aluminium, Ampower Insights [100], INSIS [174] pour des alliages métalliques et les métaux, le cuivre et de ses alliages [175] [176] [177]).

Application à l'outillage
L'acier d'outillage est un acier inoxydable martensitique, sous-groupe des aciers inoxydables se caractérisant par une grande solidité et dureté, obtenues après un traitement ultérieur thermique. Ce matériau est destiné avant tout à la fabrication d'outillage rapide (découpage, extrusion...) et de moules dans les domaines de l'aéronautique, l'astronautique et l'automobile ; le titane est de plus en plus employé (automobile, aéronautique et médecine) avec des alliages de titane tels que le Ti6Al4V, plus solides que le matériau original pur et biocompatibles ; l'aluminium via le composant AlSi10Mg (alliage avec du magnésium et du silicium) est à la fois très léger et très solide, etc.). Parmi tous ces matériaux métalliques, le « scalmalloy » offre l'avantage de pouvoir réaliser des pièces à la fois très solides et très flexibles avec une importante résistance à la chaleur.

Pour le Cetim [178] : « Régulièrement utilisées en projection thermique ou à froid, les poudres nécessitent cependant une attention toute particulière quand il s'agit de les employer pour la fabrication additive. Leurs caractéristiques (la coulabilité, la densité, la morphologie, la granulométrie...) dépendent en effet de la machine et de la qualité de la pièce à fabriquer. Pour certaines applications, notamment

dans l'aéronautique, il est nécessaire d'avoir un enrobage des grains original, par exemple du carbure de bore revêtu de cobalt ».

Le choix des matériaux pour produire un acier très résistant à l'usure par le biais de la fabrication additive est cependant encore limité. En élargissant la portée de l'acier sur les marchés actuels, NanoSteel [179] aurait généré des pièces d'usure rentables pour servir à la fabrication d'outillages, l'exploitation minière, l'énergie et les transports industriels dans des applications telles que les pompes, les roulements, et des outils de coupe. L'entreprise a maintenant réussi à produire une densité totale (99,9 %) des pièces sans fissures avec des valeurs de dureté dépassant les 1 000 HV (mesure de dureté Vickers), résistance comparable à un acier conventionnel de type M2, et une microstructure uniforme à l'usure. Le plus important est que cet acier ne nécessiterait aucun post-traitement tel que la compression isostatique à chaud ou un traitement thermique, ce qui permet de réduire considérablement les coûts de production et les durées de fabrication.

4.2.2 Traitement direct de poudres

Plusieurs procédés utilisent une fusion/un frittage de poudre [180] [181] [182] [183] [184] [185] [186] [187] [188]. La poudre est placée à la cote désirée, compressée et raclée pour disposer d'une épaisseur plane et dense. Un système de transformation du milieu pulvérulent résolu en surface permet la fusion selon le trajet défini par l'ordinateur. Il peut s'agir de lasers infrarouges, visibles ou UV, de sources électroniques, etc. La surface étant transformée, on place une nouvelle couche sur l'objet en construction et de proche en proche, l'objet se construit. Les appellations anglo-saxonnes sont multiples : SLM (*Selective Laser Melting*), SLS (*Selective Laser Sintering*) [189], DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*), EBM (*Electron Beam Melting*), etc.

Ces procédés transforment des matériaux pulvérulents poreux de relative faible densité (porosité d'environ 60 à 70 %) en un matériau dense, pouvant atteindre des porosités inférieures à 10⁻³. Il découle de ce constat une obligation de définir, le plus précisément possible, une pièce qui anticipe ces effets tant en termes de réduction de volume que de forme. Comme de surcroît l'opération couche par couche introduit des tensions et des anisotropies, on imagine la difficulté informatique d'atteinte de ce mode de fabrication de plus en plus prisé [186] [190] [191] [192] [193] [194] [195] [196] [197].

Il n'est pas nécessaire dans la programmation, en théorie, de créer des supports pour soutenir la pièce en construction. Notons toutefois que des supports/renforts peuvent être bienvenus pour maintenir l'objet à la forme désirée à cause d'anisotropies et des tensions déformantes induites par le processus de fabrication [198]. Après réalisation finale, la pièce imprimée peut être l'objet d'un post-traitement : recuit thermique [199], élimination des éléments de maintien structurels qualifiant les performances industrielles de l'objet 3D [200]. Relativement aux techniques présentées antérieurement, ce procédé permet la réalisation de pièces métalliques fonctionnelles, ce qui le rend particulièrement attractif dans les industries mécaniques.

À titre d'exemple de « success story », dans ce domaine, citons en France l'opération conjointe de Fives et de Michelin [201] visant la réalisation industrielle de pièces métalliques (et de machines 3D dédiées) dans une coentreprise mise en place entre Fives et Michelin, appelée ADDUP [202] [152].

4.2.3 Aspects physico-chimiques et contraintes liées au procédé

Tout d'abord, en fonction de la polydispersité des matériaux et du réglage des flux d'énergie, il peut y avoir création d'espaces vides dans le matériau constituant l'objet ; malgré tout, cette technologie fournit aujourd'hui des pièces de très bonne qualité avec une précision compatible avec les besoins industriels, en particulier pour les matériaux inorganiques. On examine ci-après les questions associées à l'empilement de poudres et les solutions qui conduisent à la satisfaction des utilisateurs.

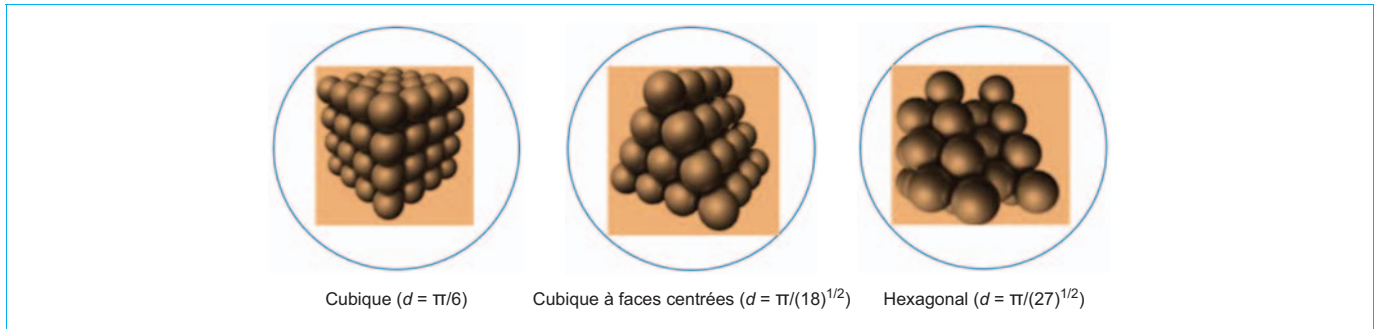


Figure 17 – Densité liées à des empilements réguliers de sphères (selon <http://villemin.gerard.free.fr/Wwwgvm/Geometri/SpheEmpi.htm>)

4.2.3.1 Porosité interparticulaire

Avec des sphères (hypothèse simplificatrice) monodisperses, la porosité interparticulaire ε représente la fraction des volumes entre sphères relativement au volume de l'ensemble considéré. Si ρ_{app} et ρ_{sol} représentent les masses volumiques apparentes et du solide massif, alors :

$$\varepsilon = 1 - \rho_{app}/\rho_{sol}$$

Elle dépend de l'organisation des sphères et est de l'ordre de 45 %. Pour des sphères dures monodisperses, l'espace peut être rempli avec un nombre variable de sphères comme l'illustre la figure 17. Rappelons qu'en mécanique statistique, la fonction de distribution radiale notée classiquement $g(r)$, décrit, dans un système de particules, comment la densité varie en fonction de la distance par rapport à une particule de référence.

De fait, entre les matériaux et leurs formes, il y a, indépendamment des modes de stimulation, une infinité de possibilités... D'où l'intérêt d'utiliser une population plus polydispersée pour gagner sur cet aspect qui, de manière évidente, va se traduire par un retrait volumique conséquent : les petites particules peuvent combler les espaces entre les plus grosses, ce qui diminue ε . Au-delà d'un certain seuil, cet avantage disparaît pour retrouver, pour une dilution infinie des grosses sphères, la valeur initiale de ε [203]. De proche en proche, il est possible de trouver des répartitions de tailles pour que l'espace soit occupé au maximum. Cependant, il n'est pas possible en pratique d'atteindre avec des solides divisés la compacité du solide massif [204] [205].

Les matériaux granulaires s'empilent les uns sur les autres et s'autobloquent au point de parfois connaître un effet de voute qui arrête tout écoulement [206]. Pour rompre cette voute, une vibration peut parfois suffire. Compactés au maximum, les matériaux granulaires conservent entre eux un vide représentant environ 25 % du volume total. La figure 18 représente le cas idéal de l'empilement « apollonien » (Apollonius de Perges ayant vécu au II^e siècle avant Jésus-Christ), loin de la réalité qui doit tenir compte de la morphologie des poudres. Pour une situation de type « Apollonius de Perges », le comportement de l'empilement est pratiquement celui d'un solide massif, ce qui peut poser des problèmes de réalisation de couches de particules nécessaires au procédé. Indépendamment de cet aspect physique, l'état de surface des particules peut avoir un rôle déterminant sur les empilements. Celui-ci peut dépendre du stockage avec de possibles oxydations de surface, de l'influence de l'humidité, etc. [207]. Ce constat est important car il peut avoir un effet sur la qualité des objets réalisés à partir de matériaux pulvérulents.

On comprend donc qu'il n'existe pas de voie simple susceptible d'éviter facilement de manière majoritaire l'emprisonnement de bulles dans le matériau fritté ou fondu, puisque la compacité totale ne peut être théoriquement atteinte. En tout état de cause, les aspects retraits font partie des questions à traiter en termes de programmation de la fabrication de l'objet (*reverse engineering*).

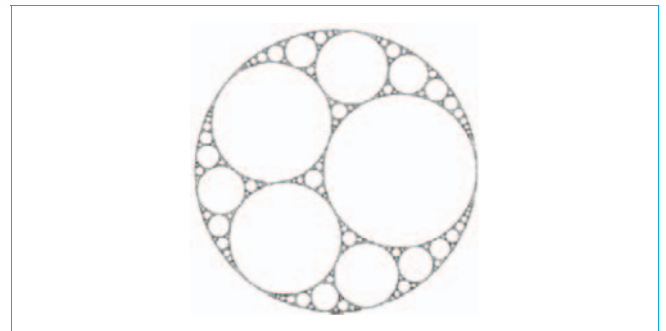


Figure 18 – Empilement apollonien (source : [11])

4.2.3.2 Autres phénomènes

Selon Maamoun *et al.* [208], la fabrication DMLS nécessite des éléments de processus semblables à ceux de la stéréolithographie et du frittage sélectif par laser comme des soutiens, même si les pièces sont frittées dans une couche de poudre car la fusion rapide de chaque couche de métal peut produire des contraintes résiduelles dans la pièce durant le processus DMLS. Les supports maintiennent les pièces en place pour empêcher les déformations pouvant se produire à mesure que chaque couche refroidit. Ainsi, même si dans le principe, les supports ne sont pas nécessaires puisque l'objet en construction est « autoporté », les tensions introduites par le procédé imposent la présence de supports...

Comme l'indiquent Lin *et al.* [209], la fusion de surface peut, en dehors de phénomènes de retrait liés à la porosité de la poudre, entraîner différents défauts : oxydation, porosité résiduelle non souhaitée, hétérogénéités internes, etc. (figure 19). L'utilisation de gaz inertes ou la réalisation de l'objet sous vide peuvent éviter une partie de ces effets non recherchés.

En remarque, Ponche *et al.* [210] ont proposé une méthodologie de « déformation » préalable de l'objet théorique pour tenir compte a priori des déformations liées au procédé. Cette amélioration appliquée à des poudres métalliques est importante, car renforçant l'intérêt de la méthode de fabrication additive pour des applications directes (et non comme pièce prototype). Mais, si l'idée est crédible, faire une résolution de type « problème inverse » reste encore difficile. On est encore souvent obligé de passer par une modélisation expérimentale (réalisation de l'objet définitif à partir d'un « brouillon » déjà largement optimisé).

Cette situation où la fusion locale conduit effectivement à la fabrication additive de l'objet peut, dans certaines conditions superhydrophobes (par analogie avec l'eau) ne pas être atteinte. C'est le cas d'éléments isolés liquides, généralement sphériques, qui s'appuient sur des surfaces hautement désordonnées ou le contraire (figure 20). On atteint également ce phénomène quand la sphère d'un liquide comme de l'eau est mélangée avec une poudre

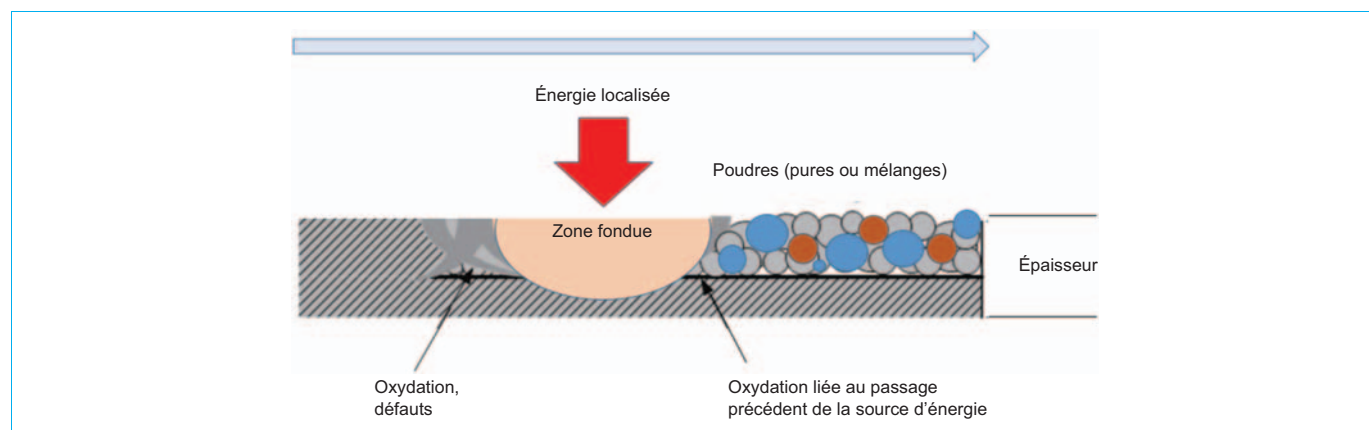


Figure 19 – Défauts de structure induits par le procédé (source : [11])

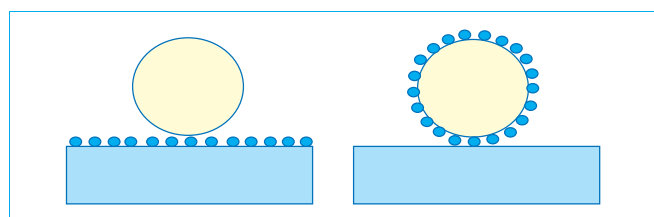


Figure 20 – Conditions de « super-hydrophobicité » (source : [11])

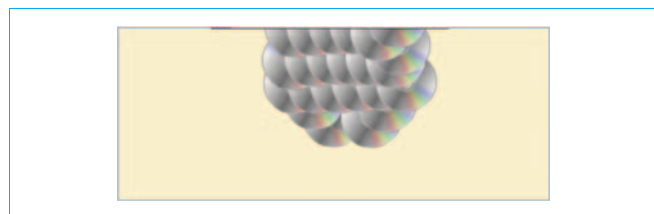


Figure 21 – Hétérogénéités structurales induites par le procédé où chaque zone traitée dispose d'un gradient de fusion/solidification avec un effet des hauteurs supérieures de l'objet sur celles du dessous (source : [11])

hydrophobe qui change la tension superficielle et qui isole ainsi le liquide du support. On parle alors de mouillage nul et d'une goutte en état « fakir » [211] [212]. La présence de particules fines de la matière à fondre ou des produits de dégradation de cette matière (oxydation par exemple) peuvent être susceptibles de se rapprocher de conditions de super-hydrophobicité, ce qui peut conduire à des défauts réhibitoires (et à une possible non-recyclabilité des matières pulvérulentes non impliquées dans la transformation).

Le fait que la fusion permise par la source d'énergie ainsi que la solidification ne soient pas thermiquement homogènes peut induire des structures anisotropes et des tensions dans l'objet réalisé par ce procédé qui introduit une « mémoire » de sa voie de fabrication (figure 21). Il est parfois nécessaire, selon les matériaux utilisés et la fonction de l'objet final, d'opérer des recuits adaptés.

Ainsi, selon Stucky [213], une étude pour l'acier 316L utilisé en fabrication additive montre que :

- « les caractéristiques mécaniques en statique à 20 °C (R_m , $R_{p0,2}$ et allongement) sont meilleures en fabrication additive par rapport à la même nuance issue de fonderie ;
- les caractéristiques en statique à 500 °C sont encore supérieures en fabrication additive aux caractéristiques de fonderie à 20 °C ;

- les caractéristiques mécaniques sont anisotropes en fabrication additive et dépendent du sens de prélèvement de l'éprouvette ;
- la microstructure en peau de pièce en fabrication additive est très spécifique (homogène) et ressemble à la structure d'un cordon de soudure ;
- la microstructure en fabrication additive n'est plus dendritique comme celle de fonderie mais présente une juxtaposition de lignes de cordons de soudure qui reflètent la stratégie de construction de la pièce (trajet du laser) ».

4.2.4 Procédé CLAD (ou WAAM, NPJ, etc.)

Le procédé CLAD (construction laser additive directe) utilise à la fois une source d'énergie (laser infrarouge en général) et des poudres fusibles (même à haute température) arrivant de manière simultanée sur l'objet en cours de construction [214]. La matière pulvérulente injectée est fondue de proche en proche jusqu'à production de l'objet désiré. Les poudres fusibles généralement métalliques sont projetées dans la zone de fusion créée par l'interaction du laser sur le substrat de déposition [11] et il en résulte un dépôt homogène et dense grâce à une fusion localisée dans l'espace, aux caractéristiques situées entre celles des pièces de fonderie et celles de forge. La matière déposée de manière avantageusement monodisperse peut être protégée localement de l'oxydation par un environnement machine sous gaz neutre (cf. [215] [216] concernant la fabrication additive d'objets métalliques). Avec des poudres polydisperses, il peut y avoir des effets thermiques différents liés aux interactions lumière-matière (élevations thermiques différentes), ce qui peut favoriser l'aggrégation particulaire et une porosité faible.

Pour conclure, le tableau 9 rassemble l'ensemble des éléments à maîtriser pour le développement applicatif de ces procédés avec des commentaires.

4.3 Feuilles et objets massifs

Il s'agit des *sheet lamination*, *strato-conception*, *lamination de feuilles*, *Three Dimensional Printing*, *Laminated Object Manufacturing*.

Plus confidentiel et relativement moins appliqué, ce procédé utilise des feuilles ou plaques de diverses matières, feuilles qui permettent à la fois la création de l'objet et, après leur découpe, si nécessaire, de leur « négatif ». Il a l'avantage d'éviter la mise en place de supports pour réaliser un objet, mais une partie de la matière inutilisée est non directement recyclable (à la différence des procédés de type FDM). L'objet ainsi réalisé se retrouve sous forme latente puisqu'il faut éliminer les zones ne contenant pas d'agent de liaison posé sur les différentes couches (papier, polymères, plaques de bois, fibres). Il est plus compliqué que le précédent ; mais, avec des dispositifs de dépôt de colle de type « imprimante jet

Tableau 9 – Éléments à maîtriser pour le développement des procédés de fabrication additive par fusion de poudre

Thème : fusion de poudres/LMD	Accessibilité	Commentaires
Matériaux	+	Grand nombre de matériaux fusibles organiques (polymères), inorganiques (céramiques, métaux, verres...)
Multimatériaux	+	Possible si le mélange est homogène
Couleur	—	Non
Sources	+	Classiques : lasers, faisceau d'électrons
Tenue mécanique	+	Bonne, voire très bonne ; possibilité de recuit
Risques en fabrication	=	Super-hydrophobicité avec des particules de très petites tailles changeant la tension superficielle
Hygiène, sécurité, environnement (HSE)	=	Poudres et particules fines
Recyclabilité	=	Vérifier que la nature des poudres n'ayant pas été utilisées dans le processus gardent leurs propriétés [217]
Procédé CLAD	—	La buse doit atteindre la zone à traiter (limitation de certaines formes)
Multifabrication	+++	Couplage de méthodes d'usinage classique et fabrication additive
Procédé MPA	+++	idem
Post-traitement	+	Possible et assez classique, bien que spécifique

+ : « facile »
 = : « réalisable »
 — : « existence de verrou »
 — : « point de blocage »

Tableau 10 – Relation matériaux-procédés

Procédés	SLA	SLS	FDM/ME	BJ	SC	Dépôts/Charges
Résines	+++	---	---	+++	---	++
Résines chargées	+++	---	---	+	---	++
Poudres métalliques	---	---	---	+++	---	++
Poudres de céramiques	---	---	---	+++	---	++
Polymères	---	+++	+++	+++	++	++
Polymères chargés	---	+++	+++	+++	++	++
Métaux	---	---	---	---	+++	---
4D Printing	++	++	++	++	---	---
Bio-printing	+	---	+	++	---	---

Rouge : usage impossible
 Vert : usage optimal

d'encre » et des feuilles de faible épaisseur, on peut atteindre des précisions de quelques dizaines de micromètres. Quand il s'agit de plaques métalliques, le lien entre plaques se fait généralement par des techniques mécaniques classiques (vissage par exemple).

Il est également possible d'utiliser des couches successives de poudres métalliques ou céramiques qui sont agglomérées par un liant organique projeté par une rampe d'impression multijet. La pièce obtenue est ensuite frittée dans un four à haute température. Cette opération élimine le liant et agglomère les grains métalliques [179]. Il est aussi possible d'utiliser des poudres de polymères contenant des charges métalliques ou minérales, de les fondre selon ce procédé, et ensuite d'éliminer le polymère, puis de réaliser un frittage [141]. L'aluminium, l'acier et de nombreux alliages

peuvent, selon cette référence, être utilisés. Retenons que la question du collage de plaques métalliques entre elles n'est pas encore totalement résolue.

4.4 Quels matériaux pour quelle technologie ?

4.4.1 Considérations générales

De manière très réductrice, sont placés dans le tableau **10** les matériaux à considérer en relation avec les technologies 3D. Dans ce tableau, « SC » signifie « fabrication par voie chimique » [11].

Tableau 11 – Résolutions approximatives associées aux couples matériaux – procédés [77]									
Procédé	SLA	FDM/ME	BJ	PBF	DED	SLS/SLM	LIFT	SL	CLAD
Précision approximative	0,1 - 10 µm	50 - 200 µm	5 - 250 µm	80 - 250 µm	250 µm	50 µm	> 0,1 µm	Variable	> 0,1 µm

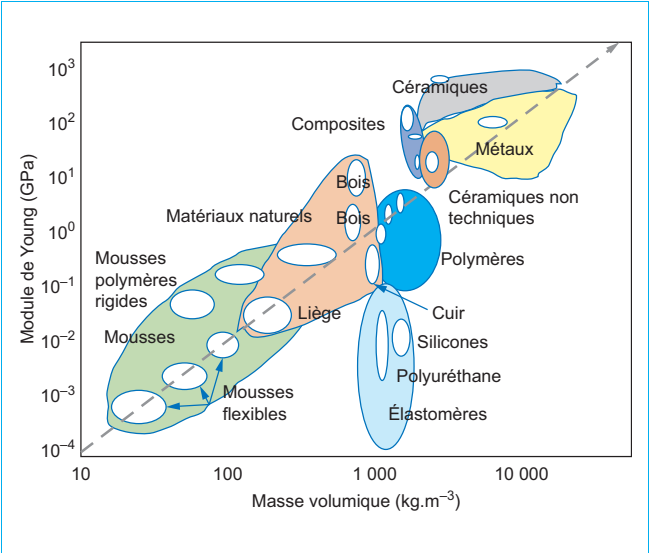


Figure 22 – Carte de performance d'Ashby : Module de Young/Masse volumique (source : [88])

Par ailleurs, le tableau 11, extrait de Ngo *et al.* [77], indique des valeurs de précision moyennes obtenues avec les différents matériaux présentés dans cet article.

En remarque, chaque taille de poudre ou chaque taille du mode de transformation de la matière définit peu ou prou la résolution.

Dans les choix de matériaux se situe généralement celui associé à la performance mécanique, souvent exprimée par le module de Young. Celle-ci peut fortement varier selon les matériaux comme l'indique la figure 22.

Cependant, la « simple » sélection d'un matériau sur des critères fournis par la littérature, comme signalé ci-dessus, n'est qu'une première étape pour obtenir un objet 3D disposant des propriétés principales recherchées comme :

– **Imprimabilité** : par exemple, Bourell *et al.* [76] définissent les liens créés lors de la fabrication entre voxels. Plusieurs voies de liaisons peuvent être envisagées :

- liaisons assistées par un changement de phase qui peut être accompagné par la présence d'un adhésif ; liaison par évaporation ou hydratation ; assemblage par fusion d'un matériau sur une poudre moins fusible [218] ;
- liaisons par voie chimique : elles peuvent avoir lieu entre particules pendant que l'on peut disposer d'une photopolymérisation. Des liaisons peuvent se créer par transfert de matière à l'interface entre voxels lors d'un frittage ou lors de la fusion d'un matériau ;
- liaisons mécaniques comme des rivets [128].

– **Élimination de défauts** :

- lors des premiers essais (1984), le retrait volumique lié à la polymérisation des résines acryliques très important entraînait des déformations, des fissures, voire la destruction de l'objet réalisé en stéréolithographie [11] ;

- lors de la construction, plusieurs défauts physiques tels que la porosité, des microfissures ou un mauvais état de surface peuvent apparaître ; la contamination des matériaux a un effet sur ces phénomènes ;
- dans le cas de mélanges, lors de la fusion locale de poudres, par diffusion atomique, des hétérogénéités peuvent apparaître dans une couche entraînant des anisotropies dans le matériau, nécessitant pour les éliminer des post-traitements ;
- état de surface : en dehors du procédé de fabrication, de nombreuses autres raisons peuvent contribuer à la qualité de la surface de l'objet ;
- dégradation chimique ou matériaux pour l'impression 4D : la dégradation peut correspondre à une dépolymérisation, à la formation de films d'oxyde ou d'inclusions de métaux, ce qui peut nuire aux propriétés physiques et mécaniques des objets. Certains polymères sont sensibles à leur environnement et leur forme ou leur fonctionnalité est exploitée en impression 4D [13].

– **Propriétés mécaniques** : elles sont concernées dans la plupart des couples procédés-matériaux (pour tous les matériaux) et dépendent de l'évitement de la production d'imperfections, en particulier à cause du procédé lui-même d'additivité. Par ailleurs, l'élasticité comme la ductilité d'un matériau dépend fortement de la présence de microfissures internes, d'un recuit insuffisant, etc.

– **Résistance aux chocs** : l'existence de directions préférentielles dans le matériau 3D peut exister pendant qu'il est possible de réaliser des mousses organiques et autres métamatériaux [219].

– **Fatigue** : la photopolymérisation [11], la solidification rapide d'une masse fondue accumule des contraintes résiduelles dues au retrait. Le refroidissement peut entraîner des contraintes résiduelles supplémentaires (intérêt d'un post-traitement).

– **Propriétés optiques** : les propriétés sont fonction de la transparence des matières ou des matériaux de départ et des traitements que l'on fait subir à l'objet (polarisation de lumière, indice de réfraction, etc.).

– **Durabilité** : elle dépend de l'alliage métallique utilisé et de la géométrie de la pièce [100] [217].

– **Performances « augmentées »** : l'usage de plusieurs matériaux dans le même objet peut conduire à des performances qu'il n'est pas possible d'atteindre par d'autres technologies de fabrication avec le même degré de résolution. La fabrication d'objets en métamatériaux permet des propriétés mécaniques renforcées pour des fabrications plus complexes rendues possibles par les procédés 3D [13] [53] [220] [221] [222] [223] [224] [225].

– **Résolution** : elle dépend à la fois des matériaux et du procédé (tableau 12).

– **Autres points à prendre en compte** : coût, forme et polydiversité, qualité du stockage, facilité d'approvisionnement, facilité de fabrication, post-traitement, hygiène, sécurité et environnement (HSE), performance environnementale et analyse de cycle de vie, recyclabilité ; réusage, biodégradabilité [226], etc.

– **Bases de données** : avec un grand nombre de procédés, de matériaux, de performances recherchées, il paraît difficile, de proposer dans un domaine en forte évolution un indicateur pour les matériaux adaptés à une fabrication spécifique. En revanche, en dehors d'une sélection à gros trait, des bases de données réalisées à partir des données expérimentales validées pourraient avoir un grand intérêt pour les utilisateurs.

Tableau 12 – Indices concernant la fusion laser de polymères [228]

Matériaux polymères	Indice
Polyamide 11	8,4
Polyamide 12	8,3
Polyuréthane thermoplastique	7,4
PEEK	6,4
Polyéthylène	6,4
Polystyrène	8,7

4.4.2 Vers un index « matériaux 3D »

Depuis 1984, le domaine a atteint un niveau de maturité qui, selon Bourrell *et al.* [76], permet d'envisager un indice semi-quantitatif de « qualité » de matériaux utilisables pour la fabrication additive.

Cet indice serait une mesure du succès global avec lequel un matériau pourrait être traité par fabrication additive pour un procédé donné. Parmi les critères, il est envisageable d'inclure la facilité avec laquelle la matière première appropriée est formée, la possibilité de traitement, la microstructure résultante et les propriétés associées, la finition de surface/la facilité de finition [227], la précision géométrique et les exigences de post-traitement, etc.

Les chercheurs, les utilisateurs et les fabricants ont identifié des matériaux « standard », notamment le polyamide et le Ti-6Al-4V pour la fusion sur lit de poudre, le PLA et l'ABS pour l'extrusion de matériaux, les époxydes et les acryliques pour la photopolymérisation en cuve, etc., qui pourraient servir de point de comparaison pour les autres matériaux. « L'attribution d'un indice qualitatif ou semi-quantitatif, à l'instar des autres indices de fabrication, fournirait aux concepteurs et aux développeurs un outil utile pour sélectionner les matériaux destinés à des applications spécifiques, en particulier lorsqu'un choix doit être fait entre le traitement [spécifique d'impression 3D] et le traitement conventionnel pour un matériau donné » [76].

Verbelen [228] a proposé un indice de fabrication semi-quantitatif pour le seul frittage laser de polymères avec pour considération principale l'écoulement de la matière fondue (viscosité à cisaillement nul, température de la matière fondue, comportement de coalescence), la morphologie de la poudre, la formation et l'écoulement de la poudre, la cristallisation (différence entre la température de fusion et la température de cristallisation, retrait) et la recyclabilité/dégradation de la poudre. À partir de pondérations sur ces paramètres, il a ainsi été obtenu un indice synthétique (qui s'échelonne de 1 à 10) présenté dans le tableau 12.

De leur côté, Gradl *et al.* [229] ont proposé dans le cas des applications spatiales une méthode holistique pour un choix optimal des matériaux 3D. Une réflexion sur les choix de critères significatifs pourrait donc être conduite, même si elle ne peut être réellement exhaustive.

4.4.3 Problème inverse

« Les problèmes inverses sont des situations grâce auxquelles on cherche à déterminer les causes d'un phénomène en fonction de l'observation de ses effets » [230].

Selon Zhou *et al.* [231], l'analyse de la fiabilité et les compromis entre la sécurité et le coût – avec des données insuffisantes – représentent un problème inévitable au cours de la première étape de la conception structurelle. Or, les industries manufacturières et leurs investisseurs cherchent toujours à améliorer les techniques afin de

réduire les coûts et l'énergie consommée et d'accroître leurs capacités. Trouver rapidement le bon matériau avec la bonne machine rentre dans cette préoccupation. Alors, le problème inverse de la conception des interactions entre composants pour cibler une structure émergente est fondamental pour de nombreuses applications.

Pour Hernández-Castellano *et al.* [232], l'industrie 4.0 a forcé le domaine 3D à améliorer l'intégration des processus de conception et de fabrication. Pour atteindre cet objectif, une méthodologie, basée sur la conception pour la fabrication et l'assemblage et les connaissances organisationnelles, a été créée par son intégration dans un processus de conception existant : le cadre de variables fonction-comportement-structure. Cette méthodologie, appelée « sélection du processus de fabrication intégrée au processus de conception », a été incluse dans un matériel pédagogique. Mais, à la connaissance de l'auteur, c'est l'un des rares exemples de traitement inverse de la situation matériaux/procédés. Il faut reconnaître que le nombre de matériaux proposés (ou de familles de matériaux) commercialement n'est pas si grand !

4.4.4 Pour aller plus loin demain ?

La construction d'un « corps de connaissances » concernant les propriétés des matériaux et des matières utilisés en impression 3D (données de référence, élimination de la variabilité, recyclabilité, etc. [233] est à atteindre. En effet, les interdépendances nombreuses entre matériaux et procédés complexifient la situation. NAP [130] propose alors de réfléchir aux questions suivantes dans le sens direct (*bottom-up*) :

- Les approches appliquées à la conception de procédés et de matériaux ont pour but d'améliorer les capacités de modélisation prédictive de la fabrication additive, en particulier lorsqu'elles sont combinées aux savoirs de mécanique. Ces modèles prédictifs permettent-ils une réduction du coût et du temps de développement du concept au produit final ? Peuvent-ils être utilisés pour compléter les tests expérimentaux ?
- Comment concevoir des méthodes prédictives concernant les propriétés pour des mélanges (multimatériaux) ?
- Quelles sont alors, pour aller plus loin, les approches théoriques et computationnelles qui doivent être proposées et développées pour comprendre pleinement la fabrication additive et ses différentes technologies – associant des matériaux imprimables depuis le mélange des matières premières jusqu'aux dépôts (construction) et à la consolidation (post-traitement) – et l'évaluation des caractéristiques du produit final (par exemple, quel est l'effet des microstructures sur les propriétés ; quelles sont les contraintes résiduelles ; les effets de trempe, etc.) ?
- Existe-t-il des modes d'intégration robustes pour coupler ces techniques de modélisation ?
- Quelles sont les questions ouvertes les plus importantes dans le domaine des matériaux et de la mécanique, et des sciences qui participent à ces connaissances ? Quels sont les défis techniques à relever pour les approches théoriques et computationnelles prédictives afin de permettre l'adoption généralisée de la fabrication additive ?
- Quel est l'apport des recherches interdisciplinaires, en particulier alliant procédés et matériaux, dans ce développement (matériaux, mécanique et calcul multiéchelle) ?
- Quelles sont les possibilités de partenariats public-privé pour faire progresser les connaissances des relations entre procédés, mécanique et matériaux ?
- Quel peut être l'effet des normes relatives aux matériaux dans une approche scientifique du développement et de la mise en œuvre des matériaux ?
- Etc.

Dans ces conditions, pour gagner en performances [234], la figure 23 [235] présente le double questionnement : aller du procédé et du matériau jusqu'à la performance de l'objet imprimé ou partir de la performance pour trouver les meilleures conditions (commandes optimales « machine », matériau, commande numérique, etc.) pour la satisfaire.

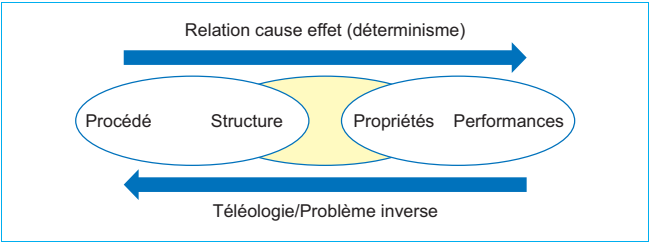


Figure 23 – Sens direct et inverse (source : [235])

À l’évidence, ce domaine interdisciplinaire n’est pas très fortement exploré (contrairement à la métallurgie qui a quelques milliers d’années d’avance !) pour les raisons diverses suivantes :

- sa jeunesse (moins de 40 ans) avec l’émergence de plusieurs technologies autonomes de fabrication 3D et une population spécialisée modeste ;
- la curiosité – une compétence non technique essentielle aujourd’hui – avec des prises de risque dans l’engagement [235] ;
- une situation entre science et technologie d’une part, une activité interdisciplinaire d’autre part. Il y a relativement peu de développement scientifique pour répondre à ces questions génériques d’amplitude [234] [236] ;
- la formation d’un nombre suffisant de professionnels ;
- les jeunes entreprises sont parfois obligées, dès le départ, de découvrir qui elles sont vraiment et de comprendre le cœur de leur produit ou service si elles veulent disposer de financements. Centrées sur le cœur de leur invention, elles peuvent se contenter de proposer des matériaux déjà commercialisés par ailleurs. Mais lorsqu’une entreprise achète une startup, la culture de l’innovation peut se perdre car l’entreprise acquéreuse peut « étouffe[r] l’innovation et son propre “ADN” prend le dessus » [237] ;
- stimulation de la créativité des concepteurs 3D (procédés et matériaux) pour dépasser les biais cognitifs imposés par la fabrication traditionnelle.

Dans ces conditions, malgré une attractivité industrielle évidente pour l’impression 3D, la compréhension des relations entre les matériaux et les paramètres de traitement, les caractéristiques des machines et les propriétés et variations des pièces reste incomplète.

Les étalonnages « manuels » que nécessitent certaines machines 3D peuvent parfois être difficiles à bien maîtriser, en même temps qu’apparaissent de nouvelles machines avec de nouvelles technologies nécessitant des matériaux spécifiques.

Alors, la méthode par essais et erreurs reste encore utilisée (mais de moins en moins avec des technologies industrielles). D’ailleurs, si on se limitait aux seuls brevets, le MIT News Office [238] écrivait que l’impression 3D ne comptait à cette date que 300 à 500 brevets, et pourtant cette technologie progressait au même rythme que les protections industrielles concernant les semi-conducteurs, qui comptaient environ 150 000 brevets. Il n’est donc pas possible de faire des comparaisons.

À retenir
<ul style="list-style-type: none">• Importance de la notion d’imprimabilité.• Mise en forme préalable des matériaux (poudre, dispersité, filament, extrusion, surface, volume, propreté).• Paramètres physiques et chimiques à prendre en compte en fonction du procédé (question du stockage).• Relation coût-matériaux-performances à prendre en compte (question du recyclage).• Absence d’un corps de connaissance robuste sur les matériaux et choix par connaissance préalable.• Problème inverse à traiter (mais avec un faible nombre de familles de matières ou de matériaux).

5. Conclusion

Si le monde des utilisateurs a besoin de machines et de matériaux pour réaliser un rêve ou satisfaire un besoin, en faisant appel à des experts, l’innovation 3D prône l’ouverture tant aux préoccupations des non-spécialistes qu’aux disciplines scientifiques pour participer à des cocréations efficaces, ouverture nécessaire pour jouer un rôle de « guetteur de rêve »...

Ainsi, l’impression 3D offre des avantages exceptionnels relativement aux technologies « classiques » pour obtenir des compositions contrôlées, une architecture complexe, mais également des objets 3D avec des fonctionnalités anisotropes ou résolues dans l’espace. Le nombre de degrés de liberté « explose » ! Quelle chance !

Mais, un nouvel utilisateur ne pourrait sans doute pas répondre à la question de réaliser un objet 3D uniquement à partir de la seule qualité d’un matériau, mais plutôt à partir de performances souhaitées qui sont en fait un compromis complexe entre procédé et matière/matériau, une connaissance qui n’est pas à sa disposition [239].

Si l’on ne dispose que d’un nombre restreint de machines, le choix en matériaux peut se réduire à une optimisation sous contrainte. Dans cet esprit, le MIT [240] a réalisé un dispositif d’apprentissage automatique pour optimiser le choix de nouveaux matériaux d’impression 3D respectant des caractéristiques comme la ténacité et la résistance à la compression. Ce logiciel selon son auteur permettrait de rationaliser le développement de nouveaux matériaux, en réduisant les coûts de recherche et de R&D, le tout diminuant la production de déchets chimiques. L’algorithme pourrait également favoriser l’innovation en proposant de nouvelles formulations chimiques. C’est très important, mais cela ne traite pas du problème inverse qui consiste à définir, autrement que par intuition, son besoin et de trouver le bon procédé avec le « bon » matériau... Mais c’est à suivre avec intérêt.

Toutes les données présentées dans cet article sont donc vraies à cet instant, dans un domaine dont le nombre de publications et de brevets augmente de plusieurs dizaines de pourcents par an. Cette analyse que l’auteur a souhaité la plus exhaustive possible n’est, malgré une bibliographie importante (non totalement présentée ici), qu’un petit élément d’un ensemble plus vaste en construction, constitué de domaines scientifiques et technologiques interdépendants et ayant des vitesses de progression variées.

Avec des croissances continues depuis plus de 30 ans, cet article ne peut être qu’un point d’étape actuel parce que des évolutions sont attendues. Néanmoins, les principes de fabrication 3D et les bases d’usage de matériaux restent toujours valables.

En tout état de cause, les imperfections actuelles de la technologie présentées constituent en quelque sorte une forme de demande d’approfondissement et de nouvelles recherches pour que l’implantation de la fabrication additive dans la société se poursuive avec le même succès. Cependant, entre 20 et 30 ans ont sensiblement été nécessaires pour atteindre un positionnement reconnu, maintenant accepté pour la fabrication additive, mais il est sans doute provisoire. Il aurait pu n’être qu’un feu de paille et s’effondrer, mais la somme des avantages économiques et sociaux, le fait que l’on puisse voir l’objet se produire, rappelés dans cet article, en ont fait une technologie quasi mature, intégrée dans le marché et de plus en plus dans l’inconscient collectif.

6. Glossaire

3D Food

Impression 3D d’aliments.

ACV (analyse du cycle de vie)

Méthode de réalisation d’un bilan environnemental multicritère et multiétape d’un système sur l’ensemble de son cycle de vie.

Anisotropie

Propriété d'être dépendant d'une direction. Un objet 3D est anisotrope car présentant avant post-traitement différentes caractéristiques selon son orientation.

Autoassemblage (ou auto-organisation)

Procédés par lesquels un système désorganisé de composants élémentaires s'assemble et s'organise de façon spontanée ou stimulée, à la suite d'interactions spécifiques et locales entre ces composants.

Autoréparation

Matériau qui après dégradation se répare lui-même.

Auxétique

Matériau à coefficient de Poisson négatif.

Binder Jetting

Projection de liants.

Bio-printing (ou bio-impression)

Le bio-printing est un sujet émergent issu des technologies de fabrication additive qui vise la fabrication d'organes et de tissus vivants.

Constructibilité

Conception et réalisation d'un projet de fabrication afin d'en garantir ses performances d'usage.

Dispersité

Mesure de la distribution (hétérogénéité) des tailles moyennes des particules ou des molécules dans un mélange.

Épaisseur optique

Épaisseur traversée par la lumière dans un milieu absorbant correspondant à une perte de $(e - 1)/e$.

Extrusion

Procédé par lequel un matériau est contraint de traverser une filière ayant sensiblement la section du dépôt à obtenir.

Impression 4D

Impression 3D utilisant des matériaux stimulables pour voir changer la forme de l'objet 3D ou ses fonctionnalités.

Imprimabilité

Capacité d'un voxel à se lier à un autre. L'imprimabilité dépend des matériaux, de méthodes de liaison, et donc du procédé d'impression.

Innovation de rupture

Produit ou service qui supprime par ses avantages une technologie dominante.

Innovation incrémentale

Nouveauté apportée à un produit ou à un service existant, qui l'améliore sans le transformer en profondeur (par opposition avec une innovation de rupture).

Interdisciplinarité

Association de disciplines scientifiques dans des projets visant leur convergence en vue d'une efficacité opératoire.

Material Jetting

Projection de matière.

Matériaux intelligents, matériaux actifs et matière programmable

Ces matériaux répondent à des stimulus énergétiques en termes de modifications de propriétés, de formes et/ou de fonctionnalités.

Métamatériau

Matériau à structure artificielle qui présente des propriétés que l'on ne retrouve pas dans un matériau massif.

Microfluidique

La microfluidique est à la fois la science et la technologie de systèmes manipulant des fluides et dont au moins l'une des dimensions caractéristiques est de l'ordre du micromètre.

Mouillabilité

Comportement d'un liquide en contact avec un solide.

Monofonctionnel/multifonctionnel

Monomère disposant d'un site réactif (ou plusieurs) : avec un site, on produit un polymère linéaire, avec plusieurs, une structure 3D ramifiée.

Monodisperse/Polydisperse

Particules de dimensions égales ou très voisines (mono).

Pièce verte

Pièce intermédiaire/transitoire.

POC (preuve de concept)

Démonstration de faisabilité d'une invention et/ou d'une innovation.

Porosité

Ensemble des vides d'un matériau solide ou rapport entre le volume des vides et le volume total d'un milieu poreux.

Post-traitement

Nécessité de transformer l'objet 3D brut en une pièce d'usage avec des traitements thermiques, photochimiques, mécaniques, chimiques (élimination des supports), surfacage, etc.

Propriétés mécaniques

Elles sont caractérisées par différents paramètres comme la résistance à la traction et aux chocs, la dureté, la limite de fatigue, le module d'élasticité, l'allongement à la rupture, etc.

Raideur

La raideur d'une poutre dépend de son module de Young, mais aussi du moment d'inertie de sa section.

Rigidité

La rigidité caractérise les matériaux (typiquement les modules de Young élevés).

SLA

Stéréolithographie.

Stokes (loi de)

Loi donnant la force de traînée hydrodynamique s'exerçant sur une sphère en déplacement dans un fluide visqueux.

Supports

Additifs de construction de l'objet 3D pour assurer sa constructibilité et la géométrie prévue.

Téléologie

Approche dans une étude par la finalité.

Vallée de la mort

Définie par le temps entre le développement d'une idée et celui où elle commence à rentrer dans le marché.

Viscosité

Phénomènes de résistance au mouvement d'un fluide newtonien (proportionnalité entre la résistance au mouvement et la viscosité).

Voxel

Volume élémentaire transformé lors de la fabrication additive.

Young (module de)

Contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100 % de la longueur initiale d'un matériau.

Matériaux pour l'impression 3D

par **Jean-Claude ANDRÉ**

DR CNRS

LRGP – UMR7274 CNRS-UL, 1, rue Grandville, 54000 Nancy – France

Sources bibliographiques

- [1] TIAN (X.), TODOROKI (A.), LIU (T.), WU (L.), HOU (Z.), UEDA (M.), HIRANO (Y.), MATSUZAKI (R.), MIZUKAMI (K.), IIZUKA (K.), MALAKHOV (A.V.), POLILOV (A.N.), LI (D.) et LU (B.). – *3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Polymer Composites: Development, Application, and Prospective*. Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers, 1, p. 100016 (2022).
- [2] JORDAN (J.). – *3D Printing*. MIT Press Ed. Boston, USA (2019).
- [3] MÉLANIE (W.). – *Quels sont les matériaux innovants du Formnext 2021 ?* <https://www.3dnatives.com/materiaux-formnext-2021/> (2021).
- [4] 3D ADEPT MEDIA. – *Célébration de la Journée de l'impression 3D : Quelles sont les micro-tendances dans les principaux matériaux ?* <https://3dadept.com/celebration-de-la-journee-de-limpression-3d-queelles-sont-les-micro-tendances-dans-les-principaux-materiaux/> (2021).
- [5] COMMINGE. – *Les briques de régolithe lunaire imprimées en 3D peuvent résister aux environnements extrêmes de l'espace*. <https://www.3dnatives.com/regolithe-lunaire-3d-espace-11120223/#/> (2022).
- [6] CRUMPE. – *Les mineurs microbiens pourraient aider les humains à coloniser la Lune et Mars*. <https://www.crumpe.com/2022/12/les-mineurs-microbiens-pourraient-aider-les-humains-a-coloniser-la-lune-et-mars/> (2022).
- [7] ANDRÉ (J.C.), LE MÉHAUTE (A.) et DE WITTE (O.). – *Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle*. Brevet français n° 84, 11, 241 du 16.07.1984 (1984).
- [8] GAYNOR (A.T.) et GUEST (J.K.). – *Topology optimization considering overhang constraints: Eliminating sacrificial support material in additive manufacturing through design*. Structural and Multidisciplinary Optimization, 5, p. 1157-1172 (2016).
- [9] ZHU (J.), ZHOU (H.), WANG (C.), ZHOU (L.), YUAN (S.) et ZHANG (W.). – *A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges*. Chinese Journal of Aeronautics, 34, p. 91-110 (2021).
- [10] STEVENSON (K.). – *The Highest-Temperature 3D Printer Filament?* <https://www.fabbaloo.com/2020/08/highest-temperature-3d-printer-filament> (2020).
- [11] ANDRÉ (J.C.). – *From Additive Manufacturing to 3D/4D Printing – Volume 1: From the first concept to the present applications; Volume 2: Improvement of the present technologies and constraints; Volume 3: Break-down innovations: Programmable matter; 4D Printing and Bio-Printing*. ISTE/Wiley Ed. London, UK (2018).
- [12] ANDRÉ (J.C.). – *Matériaux pour l'impression 4D*. Techniques de l'Ingénieur, sous presse (2024).
- [13] DEMOLY (F.) et ANDRÉ (J.C.). – *4D Printing – Volume 1: Between disruptive research and Industrial application – Volume 2: Between Science and Technology*. ISTE/Wiley Ed. London, UK (2022).
- [14] DEMOLY (F.) et ANDRÉ (J.C.). – *Fabrication additive alimentaire : une approche systématique*. Techniques de l'Ingénieur [F 3 100] (2021).
- [15] BLOG ERM. – *L'impression DLP, qu'est-ce que c'est ? Les enjeux de la DLP*. <https://www.erm-fabtest.com/blog/l-impression-dlp-qu-est-ce-que-c-est-n18> (2022).
- [16] TUMBLESTON (J.R.), SHIRVANYANTS (D.), ERMOSHKIN (N.), JANUSZIEWICZ (R.), JOHNSON (A.R.), KELLY (D.), CHEN (K.), PINSCHMIDT (R.), ROLLAND (J.P.), ERMOSHKIN (A.), SAMULSKI (E.T.) et DESIMONE (J.M.). – *Continuous liquid interface production of 3D objects*. Science, 347, p. 1349-1351 (2015).
- [17] NUYKEN (O.) et PASK (S.D.). – *Ring-Opening Polymerization – An Introductory Review*. Polymers, 5, p. 361-403 (2013).
- [18] ANDRÉ (J.C.). – *Stérolithographie par photopolymérisation*. Techniques de l'Ingénieur [BM 7 910] (2017).
- [19] DOUALLE (T.), ANDRÉ (J.C.) et GALLAIS (L.). – *3D-printing of silica glass through multi-photon polymerization process*. Optical Letters, 46, p. 364-367 (2021).
- [20] PÉTILLON (N.). – *Vers la photographie tridimensionnelle en couleur (application de la stérolithographie)*. Thèse de l'INPL, Nancy (1995).
- [21] FLUKA. – *Catalogue*. <https://lab.honeywell.com/en/fluka> (2022).
- [22] ARKEMA. – *Résines et additifs photo-réticulables par UV, LED et EB*. <https://www.arkema.com/global/fr/products/product-families/photocure-resins/> (2022).
- [23] NORLAND. – *Norland UV Curing Adhesives*. <http://www.norlandprod.com/uvdefault.html> (2022).
- [24] YOSRA (K.). – *Evonik ajoute trois matériaux d'impression 3D à sa gamme de photopolymères*. <https://3dadept.com/evonik-ajoute-trois-materiaux-dimpression-3d-a-sa-gamme-de-photopolymeres/> (2022).
- [25] FIEDOR (P.), PILCH (M.), SZYMASZEK (P.), CHACHAJ-BREKIESZ (A.), GALEK (M.) et ORTYL (J.). – *Photochemical Study of a New Bimolecular Photo-initiating System for Vat Photopolymerization 3D Printing Techniques under Visible Light*. Catalysts, 10, p. 284 (2020).
- [26] MATERIALISE. – *Stérolithographie*. https://www.materialise.com/fr/industriel/3d-printing-technologies/stereolithographie?gclid=CjwKCAjw9LSSBhBsEiwAKtf0n5VDtF5y27-na0gsalztjdVnR2HDPCKJqlcesohTrTeJQk-Wa1EycxoCc6kQAvD_BwE (2022).
- [27] SETROGLOU (K.). – *3D Systems announces two new SLA 750 3D printers, resin and more – technical specifications and pricing*. <https://3d-printingindustry.com/news/3d-systems-announces-two-new-sla-750-3d-printers-resin-and-more-technical-specifications-and-pricing-207277/> (2022).
- [28] ADDITIVE 3D. – *Matériaux d'impression 3D – impression 3D à partir de résines liquides*. <https://www.additive-3d.fr/stereolithographie.html> (2022).
- [29] 3D CERAM. – *Turnkey provider for additive manufacturing ceramics*. <https://3dceram.com/> (2022).
- [30] MÉLANIE (W.). – *Quelles sont les imprimantes 3D céramique disponibles sur le marché ?* <https://www.3dnatives.com/imprimante-3d-ceramique-13012020/> (2022).
- [31] CHARTIER (T.) et CHAPUT (C.). – *Stereolithography as a shaping technique for ceramics*. Bulletin of the European Ceramic Society, 1, p. 29-32 (2003).
- [32] CHEN (Z.), LI (Z.), LI (J.), LIU (C.), LAO (C.), FU (Y.), LIU (C.), LI (Y.), WANG (P.) et HE (Y.). – *3D printing of ceramics: A review*. Journal of the European Ceramic Society, 39, p. 661-687 (2019).

- [33] ZHAO (Y.) et DAN (Y.). – *Synthesis and characterization of a polymerizable benzophenone derivative and its application in styrenic polymers as UV-stabilizer*. European Polymer Journal, 43, p. 4541-4551 (2007).
- [34] REGEHLI (M.), GARMSHAUSEN (Y.), REUTER (M.), KÖNIG (N.F.), ISRAEL (E.), KELLY (D.P.), CHOU (C.Y.), KOCH (K.), ASFARI (B.) et HECHT (S.). – *Xolography for linear volumetric 3D printing*. Nature, 588, p. 620-624 (2020).
- [35] HABIBI (M.), FOROUGHI (S.), KARAMZADEH (V.) et PACKIRISAMY (M.). – *Direct sound printing*. Nature Communications, 13, p. 1800 (2022).
- [36] GOJZEWSKI (H.), GUO (Z.), GRZELACHOWSKA (W.), RIDWAN (M.G.), HEMPENIUS (M.A.), GRIJPMAN (D.W.) et VANCISO (G.J.). – *Layer-by-Layer Printing of Photopolymers in 3D: How Weak is the Interface?* ACS Applied Materials & Interfaces, 12, p. 8908-8914 (2020).
- [37] PARANDOUSH (P.) et LIN (D.). – *A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites*. Composites Structures, 182, p. 36-53 (2017).
- [38] SARAN (O.S.), REDDY (A.P.), CHATURYA (L.) et KUMAR (M.P.). – *3D printing of composite materials: A short review*. Materials Today: Proceedings, 64, p. 615-619 (2022).
- [39] ZHANG (T.), HUANG (Z.), YANG (T.), KONG (H.), LUAN (X.), WANG (A.), WANG (D.), KUO (W.), WANG (Y.) et LI (C.T.). – *In situ design of advanced titanium alloy with concentration modulations by additive manufacturing*. Science, 374, p. 478-482 (2021).
- [40] HAMEL (C.M.), ROACH (D.J.), LONG (K.N.), DEMOLY (F.), DUNN (M.L.) et QI (H.J.). – *Machine-learning based design of active composite structures for 4D printing*. Smart Materials and Structures, 28, p. 065005 (2019).
- [41] USINE NOUVELLE. – *Composites autocicatrisants*. <https://www.usinenouvelle.com/article/composites-autocicatrisants.N1801402> (2022).
- [42] LEI (M.), HONG (W.), ZHAO (Z.), HAMEL (C.M.), CHEN (M.), LU (H.) et QI (H.J.). – *3D printing of auxetic metamaterials with digitally reprogrammable shape*. ACS Appl. Mater. Interfaces, 11, p. 22768-22776 (2019).
- [43] LIM (T.C.). – *Auxetic materials and structures*. Springer Ed. – Singapore (2015).
- [44] SAXENA (K.K.), DAS (R.) et CALIUS (E.P.). – *Three Decades of Auxetics Research – Materials with Negative Poisson's Ratio: A Review*. Advances in Engineering of Materials, 18, p. 1847-1870 (2016).
- [45] MONTGOMERY (S.M.), KUANG (X.), ARMSTRONG (C.D.) et QI (H.J.). – *Recent Advances in Additive Manufacturing of Active Mechanical Metamaterials*. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 24, p. 100869 (2020).
- [46] QI (J.), CHEN (Z.), JIANG (P.), HU (W.), WANG (Y.), ZHAO (Z.), CAO (X.), ZHANG (S.), TAO (R.), LI (Y.) et FANG (D.). – *Recent Progress in Active Mechanical Metamaterials and Construction Principles*. Advanced Science, p. 2102662 (2021).
- [47] ZHOU (H.), CAO (X.), LI (C.), ZHANG (X.), FAN (H.), LEI (H.) et FANG (D.). – *Design of self-supporting lattices for additive manufacturing*. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 148, p. 104298 (2021).
- [48] LIU (G.), ZHANG (X.), CHEN (X.), HE (Y.), CHENG (L.), HUO (M.), YIN (J.), HAO (F.), CHEN (S.), WANG (P.), YI (S.), WAN (L.), MAO (Z.), CHEN (Z.), WANG (X.), CAO (Z.) et LU (J.). – *Additive manufacturing of structural materials*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 145, p. 100596 (2021).
- [49] LAKE (G.J.) et THOMAS (A.J.). – *The strength of highly elastic materials*. Proceedings of the Royal Society of London, A300, p. 108-119 (1987).
- [50] MIRZAALI (M.J.), CARACCILO (A.), PAHLAVANI (H.), JANBAZ (S.), VERGANI (L.) et ZADPOOR (A.A.). – *Multi-material 3D printed mechanical metamaterials: Rational design of elastic properties through spatial distribution of hard and soft phases*. Applied Physics Letters, 113, p. 241903 (2018).
- [51] ZHENG (W.), WEI (K.), ZHU (S.), WANG (J.), NIU (F.), LIU (G.) et YANG (R.). – *Multi-function untethered actuator based on Ni-Ti alloy and polylactic acid*. Sensors and Actuators A: Physical, 344, p. 113697 (2022).
- [52] BARTHELAT (F.) et ESPINOSA (H.D.). – *An experimental investigation of deformation and fracture of nacre-mother of pearl*. Experimental mechanics, 47, p. 311-324 (2007).
- [53] ALBERTINI (G.). – *Nucleation and Propagation of Fracture in Heterogeneous Materials*. PhD Cornell University, Cornell, USA (2021).
- [54] MARTINEZ (J.), SONG (H.), DUMAS (J.) et LEFEBVRE (S.). – *Orthotropic k-nearest foams for additive manufacturing*. ACM Transactions on Graphics, Association for Computing Machinery, 7, 121 : p. 1-121 :12 (2017).
- [55] ZHENG (X.), SMITH (W.), JACKSON (J.), MORAN (B.), CUI (H.), YE (J.), FANG (N.), RODRIGUEZ (N.), WEISGRABER (T.) et SPADACCINI (C.M.). – *Multiscale metallic metamaterials*. Nature Materials, 15, p. 1100-1106 (2016).
- [56] WRIGHT (D.). – *Dosimetry and Toxicological Analysis of 3D Printer Emitted Particles*. https://chemicalinsights.org/wp-content/uploads/Chemical-Insights_3D-Toxicity-Report_final.pdf (2022).
- [57] TATARD (P.). – *Comment structurer la connaissance issue des processus de fabrication additive pour gagner en productivité ?* <https://www.bassetti-group.com/comment-structurer-la-connaissance-issue-des-processus-de-fabrication-additive-pour-gagner-en-productivite/> (2022).
- [58] GUEST. – *Comment structurer la connaissance issue des processus de fabrication additive pour gagner en productivité ?* <https://3dadept.com/opinion-comment-structurer-la-connaissance-issue-des-processus-de-fabrication-additive-pour-gagner-en-productivite/> (2022).
- [59] ANDRÉ (J.C.). – *Recyclage des déchets d'impression 3D*. Techniques de l'Ingénieur [BM 7 975] (2020).
- [60] HUANG (S.H.), LIU (P.), MOKASDAR (A.) et HOU (L.). – *Additive manufacturing and its societal impact: a literature review*. International Journal of Manufacturing Technology, 67, p. 1191-2103 (2013).
- [61] ANDRÉ (J.C.). – *Impression 3D : niches applicatives porteuses*. Techniques de l'Ingénieur [BM 7 970] (2020).
- [62] NATIONAL ACADEMY PRESS. – *Making Things: 21st Century Manufacturing and Design: Summary of a Forum*. <http://nap.edu/13313> (2012).
- [63] MCKINSEY & COMPANY. – *Product sustainability: Back to the drawing board*. <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/product-sustainability-back-to-the-drawing-board> (2021).
- [64] GOEHRKE (S.). – *Additive Manufacturing Continues to go Greener*. <https://www.fabbaloo.com/news/additive-manufacturing-continues-to-go-greener> (2021).
- [65] TEMMLER (A.), WILLENBORG (E.) et WISSENBACH (K.). – *Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing*. Laser polishing (LAMOM) XVII, 82430W (2012).
- [66] MOUSSION (A.). – *A la découverte de l'impression 3D silicone en 10 questions*. <https://www.primante3d.com/silicone-31032022/> (2022).
- [67] STEVENSON (K.). – *Ten Juicy 3D Print Corporate Acquisition Targets*. <https://comment-client.com.ngontinh24.com/article/ten-juicy-3d-print-corporate-acquisition-targets-fabbaloo> (2022).
- [68] MÉLANIE (W.). – *Quel procédé faut-il privilégier ? Nous avons interrogé 3 experts français du secteur afin d'en savoir plus !* <https://www.3dnatives.com/conseils-experts-imprimante-3d-resine-24082021/> (2021).
- [69] JADHAV (A.) et JADHAV (V.S.). – *A review on 3D printing: An additive manufacturing technology*. Materials Today: Proceedings, 62, p. 2094-2099 (2022).
- [70] ANDRÉ (J.C.). – *Impression 3D « volumique » : du décimètre au mm ?* Techniques de l'Ingénieur [RE 289] (2022).
- [71] RENARD (M.). – *La fabrication additive céramique, un marché de niche en pleine croissance*. <https://www.3dnatives.com/fabrication-additive-ceramique-croissance-060920213/> (2021).
- [72] WINN (Z.). – *Software to accelerate R&D – The alumni-founded startup Uncountable has developed a digital workbook to help scientists get more out of experimental data*. <https://news.mit.edu/2021/uncountable-rd-0713> (2021).
- [73] PILCZYNSKA (K.). – *Polymers for 3D Printing – Methods, Properties, and Characteristics*. Material jetting. 91-103 in Izdebska-Podsiady Ed. Plastics Design Library – Elsevier Ed. New-York, USA (2022).
- [74] KELLY (B.E.), BHATTACHARYA (I.), HEIDARI (H.), SHUSTEFF (M.), SPADACCINI (C.M.) et TAYLOR (H.K.). – *Volumetric additive manufacturing via tomographic reconstruction*. Science, 363, p. 1075-1079 (2019).

- [75] CHANDLER (D.L.). – *New fibers can make breath-regulating garments – Robotic textiles could help performers and athletes train their breathing, and potentially help patients recovering from post-surgery breathing changes.* MIT News, <https://news.mit.edu/2021/fibers-breath-regulating-1015> (2021).
- [76] BOURELL (D.), KRUTH (J.P.), LEU (M.), LEVY (G.), ROSENE (D.), BEESE (A.M.) et CLARE (A.). – *Materials for additive manufacturing.* CIRP Annals, 66, p. 659-681 (2017).
- [77] NGO (T.D.), KASHANI (A.), IMBALZANO (G.), NGUYEN (K.T.Q.) et HUI (D.). – *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges.* Composites, Part B: Engineering, 143, p. 172-196 (2018).
- [78] BHATIA (A.) et SEHGAL (A.K.). – *Additive manufacturing materials, methods and applications: A review.* Materials Today: Proceedings, in press (2021).
- [79] JANDYAL (A.), CHATURVEDI (I.), WAZIR (I.), RAINA (A.) et UL HAQ (M.I.). – *3D printing – A review of processes, materials and applications in industry 4.0.* Sustainable Operations and Computers, 3, p. 33-42 (2022).
- [80] PRAVEENA (B.A.), LOKESH (N.), BURADI (A.), SANTHOSH (N.), PRAVEENA (B.L.) et VIGNESH (R.). – *A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential.* Materials Today: Proceedings, 52, p. 1309-1313 (2022).
- [81] PRAKASH (K.S.), NANCHARAIH (T.) et SUBBA RAO (V.V.). – *Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing – An Overview.* Materials Today: Proceedings, 5, p. 3873-3882 (2018).
- [82] MAGISTRELLI (G.). – *Les matériaux composites. La rencontre entre la réalité et les affaires.* <https://www.a3dm-magazine.fr/news/fabrication-additive-polymeres/materiaux-composites-entre-realite-affaires> (2022).
- [83] MÉLANIE (W.). – *Les différents types de résines disponibles pour l'impression 3D.* <https://www.3dnatives.com/resine-impression-3d-21122022/> (2022).
- [84] MAGISTRELLI (G.). – *L'importance des poudres pour le développement de la fabrication additive.* <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/toutes-industries/limportance-poudres-fabrication-additive> (2021).
- [85] DASSAULT SYSTEMS. – *Materials for 3D printing with 3DEXPERIENCE Make and Arke-ma | Dassault Systems.* <https://www.youtube.com/watch?v=JoZaBELoIM8&t=38s> (2023).
- [86] PENG (T.), ZHU (Y.), LEU (M.) et BOURELL (D.). – *Additive manufacturing-enabled design, manufacturing, and lifecycle performance.* Additive Manufacturing, 36, p. 101646 (2022).
- [87] HANKS (B.), BERTHEL (J.), FRECKER (M.) et SIMPSON (T.W.). – *Mechanical properties of additively manufactured metal lattice structures: data review and design interface.* Additive Manufacturing, 35, p. 101301 (2020).
- [88] ASHBY (M.F.). – *Designing architecture materials.* Scripta Materialia, 68, p. 4-7 (2013).
- [89] ASHBY (M.F.) et BRÉCHET (Y.). – *Designing hybrid materials.* Acta Materialia, 51, p. 5801-5821 (2003).
- [90] BUFORD (D.). – *Matériaux de fabrication additifs Marché : croissance, opportunités et défis.* <https://www.echobuzz221.com/2022/12/31/materiaux-de-fabrication-additifs-marche-croissance-opportunités-et-défis/> (2022).
- [91] PIPEME. – *Prospective – Futur de la fabrication additive.* DGE Ed. Paris, <http://www.entreprises.gouv.fr/etudes-et-statistiques/futur-fabrication-additive-pipame> (2017).
- [92] GORDON (R.) et HARROP (J.). – *3D Printing of Metals 2015-2025; Pricing, properties and projections for 3D printing equipment, materials and applications.* <http://www.idtechex.com/research/reports/3d-printing-of-metals-2015-2025-000441.asp> (2016).
- [93] MÉLANIE (W.). – *Les matériaux d'impression 3D les plus étonnants.* <https://www.3dnatives.com/materiau-etonnant-top-12-21032017/#!> (2022).
- [94] TOFAIL (S.A.M.), KOUMOULOS (E.P.), BANDYOPADHYAY (A.), BOSE (S.), O'DONOGHUE (L.) et CHARITIDIS (C.). – *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities.* Materials Today, 21, p. 22-37 (2018).
- [95] LI (N.), HUANG (S.), ZHANG (G.), QIN (R.), LIU (W.), XIONG (H.), SHI (G.) et BLACKBURN (J.). – *Progress in additive manufacturing on new materials: A review.* Journal of Materials Science & Technology, 35, p. 242-269 (2019).
- [96] MÉLANIE (W.). – *Résine vs Poudre : quelle famille de matériaux plastiques choisir ?* <https://www.3dnatives.com/resines-poudres-plastiques-impression-3d-10012023/> (2023).
- [97] NANOWEB. – *Nanoweb: A Revolutionary Transparent Conductive Thin Film.* <https://www.wevolver.com/article/nanoweb-a-revolutionary-transparent-conductive-thin-film> (2022).
- [98] YAN (Y.), JIANG (Y.), NG (E.L.L.), ZHANG (Y.), OWH (C.), WANG (F.), SONG (Q.), FENG (T.), ZHANG (B.), LI (P.), LOH (X.J.), CHAN (S.Y.) et CHAN (B.Q.Y.). – *Progress and opportunities in additive manufacturing of electrically conductive polymer composites.* Materials Today Advances, 17, p. 100333 (2023).
- [99] MINIFACTORY. – *Validated high temp 3D printing materials for Ultra 3D Printer.* <https://minifactory.fi/industrial-3d-printer/validated-materials/> (2022).
- [100] AMPPOWER. – *Sustainability of Metal Additive Manufacturing.* <https://ampower.eu/insights/sustainability-of-metal-additive-manufacturing/> (2022).
- [101] ENMAP. – *Les poudres métalliques pour la fabrication additive – Recherche et ressources sur la planification commerciale du marché, analyse des revenus et de la croissance jusqu'en 2030.* <https://xiaomiactu.com/les-poudres-metalliques-pour-la-fabrication-additive-exemple-de-rapport-de-marche-2022/> (2022).
- [102] DILBEROGLU (U.M.), GHAREHPAPAGH (B.), YAMAN (U.) et DOLEN (M.). – *The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0.* Procedia Manufacturing, 11, p. 545-554 (2017).
- [103] LE DUIGOU (A.), CHABAUD (G.) et CASTRO (M.). – *Impression 3D/4D de matériaux composites thermoplastiques.* Techniques de l'Ingénieur [BM 7 922] (2021).
- [104] HELLER (B.P.), SMITH (D.E.) et JACK (D.A.). – *Effects of extrudate swell and nozzle geometry on fiber orientation in Fused Filament Fabrication nozzle flow.* Additive Manufacturing, 12B, p. 252-264 (2016).
- [105] BRENKEN (B.), BAROCIO (E.), FAVALORO (A.), KUN (V.) et PIPES (B.R.). – *Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review.* Additive Manufacturing, 21, p. 1-16 (2018).
- [106] RUPALIN (B.), VENKATESH (V.) et ARUMAIKANNU (G.). – *Investigation on part consolidation for additive manufacturing with SIMP method.* Materials Today, 46, p. 4954-4961 (2021).
- [107] GARMULEWICZ (A.), HOLWEG (M.), VELDHIJS (H.) et YANG (A.). – *Redistributing material supply chains for 3D printing.* http://www.ifm.eng.cam.ac.uk/uploads/Research/TEG/Redistributing_material_supply_chains_for_3D_printing.pdf (2016).
- [108] WORLD ECONOMIC FORUM. – *The New Plastics Economy; Rethinking the future of plastics.* http://www3.weforum.org/docs/WEF_The_New_Plastics_Economy.pdf (2017).
- [109] CADER (M.) et KINSKI (W.). – *Polymers for 3D Printing – Methods, Properties, and Characteristics.* Material extrusion. p. 75-89 in *Plastics Design*, Library Elsevier Ed. New-York, USA (2022).
- [110] CHUA ED. – *Digital Gastronomy: From 3d Food Printing To Personalized Nutrition.* World Scientific Pub. Ed. Singapore (2022).
- [111] LA RECHERCHE. – *Les matériaux de construction prennent vie.* <https://recherche.fr/les-materiaux-de-construction-prennent-vie/> (2022).
- [112] MARCHAND (A.). – *Mouillage statique et dynamique : Influences géométriques aux échelles moléculaires.* Thèse de l'université Paris-Diderot, Paris (2011).
- [113] DEZELLUS (O.). – *Contribution à l'étude des mécanismes de mouillage réactif.* Matériaux. Thèse de l'institut national polytechnique de Grenoble, Grenoble (2000).
- [114] MERLOT (F.) et MAZZONI (S.). – *Gas evolution during FDM 3D printing and health impact.* http://www.3dsafety.org/3dsafety/download/mf2015_eng.pdf (2015).
- [115] JUSTO (J.), TÁVARA (L.), GARCÍA-GUZMÁN (L.) et PARIS (F.). – *Characterization of 3D printed long fiber reinforced composites.* Composite Structures, 185, p. 537-548 (2018).
- [116] FILIMPRIMANTE3D. – *Fil Imprimante 3D : Vente de PLA, PET-G, ABS, Filament TPU, etc. pour l'impression 3D.* <https://www.filimprimante3d.fr/> (2015).
- [117] MAKERSHOP 3D. – *Guide d'achat des consommables pour l'impression 3D.* <http://www.makershop.fr/content/43-guide-achat-filament-resine-impression-3d> (2015).
- [118] IMPRIMANTE 3D. – *Quels sont les matériaux utilisés en impression 3D ? Liquide, en poudre ou en bobine.* <http://www.lesnumeriques.com>

- com/imprimante-3d/quels-sont-matériaux-utilisés-en-impression-3d-a1884.html (2014).
- [119] ALL3DP. – *Vous ne savez pas quel filament 3D utiliser ? Découvrez les filaments pour imprimante 3D les plus populaires.* <https://all3dp.com/fr/1/filament-3d-fil-imprimante-3d-pla-abs/> (2022).
- [120] KAFLE (A.), LUIS (E.), SILWAL (R.), PAN (H.M.), SHRESTHA (P.L.) et BASTOLA (A.K.). – *3D/4D Printing of Polymers: Fused Deposition Modelling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), and Stereolithography (SLA).* *Polymers*, 13, p. 3101 (2021).
- [121] MÉLANIE (W.). – *AM Polymers présente ses poudres composites haute performance et ses variantes ignifuges pour l'impression 3D.* <https://www.3dnatives.com/am-polymers-poudres-impression-3d-15112022/> (2022).
- [122] MÉLANIE (W.). – *PLA vs ABS : quel matériau d'impression 3D choisir ?* <https://www.3dnatives.com/pla-vs-abs-impression-3d-08082022/#> (2022).
- [123] JULIEN. – *Du filament PLA multicolore chez UniCoFil.* <https://www.lesimprimantes3d.fr/unicofil-filament-pla-multicolore-20170208/> (2017).
- [124] MOETAZEDIAN (A.), ALLUM (J.), GLEADALL (A.), MELE (E.) et SILBERSCHMIDT (V.V.). – *MaTrEx AM: A new hybrid additive manufacturing process to selectively control mechanical properties.* *Additive Manufacturing*, 47, p. 102337 (2021).
- [125] ARMSTRONG (C.D.), YUE (L.), KUANG (X.), ROACH (D.J.), DUNN (M.L.) et QI (H.J.). – *A hybrid additive manufacturing process for production of functional fiber-reinforced polymer composite structures.* *Journal of Composite Materials*, 2022 ; doi :10.1177/00219983221119270 (2022).
- [126] TUTTLE (D.). – *Présentation de Smooth TPU 95A.* https://markforged.com/fr/resources/blog/introducing-smooth-tpu-95a?utm_campaign=tpu-launch&utm_medium=trade-pub-eblast&utm_source=3d-printing-industry&utm_content=blog&utm_term (2022).
- [127] SPECTRUM FILAMENTS. – *Spectrum filaments presents 8 new technical materials – Kevlar and Teflon composites as well as high-temperature and solvent-resistant engineering materials.* <https://3dprintingindustry.com/news/spectrum-filaments-presents-8-new-technical-materials-kevlar-and-teflon-composites-as-well-as-high-temperature-and-solvent-resistant-engineering-materials-216577/> (2022).
- [128] ABSI (C.), ALSINANI (N.) et LABERGE LEBEL (L.). – *Carbon fiber reinforced poly(ether ether ketone) rivets for fastening composite structures.* *Composite Structures*, 280, p. 114877 (2022).
- [129] LISTEK (V.). – *3D Systems & Stratasys Announce New 3D Printing Materials, Partnerships.* <https://3dprint.com/295738/3d-systems-stratasys-announce-new-3d-printing-materials-partnerships/> (2022).
- [130] NATIONAL ACADEMY PRESS (2016). – *Predictive Theoretical and Computational Approaches for Additive Manufacturing: Proceedings of a Workshop.* <http://nap.edu/23646> (2016).
- [131] PRIMANTE 3D. – *Quels matériaux pour imprimer en 3D.* <http://www.primante3d.com/matériaux/> (2015).
- [132] MÉLANIE (W.). – *Tout ce qu'il faut savoir sur les supports en impression 3D.* <https://www.3dnatives.com/support-impression-3d-260920223/#> (2022).
- [133] QUAN (Z.), WU (A.), KEEFE (M.), QIN (X.), YU (J.), SUHR (J.), BYUN (J.H.), KIM (B.S.) et CHOU (T.W.). – *Additive manufacturing of multidirectional preforms for composites: opportunities and challenges.* *Materials Today*, 18, p. 503-512 (2015).
- [134] CAMINERO (M.A.), CHACÓN (J.M.), GARCÍA-MORENO (I.) et RODRÍGUEZ (G.P.). – *Impact damage resistance of 3D printed continuous fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling.* *Composites*, B148, p. 93-103 (2018).
- [135] HOU (Z.), TIAN (X.), ZHENG (Z.), ZHANG (J.), ZHE (L.), LI (D.), MALAKHOV (A.V.) et POLILOV (A.V.). – *A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content.* *Composites*, B189, p. 107893 (2020).
- [136] MÉLANIE (W.). – *Krill Design imprime en 3D du mobilier avec des pelures d'orange, de citron et du marc de café.* <https://www.3dnatives.com/krill-design-impression-3d-13012023/> (2023).
- [137] CHEN (O.), DACULA MANGADLAO (J.), WALLAT (J.D.), DE LEON (A.L.C.), POKORSKI (J.K.) et ADVINCULA (R.C.). – *3D Printing Bio-compatible Polyurethane/Poly (lactic acid)/Graphene Oxide Nanocomposites: Anisotropic Properties.* *ACS Applied Material Interfaces*, 9, p. 4015-4023 (2016).
- [138] AMINI (A.), BARTHELAT (K.) et EHRLICHER (A.J.). – *Centrifugation and index matching yield a strong and transparent bioinspired nacreous composite.* *Science*, 373, p. 1229-1234 (2021).
- [139] 3DERS.ORG. – *ColorFabb announces new brass-Fill 3D printing filament.* <http://www.3ders.org/articles/20141219-colorfabb-announces-new-brassfill-3d-printing-filament.html> (2014).
- [140] LEE (H.H.), CHOU (K.S.) et HUANG (K.C.). – *Inkjet printing of nano-sized silver colloids.* *Nanotechnology*, 16, p. 2436-2441 (2005).
- [141] MARKFORGED. – *The METAL X : An Industrial Revolution.* <https://markforged.com/metal-x/> (2017).
- [142] UREÑA (J.), BLASCO (J.R.), JORDÁ (O.), MARTÍNEZ (M.), PORTOLÉS (L.), GONZÁLEZ-GUTIERREZ (J.) et SCHUSCHNIGG (S.). – *Development of Material and Processing Parameters for AM.* P. 231-306 in GODEC (D.), GONZÁLEZ-GUTIERREZ (J.), NORDIN (A.), PEI (E.), UREÑA (J.) – *A Guide to Additive Manufacturing.* Springer Ed. Cham, NL (2022).
- [143] SHAFFER (S.), YANG (K.), VARGAS (J.), DI PRIMA (M.A.) et VOIT (W.). – *On reducing anisotropy in 3D printed polymers via ionizing radiation.* *Polymer*, 55, p. 5969-5979 (2014).
- [144] FRYCZKOWSKI (R.), GORCZOWSKA (M.), ŚLUSARCZYK (C.), FRYCZKOWSKA (B.) et JANICKI (J.). – *The possibility of obtaining graphene/polymer composites from gra-*
- phene oxide by a one step process.* *Composites Science and Technology*, 80, p. 87-92 (2013).
- [145] GRAPHENE LAB. INC. – *3D printed nanocomposites.* <http://www.graphene3dlab.com/sl/home.asp> (2016).
- [146] KOSLOW (T.). – *A fully 3D printed meal to satisfy every elder's appetite.* http://3dprinting-industry.com/2015/10/20/the-performance-concept-a-full-3d-printed-meal-to-satisfy-every-elderly-persons-appetite/?utm_source=3D+Printing+Industry+Update&utm_medium=email&utm_campaign=55e99ef15d-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_term=0_695d5c73dc-55e99ef15d-64557777 (2015).
- [147] AL RASHID (A.), AHMED (W.), KHALID (M.Y.) et KOÇ (M.). – *Vat photopolymerization of polymers and polymer composites : Processes and applications.* *Additive Manufacturing*, 47, p. 102279 (2021).
- [148] PROTO LABS. – *Plastiques courants résistants aux chocs.* https://www.protolabs.fr/ressources/consils-de-conception/plastiques-resistants-aux-chocs-courants/?utm_campaign=fr-design-tip-1022&utm_medium=email&utm_source=protolabs&utm_content=pldt-1022 (2022).
- [149] FASCETTI (A.), LATTEUR (P.) et LIM (S.H.). – *Ground-based automated construction of droxel structures: An experimental approach.* *Automation in Construction*, 131, p. 103899 (2021).
- [150] MÉLANIE (W.). – *Empreinte et sa maison imprimée en 3D en Maine-et-Loire.* <https://www.3dnatives.com/empreinte-maison-3d-210620213/> (2021).
- [151] DDD NEWS. – *L'impression 3D et l'architecture.* <http://dddfactory.fr/ddd-news/> (2015).
- [152] KANG (D.H.), LOUIS (F.), LIU (H.), SHIMODA (H.), NISHIYAMA (Y.), NOZAWA (H.), KAKITANI (M.), TAKAGI (D.), KASA (D.), NAGAMORI (E.), IRIE (S.), KITANO (S.) et MATSUSAKI (M.). – *Engineered whole cut meat-like tissue by the assembly of cell fibers using tendon-gel integrated bioprinting.* *Nature Communications*, 12, p. 5059 (2021).
- [153] GOULDING (C.). – *The Return of the Food Equipment Business and 3D Printing.* https://www.fabbaloo.com/news/the-return-of-the-food-equipment-business-and-3d-printing?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=fabbaloo_daily_3d_printing_news&utm_term=2021-06-23 (2021).
- [154] LE PETIT BLEU D'AGEN. – *Un fil de pierre 3D aux multiples applications.* <https://www.petitbleu.fr/2021/10/29/un-fil-de-pierre-3d-aux-multiples-applications-9896837.php> (2021).
- [155] MOUSSION (A.). – *Le français COP Chimie met au point une silicone pour l'impression 3D FDM.* <http://www.primante3d.com/silicone-fdm-17062021/> (2021).
- [156] MOUSSION (A.). – *À la découverte de l'impression 3D silicone en 10 questions.* <https://www.primante3d.com/silicone-31032022/> (2022).
- [157] TUTIKA (R.), TAHIDUL HAQUE (A.B.M.) et BARTLETT (M.D.). – *Self-healing liquid metal composite for reconfigurable and recyclable*

- soft electronics. Communications Materials, 2, p. 64 (2021).
- [158] PULATSU (E.) et LIN (M.). – *A review on customizing edible food materials into 3D printable inks: Approaches and strategies*. Trends in Food Science & Technology, 107, p. 68-77 (2021).
- [159] GILMER (D.B.), HAN (L.), LEHMANN (M.L.), SIDDEL (D.H.), YANG (G.), CHOWDHURY (A.U.), DOUGHTY (B.), ELLIOTT (A.M.) et SAITO (T.). – *Additive manufacturing of strong silica sand structures enabled by polyethyleneimine binder*. Nature Communications, 12, p. 5144 (2021).
- [160] ZHANG (Q.), SHI (Y.) et ZHAO (Z.). – *A brief review of mechanical designs for additive manufactured soft materials*. Soft Science, 2, p. 2 (2022).
- [161] PAL (C.) et KRISHNAMOORTHY (A.). – *Polymers for 3D Printing – Methods, Properties, and Characteristics*. Direct energy deposition. 137-142 in *Plastics Design Library*, Elsevier Ed. New-York, USA (2022).
- [162] 3D ADEPT MAG. – *Print the future with proven metal powders*. <https://3dadept.com/telechargez-ledition-de-juillet-aout-2022-de-3d-adept-mag/> (2022).
- [163] ALVES (J.L.), SANTANA (L.) et GARZON (E.M.O.). – *Polymers for 3D Printing – Methods, Properties, and Characteristics*. Binder jetting. 113-125 in *Izdebska-Podsiady Ed. Plastics Design Library*, Elsevier Ed. New-York, USA (2022).
- [164] MIRZABABAEI (S.) et PASEBANI (S.). – *A Review on Binder Jet Additive Manufacturing of 316L Stainless Steel*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 3, p. 82 (2019).
- [165] FEI (F.), HE (L.), KIRBY (L.) et SONG (X.). – *Study of Droplet Diffusion in Hydrothermal-Assisted Transient Jet Fusion of Ceramics*. Journal of Manufacturing, Science and Engineering, 143, p. 051001 (2021).
- [166] SAGBAS (B.), GÜMÜŞ (B.E.), KAHRAMAN (Y.) et DOWLING (D.P.). – *Impact of Print Bed Build Location on the Dimensional Accuracy and Surface Quality of Parts Printed by Multi Jet Fusion*. Journal of Manufacturing Processes, 70, p. 290-299 (2021).
- [167] Z CORPORATION. – *Imprimantes 3D*. <http://www.zcorp.com/fr/Products/3D-Printers/spage.aspx> (2015).
- [168] Z CORPORATION. – *Z Corporation 3D Printing Technology*. https://www.ucy.ac.cy/arch/documents/3d_Printer_Lab/3D_Printing_Technology.pdf (2016).
- [169] FENCEROW (S.), EMAMJOMEH (S.E.), WIRTH (K.E.), SCHMIDT (J.) et PEUKERT (W.). – *Production of spherical wax and polyolefin microparticles by melt emulsification for additive manufacturing*. Chemical Engineering Science, 141, p. 282-292 (2016).
- [170] FARINIA GROUP. – *Available materials for metal additives manufacturing: characteristics and applications*. <http://www.farinia.com/additive-manufacturing/3d-materials/characteristics-and-applications-of-available-metals-for-additive-manufacturing> (2015).
- [171] SAE INTERNATIONAL. – *High-strength aluminum powder developed for additive manufacturing in aerospace, automotive*. <https://www.sae.org/news/2015/05/high-strength-aluminum-powder-developed-for-additive-manufacturing-in-aerospace-automotive> (2015).
- [172] KENZARI (S.), BONINA (D.), DUBOIS (J.M.) et FOURNÉE (V.). – *Additive manufacturing of lightweight, fully Al-based components using quasicrystals*. Journal of Materials Processing Technology, 214, p. 3108-3111 (2014).
- [173] LI (Y.), HU (Y.), CONG (W.), ZHI (L.) et GUO (Z.). – *Additive manufacturing of alumina using laser engineered net shaping: Effects of deposition variables*. Ceramics International, 43, p. 7768-7775 (2017).
- [174] FRAZIER (W.E.). – *Metal Additive Manufacturing: A Review*. Journal of Materials Engineering and Performance, 23, p. 1917-1928 (2014).
- [175] INSIS. – *La fabrication additive des alliages métalliques 1*. <https://www.insis.cnrs.fr/fr/la-fabrication-additive-des-alliages-metalliques-1> (2022).
- [176] SETROGLOU (K.). – *Sintavia develops new proprietary 3D printing process for NASA's copper alloy*. <https://3dprintingindustry.com/news/sintavia-develops-new-proprietary-3d-printing-process-for-nasas-copper-alloy-193128/> (2021).
- [177] SETROGLOU (K.). – *Infinite Flex launches new pure copper SLM powder, Alloyed develops 3D printed copper cooling plate*. <https://3dprintingindustry.com/news/infinite-flex-launches-new-pure-copper-slm-powder-alloyed-develops-3d-printed-copper-cooling-plate-202412/> (2022).
- [178] SHAIKHANAG (A.). – *Mycorena and Revo Foods begin collaborative research in 3D printing food*. <https://3dprintingindustry.com/news/mycorena-and-revo-foods-begin-collaborative-research-in-3d-printing-food-216022/> (2022).
- [179] CETIM. – *Les poudres examinées à la loupe*. <http://www.cetim.fr/fr/Actualites/En-France/A-la-une/Les-poudres-examinees-a-la-loupe> (2017).
- [180] NOTTEAU (Y.). – *NanoSteel a développé un acier dense spécialement conçu pour l'impression 3D*. <http://www.additiveverse.com/actualites/2014-10-01/adieu-les-risques-de-fissure-nanosteel-a-developpe-un-acier-dense-specialement-concu-pour-l-impression-3d> (2014).
- [181] DU PLESSIS (A.), MOHAMMAD (S.), RAZAVI (J.), BENEDETTI (M.), MURCHIO (S.), LEARY (M.), WATSON (M.), BHATE (D.) et BERTO (F.). – *Properties and applications of additively manufactured metallic cellular materials: A review*. Progress in Materials Science, 125, p. 100918 (2022).
- [182] LIPSON (H.) et KURMAN (M.). – *Impression 3D: la prochaine révolution*. Wiley & First Interactive Ed. Paris (2014).
- [183] RECROSIO (A.). – *Metal 3D Printing: Which Technologies for Which Applications?* https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/metal-3d-printing-which-technologies-for-which-applications/?utm_medium=email&utm_campaign=NL_%20US_%20131216&
- [utm_content=NL_%20US_%20131216&utm_medium=email&utm_campaign=NL_%20US_%20131216&utm_source=Campaign_%20Newsletter&utm_term=Learn_%20More](https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/metal-3d-printing-which-technologies-for-which-applications/?utm_medium=email&utm_campaign=NL_%20US_%20131216&) (2016).
- [184] EOS. – *Impression 3D métal de pointe? Absolutement*. <https://www.a3dm-magazine.fr/contenu-sponsorise/impression-3d-metal-de-pointe-absolutement> (2022).
- [185] FRAUNHOFER. – *Formnext 2016: Low Cost SLM-Anlage mit Herstellungskosten von unter 20.000 €*. http://www.ilt.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/pm2016/pressemitteilung_27102016.html (2016).
- [186] DONG (L.), MAKRAZI (A.), AHZI (S.) et REMOND (Y.). – *Three-dimensional transient finite element analysis of the selective laser sintering process*. Journal of Materials Processing Technology, 209, p. 700-706 (2009).
- [187] ZHONG (Y.), RÄNNAR (L.E.), WIKMAN (S.), KOPTYUG (A.), LIU (L.), CUI (D.) et SHEN (Z.). – *Additive manufacturing of ITER first wall panel parts by two approaches: Selective laser melting and electron beam melting*. Fusion Engineering and Design, 116, p. 24-33 (2017).
- [188] NICKELS (L.). – *Additive manufacturing: A user's guide*. Metal Powder Report, 71, p. 100-105 (2016).
- [189] MOUSSION (A.). – *3D Systems: de nouveaux alliages haute performance pour les secteurs de l'énergie et de l'aérospatiale*. <https://www.primante3d.com/3d-systems-alliages-18112022/> (2022).
- [190] AJDARY (R.), KRETZSCHMAR (N.), BANI ASADI (H.), TRIFOL GUZMAN (J.), SEPPÄLÄ (J.), PARTANEN (J.) et ROJAS GAONA (O.). – *Selective Laser Sintering of Lignin-Based Composites*. ACS Sustainable Chemistry and Engineering, 9, p. 2727-2735 (2021).
- [191] SCHWALBE (M.). – *Predictive Theoretical and Computational Approaches for Additive Manufacturing: Proceedings of a Workshop*. U. S. National Committee on Theoretical and Applied Mechanics, ISBN 978-0-309-44975-5 | doi : 10.17226/23646, <http://www.nap.edu/23646> (2016).
- [192] BIKAS (H.), STAVROPOULOS (H.) et CHRYSOLOURIS (G.). – *Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review*. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 83, p. 389-406 (2016).
- [193] CONTUZZI (N.), CAMPANELLI (S.) et LUDOVICO (A.D.). – *3D Finite Element Analysis in the Selective Laser Melting Process*. International Journal of Simulation Modelling, 10, p. 113-121 (2011).
- [194] DEHOFF (R.R.), KIRKA (M.M.), SAMES (W.J.), BILHEUX (H.), TREMSIN (A.S.), LOWE (S.E.) et BABU (S.S.). – *Site specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing*. Materials Science and Technology, 31, p. 931-938 (2015).
- [195] GANERIWALA (R.) et ZOHDI (T.I.). – *Multiphysics Modeling and Simulation of Selective Laser Sintering Manufacturing Processes*. Procedia CIRP, 14, p. 299-304 (2014).
- [196] HODGE (N.E.), FERENCZ (R.M.) et SOLBERG (J.M.). – *Implementation of a thermomechanical*

- nical model for the simulation of selective laser melting. *Computational Mechanics*, 54, p. 33-51 (2014).
- [197] SMARTECH. – *The Future of Metal Powder Additive Materials – 2022 Additive Manufacturing Market Analysis*. <https://www.smartechanalysis.com/smartech-6k-2022-additive-manufacturing-market-analysis/> (2022).
- [198] SUNNY (S.), YU (H.), MATHEWS (R.) et MALIK (A.). – *A predictive model for in situ distortion correction in laser powder bed fusion using laser shock peen forming*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* volume, 112, p. 1319-1337 (2021).
- [199] REISER (R.), KOCH (L.), DUNN (K.A.), MATSUURA (T.), IWATA (F.), FOGEL (O.), KOTLER (Z.), ZHOU (N.), CHARIPAR (K.), PIQUÉ (A.), ROHNER (P.), POULIKAKOS (D.), LEE (S.), SEOL (S.K.), UTKE (I.), VAN NISSELROY (C.), ZAMBELLI (T.), WHEELER (J.M.) et SPOLENAK (R.). – *Metals by micro-scale additive manufacturing: comparison of microstructure and mechanical properties*. *Arxiv* : 1912.03581v1 (2019).
- [200] KETY (S.). – *Traitement thermique pour les pièces fabriquées de manière additive : un sale petit secret qui reste à comprendre*. <https://3dadept.com/traitement-thermique-pour-les-pieces-fabriquees-de-maniere-additive-un-sale-petit-secret-qui-reste-a-comprendre/> (2022).
- [201] LAMIGEON (V.). – *L'impression 3D, nouvelle révolution industrielle*. <http://www.challenges.fr/challenges-soir/20150908.CHA9140/l-impression-3d-nouvelle-revolution-industrielle.html> (2015).
- [202] CHALLENGES. – *AddUp, acteur majeur en France de l'impression 3D métal*. https://www.challenges.fr/economie/addup-acteur-majeur-en-france-de-l-impression-3d-metal_766157 (2021).
- [203] MOLLON (G.). – *A numerical framework for discrete modelling of friction and wear using Voronoi polyhedrons*. *Tribology International*, 90, p. 343-355 (2015).
- [204] ENFERAD (S.). – *Compacting and aging of powders: influence of the formulation*. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03203307/document> (2020).
- [205] ENFERAD (S.), PETIT (J.), GAIANI (C.), FALK (V.), BURGAIN (J.), KIESGEN DE RICHTER (S.) et JENNY (M.). – *Effect of particle size and formulation on powder rheology*. *Particulate Science and Technology*, 39, p. 1-9 (2020).
- [206] KELLER (S.) et JAEGER (H.). – *Aleatory Architectures*. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1510/1510.05721.pdf> (2016).
- [207] OUABBAS (Y.), GALET (L.), PATRY (S.) et DEVRIENT (L.). – *Modification des propriétés des poudres par enrobage à sec dans un mélangeur Cyclomix*. P. 64-67 in *Formulation des solides divisés*, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00419494/document> (2020).
- [208] MAAMOUN (A.), XUE (Y.), ELBESTAWI (M.) et VELDTHUIS (S.). – *Effect of Selective Laser Melting Process Parameters on the Quality of Al Alloy Parts: Powder Characterization, Density, Surface, Roughness, and Dimensional Accuracy*. *Materials*, 11, p. 2343 (2018).
- [209] LIN (S.L.), LIN (C.C.), LIN (D.Y.) et CHUANG (C.S.). – *Fabrication and analysis of 3D objects using layerwise manufacturing technology*. *IEEE/NEMS* 2013, p. 763-766 (2014).
- [210] PONCHE (R.), KERBRAT (O.), MOGNOL (P.) et HASCOET (J.Y.). – *A novel methodology of design for additive manufacturing applied to additive laser manufacturing process*. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 30, p. 389-398 (2014).
- [211] AUSSILLOUS (P.) et QUÉRÉ (D.). – *Liquid marbles*. *Nature*, 411, p. 924-927 (2001).
- [212] LAGUBEAU (G.). – *Interfaces à grains, et autres situations de mouillage nul*. Thèse de l'UPMC, Paris (2010).
- [213] STUCKY (M.). – *Fabrication additive métallique au CTIF*. <http://souspression.canalblog.com/archives/2015/11/16/32918893.html> (2015).
- [214] CASTEL (A.). – *Technologies duales : Les imprimantes 3D en Chine, Inde et Singapour*. Délégation aux Affaires stratégiques, <https://books.apple.com/us/book/technologies-duales-les-imprimantes-3d-en-chine-russie/id1137665825> (2014).
- [215] VERQUIN (B.). – *Fabrication additive par fusion laser : étude de cas*. Cetim Ed. Paris (2014).
- [216] MARGUERAY (T.) et VOLLARD (L.). – *Fabrication additive métallique : technologies et opportunités*. http://www.nae.fr/wp-content/uploads/2015/06/FabAdditiveMetallique_TechnoOpportunités-NAE.pdf (2015).
- [217] YANG (C.J.) et WU (S.S.). – *Sustainable Manufacturing Decisions through the Optimization of Printing Parameters in 3D Printing*. *Applied Science*, 12, p. 10060 (2022).
- [218] ZHANG (M.H.), LI (C.H.) et ZUO (J.L.). – *A variable stiffness adhesive enabled by joule heating effect*. *Chemical Engineering Journal*, 433, p. 133840 (2022).
- [219] VISSER (C.W.), AMATO (D.N.), MUELLER (J.) et LEWIS (J.A.). – *Architected Polymer Foams via Direct Bubble Writing*. *Advances Materials*, 2019, p. 1904668 (2019).
- [220] DESHPANDE (V.S.) et FLECK (N.A.). – *Energy absorption of an egg-box material*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 51, p. 187-208 (2003).
- [221] FLECK (N.A.) et DESHPANDE (V.S.). – *The resistance of clamped sandwich beams to shock loading*. *Journal of Applied Mechanics*, 71, p. 386-401 (2004).
- [222] BOUAZIZ (O.), BRÉCHET (Y.) et EMBURY (J.D.). – *Heterogeneous and architected materials: A possible strategy for design of structural materials*. *Advanced Engineering Materials*, 10, p. 24-36 (2008).
- [223] BRÉCHET (Y.) et EMBURY (J.D.). – *Architected materials: Expanding materials space*. *Scripta Materialia*, 68, p. 1-3 (2013).
- [224] WANG (P.), YANG (F.), LU (G.), BIAN (Y.), ZHANG (S.), ZHENG (B.) et FAN (H.). – *Anisotropic compression behaviors of bio-inspired modified body-centered cubic lattices validated by additive manufacturing*. *Composites, Part B: Engineering*, 234, p. 109724 (2022).
- [225] YAO LI (P.), MA (Y.E.), BO (W.), SUN (W.B.), QIAN (X.), ZHANG (W.), HAI (Z.) et WANG (H.). – *Mechanical behaviors and failure modes of additive manufactured Ti6Al4V lattice structures under compressive load*. *Thin-Walled Structures*, 180, p. 109778 (2022).
- [226] KALIA (G.), SHARMA (A.) et BABBARBET (A.). – *Use of three-dimensional printing techniques for developing biodegradable applications: A review investigation*. *Materials Today: Proceedings*, 62, p. 346-352 (2022).
- [227] MALEKI (E.), BAGHERIFARD (S.), BANDINI (M.) et GUAGLIANO (M.). – *Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities*. *Additive Manufacturing*, 37, p. 101619 (2021).
- [228] VERBELEN (L.). – *Towards Scientifically Based Screening Criteria for Polymer Laser Sintering*. PhD – KU Leuven, Belgium (2016).
- [229] GRADL (P.), TINKER (D.C.), PARK (A.), MIRELES (O.R.), GARCIA (M.), WILKERSON (R.) et MCKINNEY (C.). – *Robust Metal Additive Manufacturing Process Selection and Development for Aerospace Components*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, p. 6013-6044 (2022).
- [230] KERN (M.). – *Problèmes inverses*. *Techniques de l'Ingénieur* [AF 1 380] (2010).
- [231] ZHOU (S.), ZHANG (J.), ZHANG (Q.), HUANG (Y.) et WEN (M.). – *Uncertainty Theory-Based Structural Reliability Analysis and Design Optimization under Epistemic Uncertainty*. *Applied Sciences*, 12, p. 2846 (2022).
- [232] HERNÁNDEZ-CASTELLANO (P.), MARTÍNEZ-RIVERO (M.D.), MARRERO-ALEMÁN (M.D.) et SUÁREZ-GARCÍA (L.). – *Manufacturing Process Selection Integrated in the Design Process: University and Industry*. *Procedia Manufacturing*, 41, p. 1079-1086 (2019).
- [233] NIAKIA (M.K.), TORABIA (S.A.) et NONINO (F.). – *Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies: The role of sustainability*. *Journal of Cleaner Production*, 222, 381e392 (2019).
- [234] NATIONAL ACADEMY PRESS. – *Materials Science and Engineering in a Post-Pandemic World: A DoD Perspective: Proceedings of a Workshop*. <http://nap.edu/26226> (2021).
- [235] NATIONAL ACADEMY PRESS. – *Globalization of Defense Materials and Manufacturing: Proceedings of a Workshop*. <http://nap.edu/25101> (2018).
- [236] NATIONAL ACADEMY PRESS. – *Data-Driven Modeling for Additive Manufacturing of Metals: Proceedings of a Workshop*. <http://nap.edu/25481> (2019).
- [237] BROWN (E.). – *Innovative design thinking for a fast-changing world – Blade Kotelly is a senior lecturer on design thinking and innovation, bringing expertise to the world's top brands to better innovate in complex product and service environments*. <https://news.mit.edu/2021/innovative-design-thinking-fast-changing-world-blade-kotelly-0420> (2021).
- [238] MIT NEWS OFFICE. – *Patents forecast technological change – New method uses patent data to estimate a technology's future rate of improvement*. <https://news.mit.edu/2015/>

patents-forecast-technological-change-0415 (2015).

- [239] LECHEVALLIER (G.) et PETIT (M.). – *Ces principes de la fabrication additive qui s'appliquent à la conception de produits*. <https://www.lemagit.fr/tribune/Les-principes-de-la-fabrication->

additive-appliquee-a-la-conception-de-produits (2021).

- [240] ZEWE (A.). – *Accelerating the discovery of new materials for 3D printing – A new machine-learning system costs less, generates less waste, and can be more innovative than manual discovery methods*. MIT News,

<https://news.mit.edu/2021/accelerating-materials-3d-printing-1015> (2021).

- [241] RANJAN (R.), KUMAR (D.), KUNDI (M.) et MOI (S.C.). – *A critical review on Classification of materials used in 3D printing process*. Materials Today Proceedings, 61, p. 43-49 (2022).

À lire également dans nos bases

ANDRÉ (J.C.). – *Bio-printing – De l'organe à la médecine personnalisée, résultats et promesses*. [RE 268] (2021).

ANDRÉ (J.C.). – *Impression 3D « volumique » : du décimètre au μm ?* [RE 289][RE 289] (2021).

ANDRÉ (J.C.). – *Matériaux pour impression 4D*. [BM 7 937] (2023).

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

ANDRÉ (J.C.). – *Séréolithographie par photopolymérisation*. [BM 7 910] (2021).

ANDRÉ (J.C.) et DEMOLY (F.). – *Fabrication additive alimentaire : une approche systémique*. [F 3 100] (2021).

BERNACHE-ASSOLLANT (D.) et BONNET (J.P.). – *Frittage : aspects physico-chimiques – Partie 1 : frittage en phase solide*. [AF 6 620] (2005).

BERNACHE-ASSOLLANT (D.) et BONNET (J.P.). – *Frittage : aspects physico-chimiques – Partie 2 : frittage en phase liquide*. [AF 6 621] (2005).

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

DELLEA (O.), PHILIPPOT (C.), ROUSSELON (M.) et STECK (J.). – *Sécurité et fabrication additive – Généralités*. [BM 7 995] (2023).

DELLEA (O.), PHILIPPOT (C.), ROUSSELON (M.) et STECK (J.). – *Sécurité et fabrication additive – Procédés hors matériaux pulvérulents*. [BM 7 996] (2023).

DELLEA (O.), PHILIPPOT (C.), ROUSSELON (M.) et STECK (J.). – *Sécurité et fabrication additive – Procédés avec matériaux pulvérulents*. [BM 7 997] (2023).

DELLEA (O.), PHILIPPOT (C.), ROUSSELON (M.) et STECK (J.). – *Sécurité et fabrication additive – Expositions particulières*. [BM 7 998] (2023).

DUBOIS (P.), SEGONDS (F.) et LAVERNE (F.). – *Fabrication additive – Principes généraux*. [BM 7 017] (2018).

DE FORMANOIR (C.), GODET (S.), GOUNE (M.), BORDERE (S.) et GORSSE (S.). – *Fabrication additive de pièces en titane par fusion sélective de lit de poudre*. [BM 7 930] (2020).

GIANARDI (D.), VOLPI (G.) et GARCIA (J.). – *Fabrication additive-impression 3D dans le domaine de la santé*. [MED 7 305] (2020).

GUIGON (P.) et SALEH (K.). – *Caractérisation et analyse des poudres – Propriétés comportementales des solides divisés*. [J 2 252] (2022).

GUIGON (P.) et SALEH (K.). – *Caractérisation et analyse des poudres – Propriétés physiques des solides divisés*. [J 2 251] (2022).

LE DUIGOU (A.), CASTRO (M.) et CHABAUD (G.). – *Impression 3D/4D de matériaux composites thermoplastiques*. [BM 7 922] (2021).

MILLET (Y.). – *Fabrication de poudres métalliques par la méthode PREP®*. [IN 221] (2020).

PELLAFOL (A.). – *Panorama des technologies de fabrication additive utilisant la silicone*. [BM 7 925] (2020).

PILLOT (S.). – *Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques*. [BM 7 900] (2016).

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

TI. – *Impression 3D de matériaux composites à matrice polymère – Revue et prospective*. [BM 7 923] (2020).

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs (liste non exhaustive)

Dans le foisonnement actuel en termes de matériaux, il est difficile d'informer de manière rigoureuse le lecteur sur les possibilités d'accès à des familles de matériaux qui, chez les fournisseurs, disposent souvent de références « maison », mais aussi du fait que l'on assiste à une « guerre d'achats d'entreprises concernées par l'impression 3D ». Les informations présentées dans cette annexe sont donc provisoires et non exhaustives.

■ Fournisseurs de machines 3D (liste non exhaustive)

3D Ceram (<https://3dceram.com>)
3D Systems (<https://fr.3dsystems.com>)
ARC Group Worldwide (<https://arcw.com>)
Arcam AB
Aubert & Duval (<https://www.aubertduval.com/fr>)
Capifil (<https://www.capifil-extrusion-plastique.fr>)
Carbone 3D
Cookson Precious Metals (<https://www.cookson-industrial.com>)
Carpenter Additive (<https://www.carpenteradditive.com>)
Elkem Silicones France SAS (<https://www.elkem.com>)
EnvisionTEC GmbH (<https://etec.desktopmetal.com>)
EOS GmbH (Electro Optical Systems)
ExOne Company
GPI Prototype and Manufacturing Services

Greatbarch
Hoganas, Kimya
Materialise
HP Impression 3D
Impossible Object
Imprimante 3D
Makershop (<https://www.makershop.fr>)
Markforged
Materialise (<https://www.materialise.com>)
Morries Technologies
Nano Dimension (<https://www.nano-di.com>)
Nanoscribe (<https://www.nanoscribe.com>)
Prodways Group
Sandvik, Solvay
Selectarc Welding
Sirona Dental System
SLM Solutions GmbH
Stratasys Inc.
Truform
Z Corporation (3D Systems)

■ Fournisseurs de résines (liste non exhaustive)

Arkema (<https://www.arkema.com/france/fr/>)

MATÉRIAUX POUR L'IMPRESSION 3D

BASF (<https://www.basf.com>)
 Covestro Additive Manufacturing
 Loctite Henkel
 Fournisseurs classiques de substance chimiques

Fournisseurs de poudres (liste non exhaustive)

AM Polymers (<https://www.am-polymers.de>)
 Arkema (<https://www.arkema.com/france/fr/>)
 BASF (<https://www.basf.com>)
 Evonik (<https://corporate.evonik.com>)
 Fabulous (<https://fabulous.com.co>)
 Lubrizol (<https://www.lubrizol.com>)
 Polymères
 – Z Corporation

– 3D Systems
 Matériaux métalliques
 – Farinia Group
 Alliages métalliques
 – SAE Int (scalmalloy)

Types de filaments et fournisseurs (liste non exhaustive)

MoldLay
 Nylon (colle Nylon Glue Complete Tauman)
 PEEK
 PCTPE
 CorkFill (ColorFabb)
 Ninja Flex

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

- Électronique
- 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