



**TECHNIQUES  
DE L'INGÉNIEUR**

Réf. : **BM7970 V2**

Date de publication :  
**10 novembre 2020**

# Impression 3D : niches applicatives porteuses

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

par **Jean-Claude ANDRÉ**

## Mots-clés

fabrication additive | 4D printing | Interdisciplinarité | nano-fabrication | micro-fluidique 3D | bio-printing

## Keywords

additive manufacturing | 4D printing | Interdisciplinarity | nano-manufacturing | 3D micro-fluidics | bio-printing

**Résumé** La fabrication additive occupe en 2020 des marchés stabilisés comme ceux liés à la réalisation de pièces prototypes, de pièces mécaniques, d'éléments artistiques et de mode, etc. Ces marchés se développent de manière continue exploitant des innovations incrémentales. Indépendamment de cet aspect, de nombreux verrous scientifiques et technologiques sautent les uns après les autres pour que la technologie 3D occupe de nouvelles niches comme le bio-printing et le 4D printing (association du temps aux trois paramètres d'espace). Cet article rassemble des éléments de prospective reliés à ces nouveaux horizons qu'il s'agisse d'échelles aussi bien nanométriques que d'échelles de tailles plus « humaines », sans oublier l'importance qu'a pris la fabrication additive dans la pandémie de la Covid-19...

**Abstract** In 2020, additive manufacturing covers stabilized markets as those linked to the realization of prototypes, of mechanical objects, of artistic and fashion elements, etc. These markets are under continuous development exploiting incremental innovations. Independently of this aspect, numerous scientific and technological locks are in turn removed so that 3D technology occupies new niches as the bio-printing, and the 4D printing (association of the time parameter to the 3 space parameters). This article gathers forecasting elements of linked up with these new horizons be it about nano-metric scales of more "human" sizes... not to mention the importance of additive manufacturing in the Covid-19 pandemics.

## Pour toute question :

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

## Par mail :

infos.clients@teching.com

## Par téléphone :

00 33 (0)1 53 35 20 20

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

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

© Techniques de l'Ingénieur | Tous droits réservés

# Impression 3D : niches applicatives porteuses

par **Jean-Claude ANDRÉ**  
Directeur de recherche au CNRS

<b>1. Fabrication additive et thèmes émergents</b>	BM 7 970v2 – 2
1.1 Thèmes à explorer	— 2
1.2 Courbe de Hype	— 6
<b>2. Matière informée et nano-fabrication</b>	— 7
2.1 Partir de la matière	— 7
2.2 Partir du procédé 3D	— 9
2.3 Nano-fabrication de matériaux (nano-formulation de matériaux) ...	— 9
2.4 Nano-fabrication et électronique	— 10
<b>3. Micro-fabrication 3D et Micro-fluidique</b>	— 11
<b>4. Impression 4D</b>	— 12
4.1 Organisation stimulée/programmée	— 12
4.2 Fabrication additive et matière informée/programmable	— 13
4.2.1 Quelques résultats typiques	— 13
4.2.2 Quelques contraintes	— 14
4.3 Fabrication additive hybride et matière informée/programmable ...	— 15
<b>5. Organoïdes et bio-printing</b>	— 16
5.1 Bio-printing	— 16
5.2 Organoïdes et bio-printing	— 17
<b>6. Covid-19 et impression 3D</b>	— 17
<b>7. Conclusion</b>	— 19
<b>8. Glossaire</b>	— 19
<b>Pour en savoir plus</b>	Doc. BM 7 970v2

**L**e concept d'impression 3D a été opérationnalisé en 1984 par deux brevets concernant la stéréolithographie consistant en la polymérisation résolue dans l'espace d'une résine sensible à la lumière. Le lecteur intéressé pourra utilement se reporter aux publications de Techniques de l'Ingénieur sur le sujet [À lire également dans nos bases]. Les coordonnées de l'objet à réaliser étaient mémorisées dans un ordinateur qui pilotait des miroirs galvanométriques, pour transformer un liquide en solide par polymérisation d'une couche fluide, voxel après voxel, d'où le concept 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 photo-transformé. Les autres principes de fabrication reposent sur la même base d'additivité, les procédés différant essentiellement par la nature et les modes d'adhésion de la matière à l'objet en construction. La règle du jeu est bien de disposer soit d'une énergie localisée, soit d'un positionnement du matériau localisé, soit des deux. Les techniques de fabrication additive sont maintenant bien connues avec de nombreux avantages.

Avec une dynamique continue de l'ordre de 20 % d'augmentation par an, en environ 35 ans, on est passé de dimensions centimétriques à l'espace nanométrique (nanotechnologies 3D), mais également au décimètre (bâtiment et

travaux publics), de la pièce prototype avec le concept de photocopieur 3D à des applications réelles. Pratiquement tous les domaines sont concernés, depuis l'espace, l'avionique, l'automobile, la mécanique, jusqu'à l'art et les applications médicales (médicaments 3D, prothèses, etc.) chaque fois que la fabrication additive apporte un plus déterminant en termes de fonctionnalité et/ou coût.

L'objet de cet article n'est pas d'analyser les différentes niches applicatives qui continuent à se développer, mais d'examiner sur le front de la recherche quels peuvent être les domaines significatifs du développement de la fabrication additive dans le futur proche. À partir d'une analyse de situation (bibliographie et littérature grise issue de la consultation d'internet), plusieurs domaines encore non stabilisés émergent, la plupart s'appuyant sur des bases de science « dure » (nano-micro-fabrication et micro-fluidique ; impression 4D ; organoïdes et bio-printing), mais également, suite à la pandémie induite par la Covid-19. Ce dernier axe amène à réfléchir à des ouvertures organisationnelles finalement non anticipées avant la crise.

Dans cette version révisée de [BM 7 970], cet axe est donc nouveau et ceux qui avaient déjà été introduits en 2017 ont été profondément remaniés compte tenu du foisonnement scientifique (ou au contraire devant des blocages épistémologiques), modifiant assez notablement le paysage scientifique et technologique de ces domaines émergents.

## 1. Fabrication additive et thèmes émergents

Le concept initial d'impression 3D rappelé en introduction, initié en 1984 (André [1]), a été rapidement modifié pour arriver à celui de fabrication additive, pour faire la différence avec la fabrication soustractive réalisée par élimination de matière. Des travaux récents permettent de s'affranchir des principes d'additivité en réalisant les objets 3D directement (procédé 3D volumique). Il s'agit alors d'impression 3D... Dans le corps du texte, on retrouvera indifféremment ces deux expressions. De la même manière, on considère aujourd'hui qu'il y a, depuis la stéréolithographie de 1984, six autres technologies génériques de fabrication additive, rappelées dans la figure 1 [2] [3] ; la grande majorité de ces technologies sert au développement des thèmes émergents qui vont nourrir cet article. Le tableau 1 apporte quelques commentaires associés à la fabrication additive en général et orientés sur les sujets traités ici.

### 1.1 Thèmes à explorer

C'est bien connu, chaque fois que c'est possible, on cherche à pousser les technologies pour explorer de nouvelles niches applicatives. Sur la base de cette exploration généralement incrémentale, il n'est pas toujours évident que l'on cherche *a priori* à satisfaire le besoin d'un client. C'est la réussite expérimentale (preuve de concept) qui peut conduire à une logique d'offre. On est donc loin des processus qualité de la norme ISO 10006 sur le management de la qualité dans les projets. La création d'un besoin nouveau comporte plusieurs aspects :

- performance : service rendu par le produit/procédé nouveau ; marché ; fonctionnalités ; caractéristiques techniques ;
- coût(s) relativement à l'objectif client ; facilité de mise en œuvre ; robustesse ;
- délai : chemin à parcourir pour passer du besoin à sa satisfaction.

Des adaptations et des améliorations sont souvent nécessaires dans les phases et entre les phases présentées ci-dessus [4]. Même dans le domaine de la fabrication additive, les systèmes sont « homéostatiques », c'est-à-dire qu'ils essaient de retrouver un état stable dès qu'une perturbation extérieure les fait évoluer, avec une forte tendance à la continuité.

Or, depuis les travaux de Schumpeter en 1934 [5], les chercheurs explorent la question de la détection et de la reconnaissance des opportunités d'innovation. Elle est reconnue comme particulièrement critique et difficile, empreinte d'incertitude, de nouveauté, de subjectivité et d'imaginaire [6]. Selon Blanco [7], l'opportunité d'innovation se bâtit à partir de trois aspects essentiels :

- la confiance dans l'existence d'un marché futur [8] ;
- le cheminement qui marque la faisabilité de l'innovation conduisant à une preuve de concept ;
- l'impact et les bénéfices futurs attendus présentés dans la description cohérente et crédible de cette innovation.

Mais parler de niches porteuses, c'est faire état d'un futur possible qui n'est pas sûr. Le document sur ce même thème rédigé en 2016 [9] s'était engagé sur des voies qui se voulaient prometteuses, et d'autres ont émergé... Dans une approche prospective où c'est l'incertain qui est exploré sur des durées très longues, il y a possibilité d'être original, sans contrainte majeure hors motivation et conviction, ce qui permet face à des avenir multiples et indéterminés de remettre en cause le confort intellectuel, et de tenter de réveiller les consciences endormies sur de fausses ou d'anciennes certitudes. Il s'agit ici de concevoir les futurs désirés possibles et en support les moyens réels d'y parvenir [10] ; il s'agit bien d'une approche de l'avenir qui ne repose pas uniquement sur l'extrapolation des tendances passées, induisant la mise en évidence de certaines ruptures à opérer. Les discontinuités se produisent parfois, précédées de signes avant-coureurs et c'est tout le débat des signaux faibles qui rapprochent la créativité focalisée sur un objet et la prospective, appliquée ou non au domaine 3D.

Dans les faits, la recherche de l'émergence de niches applicatives a reposé sur le travail publié dans Techniques de l'Ingénieur [9],

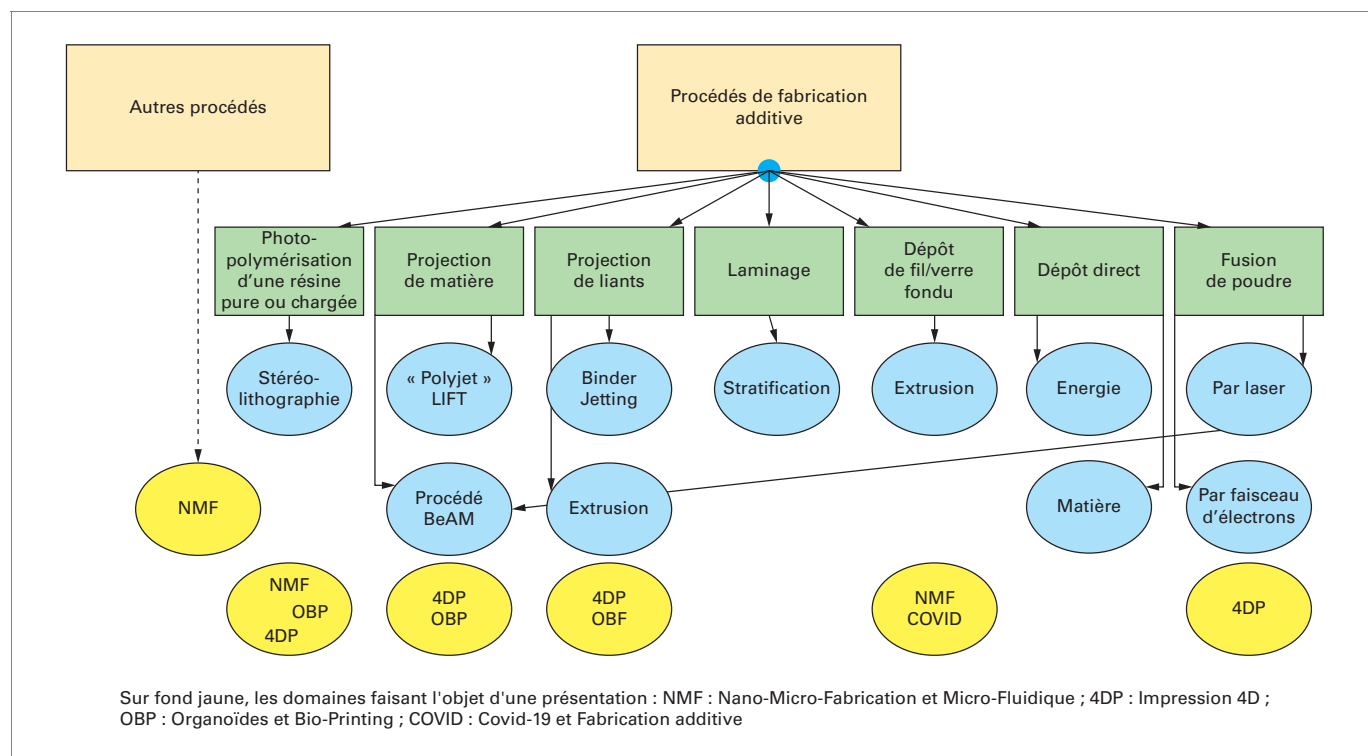


Figure 1 – Les différents procédés de fabrication additive

Tableau 1 – Les différentes méthodes de fabrication additive : quelques éléments de différenciation

Thème évoqué	Appellation du procédé	Nom anglais	Commentaires
Stéréolithographie	SLA	Stereo-Lithography	Polymérisation d'une résine chargée ou non induite par de la lumière Différents systèmes d'irradiation
Fusion de fil	FDM	Fused Deposition Modeling	Fusion de fil : dépôt strate par strate d'une fine couche de fil fondu. La matière se refroidit au contact de l'air et se solidifie Du polymère fondu aux métaux en passant par le verre
	FFF	Fused Filament Fabrication	Idem
Collage de feuilles ou de poudres	SDL	Selective Deposition Lamination	Feuilles associées à une colle activable : utilise le système de jet d'encre (matière photosensible ou réagissant aux UV)
	SC	Strato-Conception	Découpe de feuilles – assemblage « mécanique » ; à chaque couche, un laser ou un outil tranchant enlève les contours de l'objet désiré
	3DP	Three Dimensional Printing	Poudres associées à une colle ; utilise le système de jet d'encre (matière photosensible ou réagissant aux UV) ou un collage thermique
	BJ	Binder Jetting	Idem ; des particules sont déposées sur le plateau d'impression et liées par l'ajout d'un liquide agrégateur, éventuellement coloré
	SUR	Soluble/Unsoluble Reaction	Changement de solubilité d'un matériau organique

Tableau 1 – Les différentes méthodes de fabrication additive : quelques éléments de différenciation (suite)			
Thème évoqué	Appellation du procédé	Nom anglais	Commentaires
Fusion/Frittage de poudres	SLS	Selective Laser Sintering	Frittage induit par laser en surface plane
	SLM	Selective Laser Melting	Fusion induite par laser en surface plane
	EBM	Electron Beam Melting	Fusion induite par un faisceau d'électrons
	LMD	Laser Metal Deposition	Dépôt de métal simultané avec sa fusion
	CLAD	Construction Laser Additive Directe	Apport simultané de matière et d'énergie lumineuse : matière fondue lors de son dépôt par une source thermique très dirigée
	MPA	Metal Powder Application	Idem ; énergie cinétique des particules

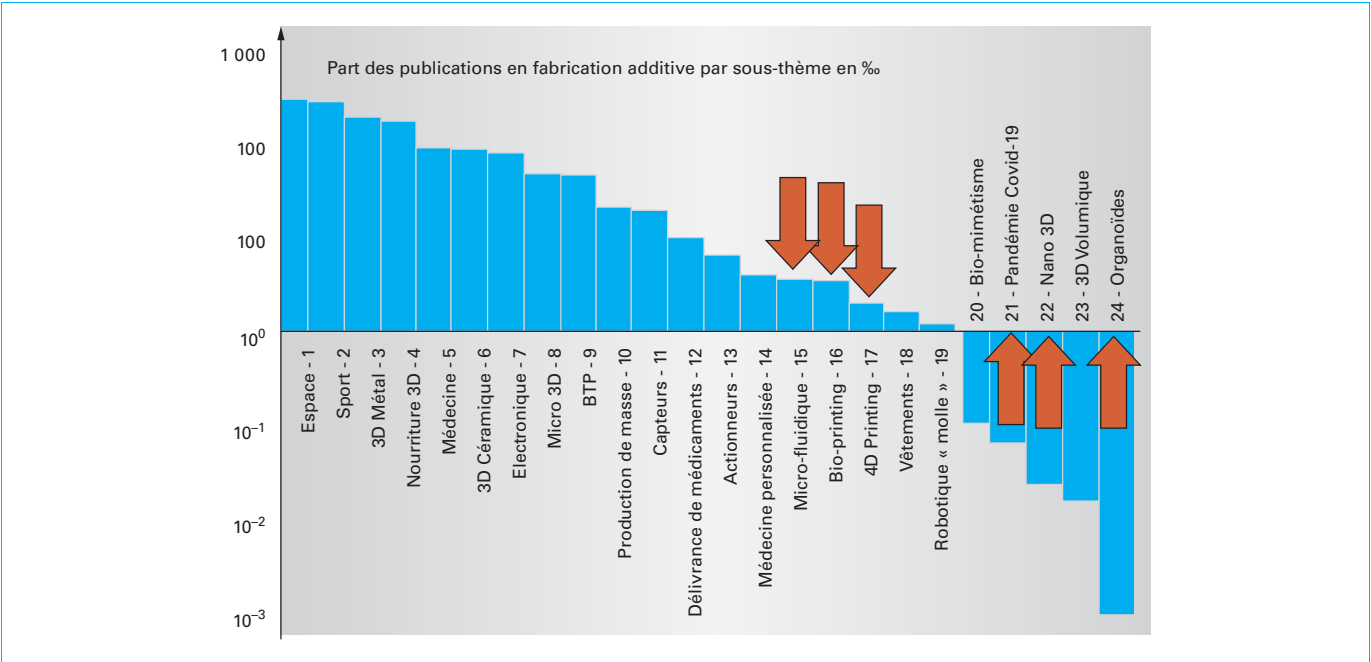


Figure 2 – Le CNRS fait état de 125 000 publications en fabrication additive en juin 2020 ; chaque sous-domaine participe à une valeur relative inférieure à l'unité à son développement

une analyse bibliographique scientifique (site du CNRS) et un regard sur les thèmes à partir du nombre de citations issues de Google. D'un point de vue bibliographique, comme le montre la figure 2 on retrouve des lames de fond correspondant aux domaines déjà pris en considération par la société (et sans doute pour lesquels des financements existent pour soutenir la recherche), qui s'appuient sur les technologies présentées figure 1, et des signaux faibles qui peuvent correspondre à de futures niches.

La figure 3 s'appuie sur cette connaissance mais prend en compte l'intérêt qu'a la société (que l'auteur ne peut pas définir), défini par le nombre de citations issues d'internet.

Ce que montre cette figure, ce sont des domaines classiquement attractifs pour la société (sport, vêtements), mais également des situations où la science n'a pas encore eu le temps de s'intéresser valablement à un sujet (exemple de l'utilisation de l'impression 3D

durant la pandémie de Covid-19). Sur la base de ces interrogations, plusieurs sujets vont être traités dans cet article, dont certains reprendront des travaux précédents de André [9]. Il s'agit des thèmes suivants : matière informée et nano-fabrication, micro-fabrication 3D et micro-fluidique, impression 4D (avec ses volets bio-mimétisme, robotique souple, capteurs et actionneurs), organoïdes et bio-printing (terme anglo-saxon utilisé par les scientifiques pour « bio-impression » ; c'est celui-ci qui sera utilisé dans le document), sans oublier un élément non anticipé, celui de l'impression 3D dans une économie de survie durant la pandémie de la Covid-19.

Il s'agit de tenir compte de la réalité (publications) mais avec des signaux généralement faibles, de besoins de la société, ou simplement d'aventures intellectuelles répondant à des besoins de connaissance pour la connaissance. Dans les faits, les niveaux de maturité des thèmes qui vont être abordés sont très variables, avec des cibles applicatives généralement non envisagées il y a

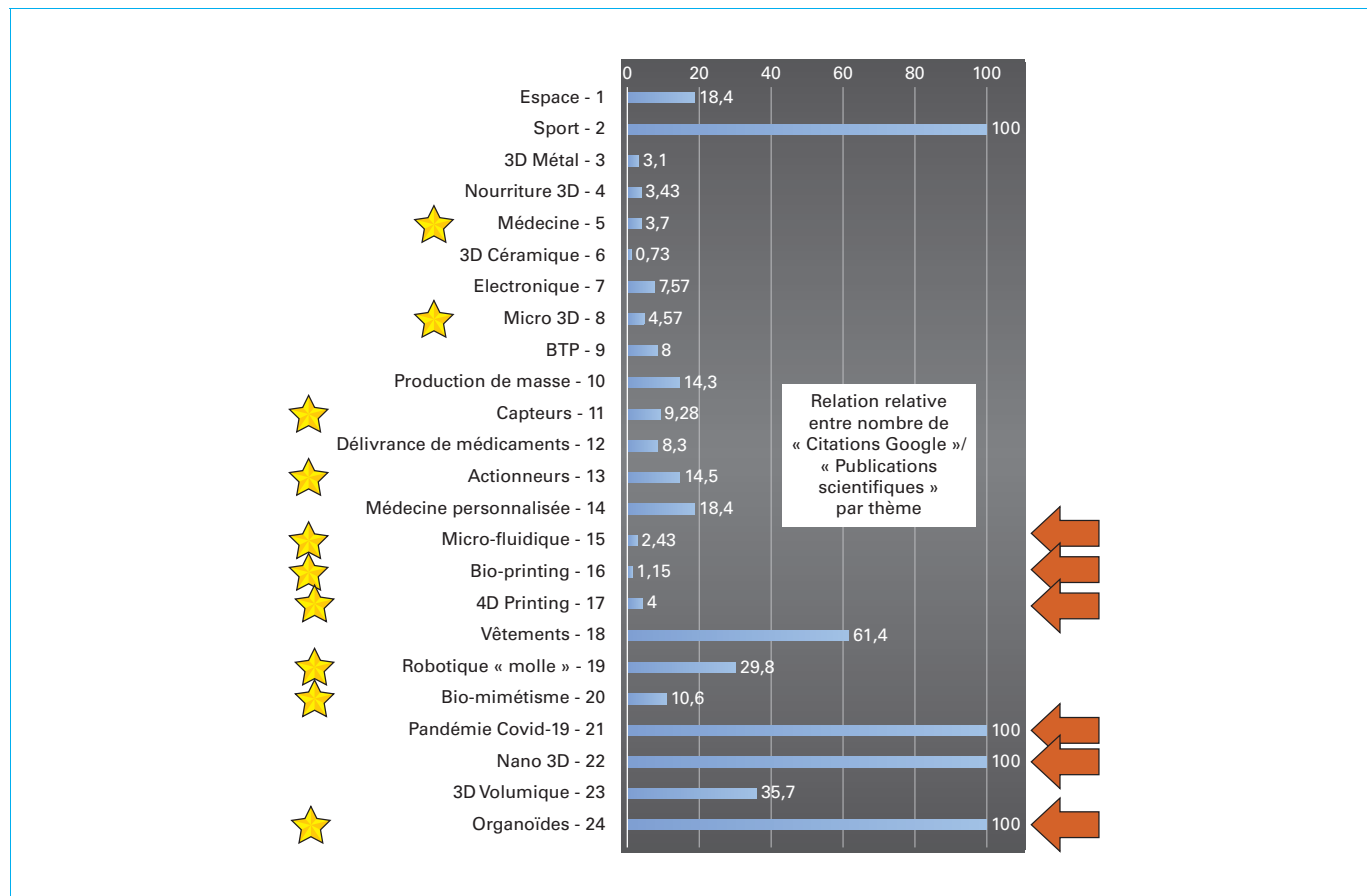


Figure 3 – Domaines applicatifs surévalués relativement à la littérature scientifique

quelques années, sans qu'on puisse facilement parler de ruptures. Ainsi, certains se préoccupent d'inventer des dispositifs qui peuvent changer le cours des choses sur des bases de robotique collective ou de fabrication additive 4D introduisant une dimension temporelle ou fonctionnelle, de bio-printing (faire du vivant 3D ou pour le vivant avec des aspects évidents en termes de réparation d'organes, voire de recherche de l'immortalité ou d'autres visions...), etc. Le fond de l'article concerne ces évolutions non classiques de la fabrication additive, des technologies 4D qui sont encore à construire, dont certaines sont extraordinaires et porteuses de futur technologique avec différentes niches applicatives, mais aussi de voir quelles sont les limites technologiques comme le couplage résolution-temps de fabrication et épistémologiques lourdes associées à ces nouveaux enjeux empreints de complexité (systèmes dynamiques non-linéaires) et fortement interdisciplinaires comme en bio-printing. C'est de cet ensemble nouveau et disparate que l'auteur va traiter.

Pour se convaincre de la pertinence de ces choix, une étude bibliométrique a été réalisée sur les quatre thèmes suivants : additive manufacturing, bio-printing, 4D printing, micro-fluidics et nano-fabrication. La figure 4 montre déjà que pour la fabrication additive, la progression du nombre de publications suit une loi exponentielle en fonction du temps. Mais dans le même temps, le rapport du nombre de publications d'un sous-thème rapporté au nombre local de publications sur la fabrication additive ramené à 1 pour 2020 (à la date du 31 mai 2020) fait état d'un développement sur-exponentiel pour les quatre thèmes retenus (figure 5). En effet, si la progression des nombres de publications avait disposé du

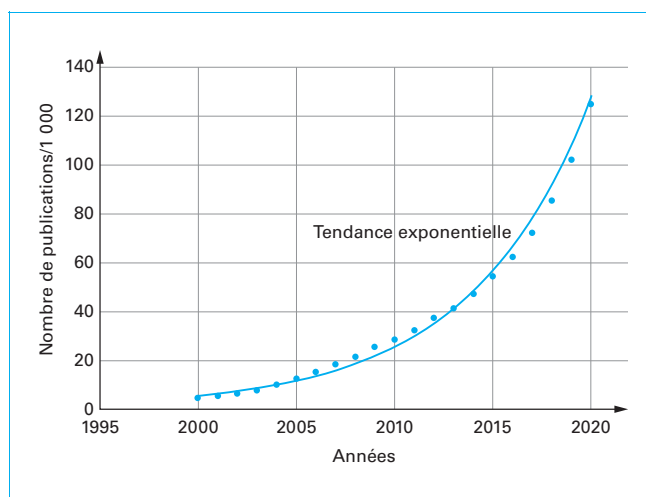


Figure 4 – Évolution du nombre de publications (site du CNRS) en fabrication additive

même rythme, on aurait dû trouver des horizontales normées à l'unité ; au contraire, si la progression des sous-thèmes avait été moins rapide que celle du thème général, les courbes auraient dû se situer au-dessus de l'unité.



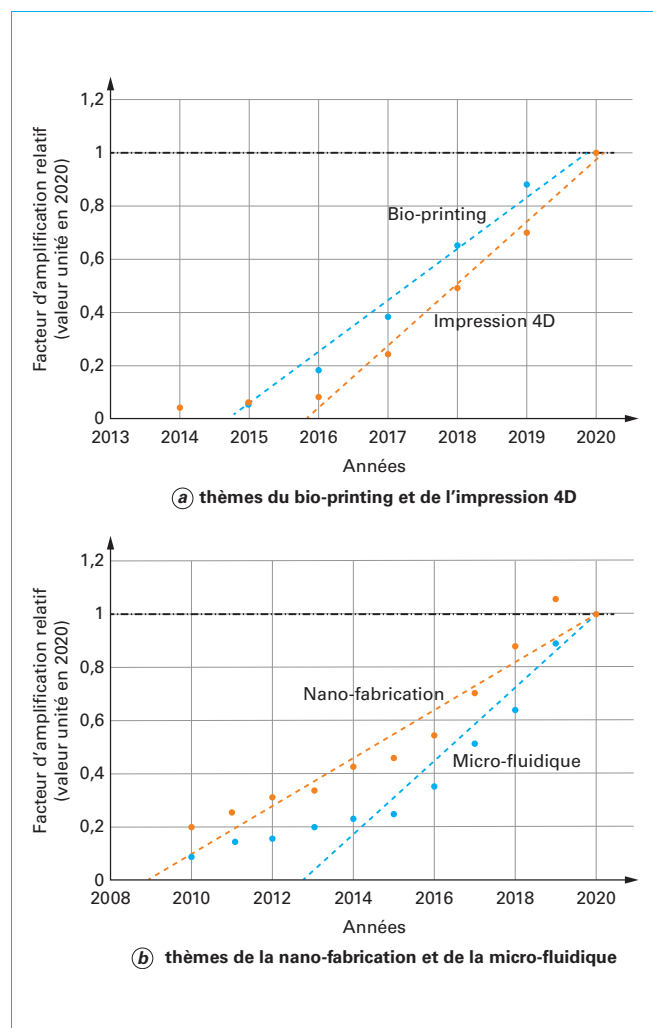


Figure 5 – Intérêt amplifié en recherche relativement au domaine général de la fabrication additive (voir également [11])

Pour ces quatre thèmes, il y aurait en 2020 (site CNRS) 517 publications pour le bio-printing, 274 pour le 4D printing, 435 pour la micro-fluidique et 533 pour la nano-fabrication, alors que l'on compte plus de 125 000 articles sur le thème général. Il s'agit donc bien de niches.

Attention, ces chiffres sont indicatifs ; ils sont différents quand on interroge la bibliothèque de l'université de Lorraine (au 31 mai 2020) ; respectivement 1293 ; 1148 ; 635 ; 597 sur un total de 172 000. Les ordres de grandeurs sont respectés, mais avec des disparités.

## 1.2 Courbe de Hype

Ramirez-Ferrero [12] présente un positionnement des technologies de fabrication additive sur un diagramme de Hype (figure 6). Partant des besoins exprimés, les processus de conception définissent, pas à pas, l'artefact qui doit répondre aux objectifs retenus (besoins et contraintes) par des choix successifs avec des approches de plus en plus détaillées (et donc de plus en plus irréversibles dans la durée limitée de l'action). Le suivi des projets scientifiques peut être analysé à partir d'une courbe de Hype [13] [14] [15] [16], présentée en figure 4 et analysée dans le tableau 2, sur

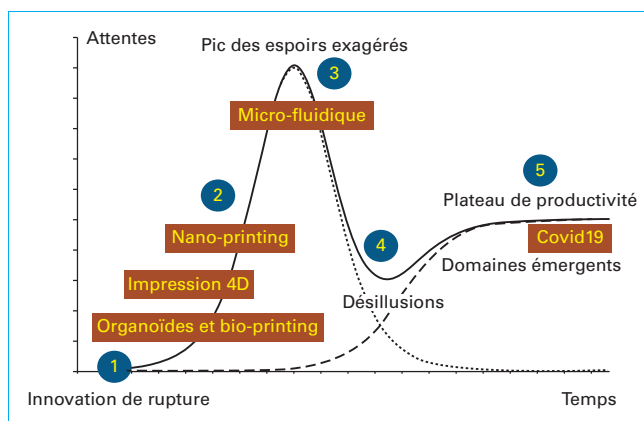


Figure 6 – Courbe de type Hype générée par l'impact de la phase de recherche fondamentale (taux de publication d'articles scientifiques/techniques) et de la phase technologique (taux de dépôts de brevets, publications) [17]

Tableau 2 – Les différentes étapes des courbes de Hype

Phase	Appellation	Commentaires et description
1	Lancement de la technologie	La faisabilité de laboratoire a été démontrée. Il s'agit non de produits facilement utilisables, mais plus de prototypes d'une technologie considérée comme prometteuse (preuve de concept).
2	Pic des espérances exagérées	Un emballement aboutit à des attentes exagérées et non réalistes. Des startups se créent pour développer et commercialiser des produits basés sur la nouvelle technologie.
3	Gouffre des désillusions	Les produits ne répondent pas aux espoirs formulés. Les médias qui vivent du sensationnel rejettent ou se désintéressent du sujet ; c'est « l'anti-Hype ».
4	Pente des « illuminations »	Des produits dits « de deuxième génération » se développent et les véritables avantages et pratiques émergent avec un développement progressif du marché
5	Plateau de production ou de productivité	La technologie est acceptée et permet le développement de produits de troisième génération

laquelle figurent les thèmes traités correspondant à la visibilité d'une technologie en fonction du temps, caractérisée par :

- l'introduction et le premier attrait par des décideurs d'une base technologique. Dans cette phase, le champ des possibles est immense, et le chercheur doit pouvoir utiliser toute son imagination (association créativité/imagination/preuve de concept). La programmation initiale doit être modeste ;
- le pic des attentes exagérées : l'émergence de la technologie, pour différentes raisons, est difficile. Seuls quelques axes restent prometteurs. La nécessité d'orienter les travaux en vue d'une efficacité opératoire renforcée et de remettre en cause les autres aspects (responsabilité sociale ou socio-économique, optimisation et sciences de l'ingénieur et des systèmes) induit un ralentissement ;
- les applications industrielles apparaissent sur quelques niches. Dans ce cas, en dehors d'améliorations d'origine scientifique incrémentales, les activités sortent du périmètre des actions innovantes disruptives (figure 6 issue de [17]) ;
- la société s'approprie les applications de la techno-science en les modifiant.

La figure 6 permet de positionner les évolutions actuelles du marché de la 3D vers de nouvelles niches encore lointaines. Elles concernent des applications en biologie avec de grands espoirs attachés au bio-printing [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] ou, au contraire, un marché déjà mature avec des applications industrielles déjà rentables économiquement (mécanique, aéronautique, construction, etc.). Certaines applications sont en fait déjà (presque) industrialisées dans des domaines très variés : pharmacie, chirurgie, dentisterie, nourriture, design, construction, etc. Il s'agit d'opérations prévisibles et qui se développent. Les journaux électroniques font chaque jour un panégyrique exalté de ce champ des possibles.

La fabrication additive naît avec un principe de transformation localisée de la matière. L'élément minimal permettant la description de cette transformation (liquide/solide ; poudre/solide ; etc.) est, par analogie au pixel, appelé « voxel ». Quand une surface a été transformée, une nouvelle couche, jointive avec la précédente, est à nouveau transformée, etc. Ce principe largement industrialisé n'est pas remis en cause dans cet article, mais c'est son ouverture à des domaines ouverts et récents, en particulier en s'appuyant sur de la matière « informée », qui est abordée. Il s'agit, à l'exception du cadre de la pandémie liée à la Covid-19, d'une recherche amont qui n'est pas encore industrialisée de manière notable à ce jour.

#### À retenir

- 5 thèmes émergents : nano-micro-fabrication ; micro-fluide ; impression 4D et matière informée ; organoïdes et bio-printing ; innovations sociales permises par la pandémie du coronavirus.
- Les technologies 3D pour le développement de ces thèmes s'appuient sur la plupart des concepts de base des fabrications additives (5/7).

## 2. Matière informée et nano-fabrication

La vision de Lin et al. [28] sur l'évolution de la fabrication additive est représentée par la figure 7 ; elle passe de la réalisation de pièces mono-fonctionnelles de grande taille (plusieurs mètres) aux nanotechnologies...

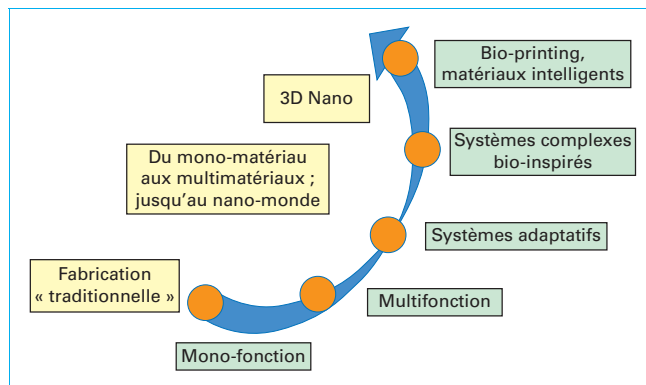


Figure 7 – Une vision long terme de la fabrication additive



Figure 8 – Productions osmotiques de Leduc (copie de Leduc, 1910 [32] ; voir également [29] et [33])

### 2.1 Partir de la matière

Cité par Thuillier [29], Leduc a écrit, il y a plus d'un siècle : « L'acte élémentaire de la vie, c'est la diffusion et l'osmose ». C'est ce professeur de physique médicale qui a fabriqué des formes et des structures « semblables à celles des êtres vivants ». Il a publié en 1910 un ouvrage intitulé : « Théorie physico-chimique de la vie et générations spontanées ». La figure 8 représente une des productions osmotiques de Leduc [29] ; cf. également [30]. « Quand on est arrivé à connaître le mécanisme physique de la production d'un objet ou d'un phénomène, [...] il devient possible [...] de reproduire l'objet ou le phénomène, la science est devenue synthétique. La biologie est une science comme les autres, [...] elle doit être successivement descriptive, analytique et synthétique » [31].

Cette théorie causaliste et les méthodes qui en découlent pour être appliquées à ces constructions visent à obtenir des produits finis et optimisés après leur « mise en route », notamment au regard de la consommation de matière et d'énergie, de la notion de voxel qui peut alors atteindre la taille d'une molécule, voire d'un cation ou d'un atome... Dans l'idée, comme pour la plupart des sciences de l'ingénieur, ces méthodes sont encore souvent pensées comme déterministes : les phénomènes sont contrôlés par des lois, qu'il faut découvrir et appliquer le plus fidèlement possible... Il n'y aurait donc pas (trop) de place pour l'aléatoire.

Sur cette base, il est possible de penser que l'on saura maîtriser la matière, dans ses éléments les plus intimes, pour qu'elle se transforme en permettant d'atteindre une forme et une fonctionnalité



données. C'est bien ce qu'on retrouve dans le film de science-fiction *Terminator*. L'idée générique repose sur le concept d'auto-organisation, où un système composé de composants élémentaires s'assemble et s'organise de façon spontanée et autonome, à la suite d'interactions spécifiques et locales entre ces composants. On parle ainsi d'auto-assemblage moléculaire quand les composants sont des molécules ou des éléments supra-moléculaires. La transformation de la matière pour qu'elle atteigne une forme donnée est possible si le nombre d'opérations à lui faire subir est le plus limité possible, d'où la réalisation exemplaire d'objets nanométriques. En effet, des phénomènes d'auto-organisation stimulés peuvent devenir sensibles, loin de l'équilibre, à des facteurs considérés comme négligeables près de l'équilibre. C'est l'activité intrinsèque du système de plus en plus complexe, de plus en plus à comportement non linéaire, qui détermine comment il est possible de décrire son rapport à l'environnement, qui engendre donc le type d'intelligibilité qui sera pertinente pour comprendre ses histoires possibles...

D'un point de vue historique, l'origami d'ADN réalise des formes arbitraires à partir de morceaux d'ADN. Cette technique fut développée en 2006 par Paul Rothemund, de Caltech aux USA. Les propriétés chimiques des molécules qui composent l'ADN, les bases nucléiques, sont bien connues ; on sait que telle pièce se lie à telle autre par des liaisons Watson-Crick, et partant de ce principe, on peut arriver à modéliser des structures bi- ou tridimensionnelles. La technique de Rothemund utilise une longue chaîne d'ADN de virus, présentant une structure linéaire et relativement peu complexe, dont on connaît exactement la séquence. Ensuite, par ordinateur, on localise les endroits précis où la molécule d'ADN doit être pliée pour arriver à la forme désirée. On synthétise alors de petites pièces qui iront d'elles-mêmes se lier exactement là où on le désire, pour « brocher » le génome viral.

Seules ces « agrafes » ont besoin d'être synthétisées, le matériel de base étant emprunté à la nature, et les opérations sont donc à la fois moins coûteuses et moins longues. Ces petites agrafes vont alors, par le jeu des liaisons chimiques, s'accrocher à la chaîne échafaudage. De plus, comme ces agrafes vont également attirer d'autres molécules, elles vont plier le brin d'ADN central et lui donner une forme particulière. C'est de ce pliage que provient le nom original d'origami d'ADN. Dans la publication de Rothemund [34] étaient présentées des images de constructions aux formes diverses qu'il a réalisées : les plus originales sont sans doute la carte du monde, le flocon de neige et le smiley. Bien sûr, il n'y a pas que des dessins que l'on peut reproduire avec l'ADN ; l'équipe de Hao Yan est arrivée à créer des formes tridimensionnelles fermées [35] [36] et figure 9).

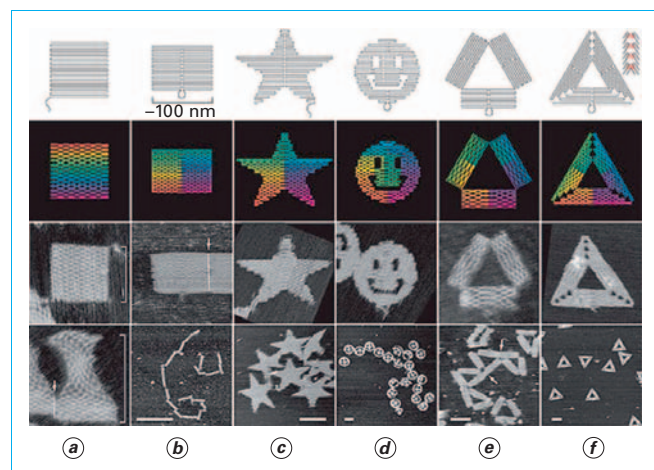


Figure 9 – Origamis d'ADN (taille inférieure à 20 nm)

Depuis, ont été développés des nano-moteurs de quelques nanomètres, dont le sens de rotation est contrôlé. « Le rotor est réalisé par cinq ferrocènes reliés à un phényle central, tandis qu'un ruthénium au centre fait office d'axe de rotation. Enfin, l'ensemble est soulevé par trois pieds et des tiols pour agripper la molécule sur la surface » [37]. Ces machines moléculaires spectaculaires sont animées de mouvements sous l'action d'un stimulus externe (nano-moteurs, nano-élevateurs, nano-pinces, nano-transporteurs). Leur utilisation, en raison de leur extrême petite taille, pose la question de l'apport d'énergie (stimulus) et de la récupération mécanique de cette dernière. Toutefois, il y a des applications en délivrance optimisée de médicaments [38] [39]. D'autres applications de ces entités nanométriques, présentées dans la figure 10, sont envisagées [40].

Une fois que la science commence à comprendre la façon dont la nature a sélectionné certaines formes et pas d'autres, aussi bien dans le monde physique que dans le monde biologique, elle peut chercher à appliquer/transposer les mécanismes correspondants en vue de résoudre des problèmes d'ingénierie – c'est-à-dire intéressant la fabrication d'artefacts, outils ou objets finaux. La grande variété des applications données à une forme générique comme la fabrication d'un objet fonctionnel n'est pas inspirée de ce que fait la nature et il est intéressant d'examiner si l'on peut utiliser les connaissances sur la « morphogénèse » pour atteindre par auto-organisation (plutôt stimulée) la forme souhaitée [41]. La figure 11 extraite de Sauvage [42] présente quelques exemples de tels systèmes.

Il s'agit d'un problème qui est toujours difficile dans le cas de systèmes linéaires généralement mal conditionnés [43] en particulier avec des signaux bruités. Ceci étant, l'enjeu est de taille, car la maîtrise du problème inverse peut constituer un moyen intégral de réalisation d'un objet à partir d'une matrice facilement réalisable et dont la déformation en fonction du temps ou de l'énergie fournie pourrait permettre la réalisation d'un objet de forme complexe.

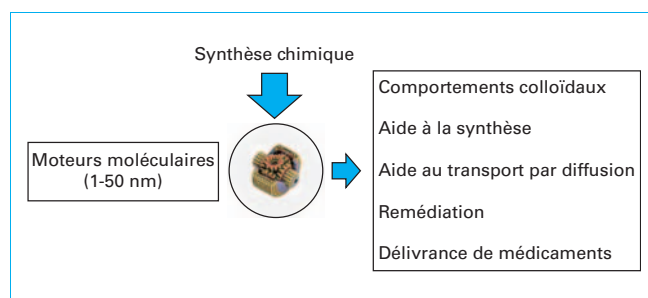


Figure 10 – Domaines applicatifs des nano-machines

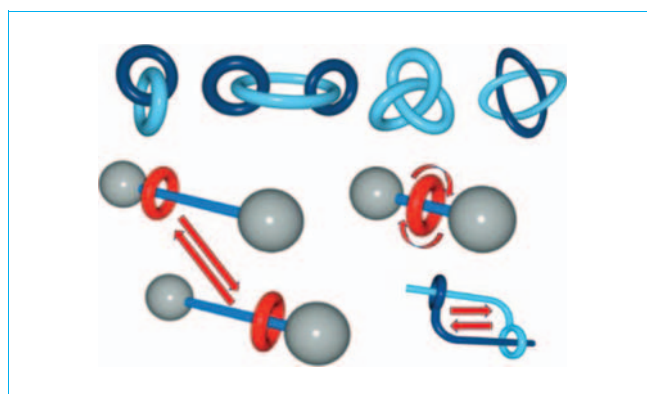


Figure 11 – Exemples de machines moléculaires et leurs déplacements (taille inférieure à 20 nm)

Ainsi, selon Sussan [44], il est désormais possible de créer ses origamis d'ADN par ordinateur. Mais c'est déjà moins satisfaisant quand on s'intéresse à des éléments de plus grande taille puisque le nombre de liaisons chimiques à prendre en considération augmente avec la puissance trois de la taille (cf. par exemple [45] [46] [47]). Il ne semble donc pas encore envisageable de mettre au point des systèmes dans lesquels on confierait à l'objet une forme d'intentionnalité, donc, à la limite, en lui laissant le choix de chercher lui-même ce dont il a besoin pour se fabriquer, et ainsi passer à l'auto-organisation avec sélection des éléments nécessaires qu'il extraierait d'une « banque » pour l'édification de l'objet final...

## 2.2 Partir du procédé 3D

Le contexte ne signifie pas que la complexité spontanée discutée ci-dessus est abandonnée, mais que l'ingénieur et/ou le concepteur tente(nt) de reprendre la main sur des phénomènes autonomisés difficiles à maîtriser en acceptant de manipuler la matière non vivante et l'énergie pour que les formes initiales s'adaptent à leur volonté.

Il y a plus de 25 ans, l'avènement des microscopies en champ proche a bouleversé le paysage de la recherche en matière condensée. Basées sur la détection d'un signal issu d'une interaction à courte portée entre une sonde fine (une pointe) et l'objet d'études (surface, nano-objets, etc.), ces microscopies ont permis non seulement une observation du nano-monde mais également une nanostructuration des surfaces. « Ainsi, outre le rôle majeur qu'elles jouent en physique et physico-chimie de surfaces, ces microscopies sont devenues incontournables dans de nombreux domaines de recherche actuels tels que l'électronique moléculaire, la spintronique, la supraconductivité, l'optique de nanostructures, la nanoplasmonique, la physique mésoscopique, etc. » [48] [49]. Mais, pour l'essentiel, il s'agit de déplacer des atomes en surface, rarement en volume...

Dans les faits, force est de revenir aux technologies 3D déjà maîtrisées (et non aux technologies de la nano-électronique) et, comme le rappellent Ge et al. [50], il est difficile d'aller en-deçà de 100 nm avec des techniques 3D poussées à leur limite comme la stéréolithographie utilisant des absorptions biphotoniques (figure 12). On peut atteindre de telles résolutions par absorption biphotonique à l'aide de sources pulsées ultracourtes (par exemple [51] [52]). On dispose d'un double gain en résolution : celui lié au produit des deux gaussiennes d'excitation d'une part, de l'inhibition de la polymérisation par l'oxygène qui impose un seuil minimal de photons absorbés d'autre part. Si l'on dispose de surcroît de monomères multifonctionnels, le polymère qui se construit est normalement insoluble dans le monomère qui lui a donné naissance [53] ; avec des longueurs de chaîne de l'ordre de 100, la perte en résolution est de l'ordre de quelques nanomètres comme le montre la figure 13 [2]. Mais alors, la taille de l'objet doit être en général de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{m}$  au maximum, domaine sans réel gros marché applicatif [54] [55]. Il faut, en effet, tenir compte du nombre de voxels relativement à leur taille pour réaliser un objet de taille donnée.

En utilisant une localisation renforcée de l'énergie lumineuse grâce à un procédé photonique à « deux photons », il est possible de gagner en résolution spatiale et par suite de réaliser des objets au voisinage immédiat de la sortie de l'objectif d'un microscope adapté pour créer des objets de très petite taille comme l'illustre la figure 14. Dans le même temps, avec ces dispositifs, on peut également faire de la fabrication soustractive [56].

## 2.3 Nano-fabrication de matériaux (nano-formulation de matériaux)

Dans les faits, en dehors de ces techniques liées à l'utilisation des champs proches, la plupart des travaux publiés sur le thème concernent des nano-matériaux (cf. par exemple [58] [59]). Une

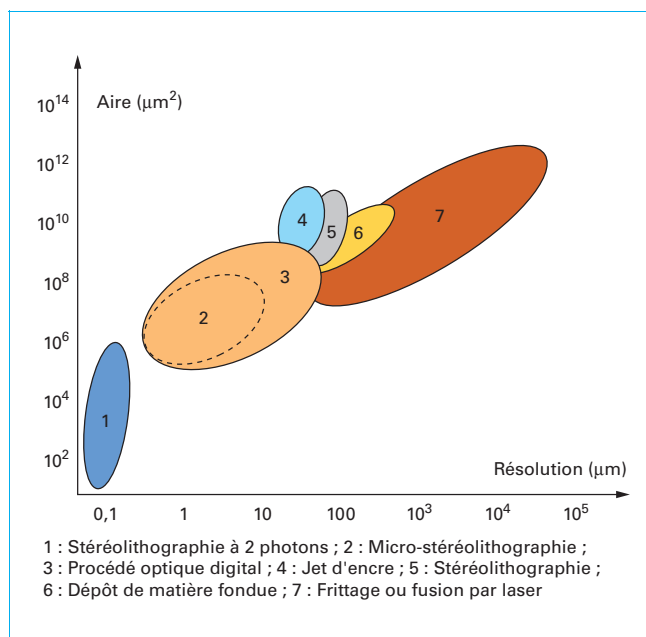


Figure 12 – Résolutions minimales atteintes en fonction de la technologie 3D

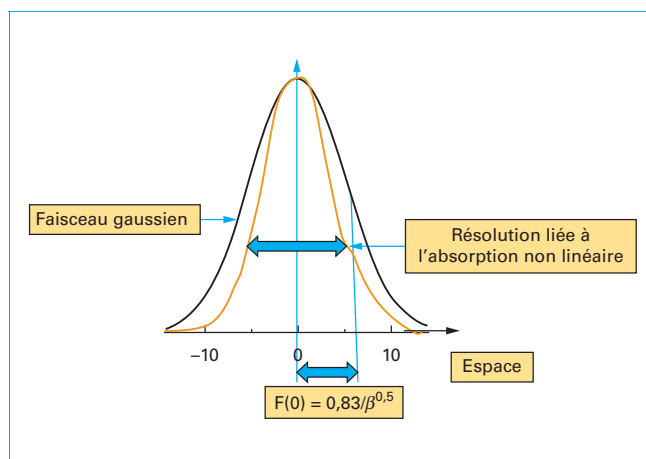
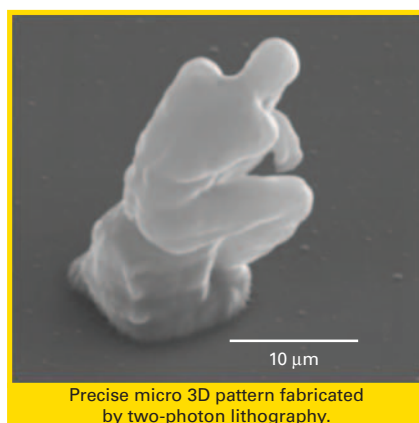
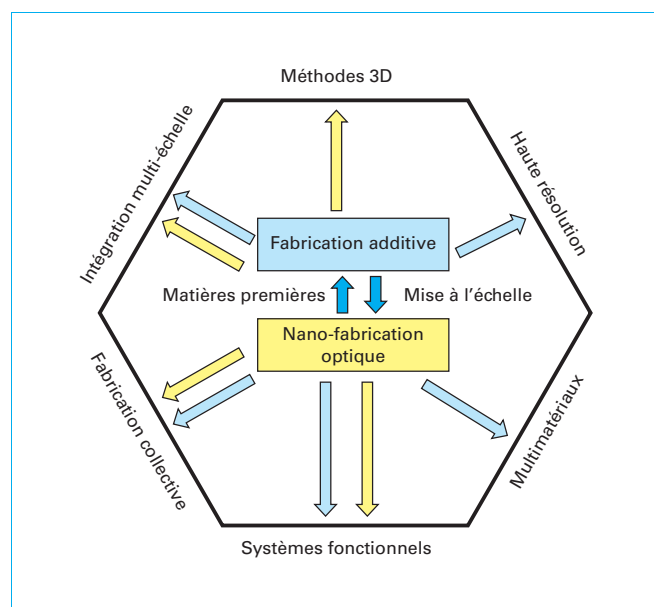


Figure 13 – Gain en résolution spatiale induit par l'absorption simultanée de deux photons

des raisons tient à l'optimisation entre la taille du voxel (la résolution) et le temps de réalisation d'un objet de taille donnée. En effet, le développement rapide de la science et de l'ingénierie des matériaux exige une fabrication des matériaux plus rationnelle et plus facile à concevoir. Plus récemment, l'impression numérique de nanoparticules colloïdales synthétisées chimiquement a ouvert la voie à la fabrication d'une catégorie de nanomatériaux dont les propriétés sont précisément adaptées par les nanoparticules et leurs interactions jusqu'à l'échelle atomique. Malgré les progrès réalisés, de multiples défis ont empêché l'élargissement des applications et des impacts des technologies de fabrication numérique [60]. Les orientations futures pour ce développement sont résumées dans la figure 15 avec comme défis l'élargissement de la gamme de matériaux imprimables, l'amélioration de la résolution de la fabrication, l'état de surface (résolution sur une seule dimension) et du débit d'impression pour la production de masse.



**Figure 14 – Micro-nano-stéréolithographie multiphotonique** (à gauche selon Park, Yang et Lee [51] ; à droite selon Nanoscribe [57])



**Figure 15 – Directions envisagées en nano-fabrication s'appuyant sur le numérique**

L'intégration de pièces fabriquées à différentes échelles dimensionnelles et avec différents matériaux est d'une importance capitale si l'on souhaite disposer de produits hautement utiles. Ces thèmes commencent à être abordés.

Mais, dans le même temps, des objets complexes tels que les nanostructures peuvent être construits et manipulés en comprenant les interactions spécifiques qu'ils ont avec un champ lumineux. Ces manipulations pourraient servir de base à des applications en biophysique ou en traitement de l'information quantique, et les nanostructures individuelles elles-mêmes peuvent servir de « blocs de construction » pour créer des métamatériaux [61]. La lumière est mise en forme (distribution temporelle et spatiale de l'intensité de la lumière ; vecteur de polarisation ou de la direction d'oscillation du champ électrique) pour être concentrée à des

dimensions inférieures à la longueur d'onde de la lumière lorsqu'elle est focalisée sur un objet cible permettant le déplacement.

## 2.4 Nano-fabrication et électronique

Avec des tentatives de suivi de la loi de Moore, en utilisant des méthodes de fabrication soustraitives largement optimisées (et coûteuses) en électronique, le nombre de publications sur ce thème est modeste (en dehors des nano-fils, nano-antennes, nano-actionneurs, etc. qui sortent du domaine traité) pour plusieurs raisons :

- fabrication collective vs éléments individuels en fabrication additive ;
- résolution nanométrique vs sub-micrométrique ;
- difficulté de travailler en électronique avec des machines de fabrication additive n'utilisant qu'une seule matière ;
- élimination difficile des calories de possibles microprocesseurs 3D relativement aux systèmes 2D1/2 ;
- flexibilité des procédés 3D encore insuffisante ;
- pureté des matériaux à l'avantage évident de la micro-électronique...

Pour des éléments de petite taille comme ceux utilisés en électronique, il semble utile d'envisager des technologies additives et soustraitives associées à des multimatériaux comme le montre la figure 16 [62] (cf. également [63] [64]).

En revanche, si l'on accepte de sortir des technologies classiques 3D pour tenter de faire sauter quelques verrous pour se rapprocher des besoins de la microélectronique, le champ d'application peut s'élargir ; c'est ce que réalise l'équipe de Niklaus [65] qui utilise des sources spécifiques pour imprimer du silicium, un des matériaux des plus classiques en électronique. D'autres technologies comme la LIFT (*laser induced forward transfer*) peuvent être exploitées pour de la fabrication additive, même si leur utilisation est, pour l'essentiel, de type 2D1/2 [56] [66] [67] [68]. À noter que de nombreux métaux et structures nanoparticulaires peuvent être utilisés pour ce type de transferts (cf. par exemple [69] [70] [71]).

Pour les circuits imprimés, il est possible de travailler avec des machines utilisant plusieurs matières (soit en séquentiel, soit en simultané). Des encres conductrices existent, permettant la réalisation de structures tridimensionnelles relativement complexes [72].

**A retenir**

- Synthèse directe d'objets tridimensionnels par voie chimique – nano-machines ; limites en termes de faisabilité.
- Nano-micro-stéréolithographie multiphotonique.
- Nano-formulation de matériaux pour la fabrication additive.
- Couplages de fabrications soustractives et additives.

### 3. Micro-fabrication 3D et Micro-fluidique

Dans la continuité du paragraphe précédent, la plupart des technologies 3D optiques permettent de réaliser des résolutions de quelques dizaines de micromètres. La micro-fabrication est de plus en plus associée au domaine de la micro-fluidique avec la réalisation de canaux disposant de diamètres inférieurs au millimètre, nécessitant des techniques adaptées à de telles tailles [2] [73] [74] [75]. Au départ, et encore aujourd'hui, elle s'appuie largement sur les technologies de la microélectronique silicium. La palette s'est élargie à d'autres matériaux comme le verre, l'acier et les polymères. Les microsystèmes destinés à une utilisation industrielle (micro-mélangeurs...) sont la plupart du temps en acier inoxydable. Mais la fabrication additive se développe depuis quelques années

parce que la complexité est gratuite et qu'il est possible de réaliser des formes complexes avec des états de surfaces compatibles avec le besoin exprimé par les spécialistes.

La micro-fluidique (environ 150 000 publications sur BU de Lorraine) est, à la fois, la science et la technologie de systèmes manipulant des fluides en écoulement laminaire [73]. Depuis une quinzaine d'années, l'Homme a imité la nature en produisant des objets traversés par des écoulements micrométriques. Un des avantages du changement d'échelle est que l'on peut jouer sur les lois d'échelles et rendre possibles des réactions chimiques ou biologiques qui, dans d'autres domaines spatiaux, n'apparaîtraient pas, avec dans la plupart des cas des écoulements laminaires à très faible nombre de Reynolds [76] [77]. En général, manipuler à l'échelle du micromètre permet de travailler plus vite, dans un environnement plus propre et plus sûr, mais peut-être à un coût plus élevé. Véritables « microprocesseurs » pour la biologie et la transformation de la matière et de l'énergie, les systèmes micro-fluidiques permettent de remplacer des instruments ou des équipements encombrants et très coûteux ainsi que de réaliser des transformations inaccessibles aux systèmes classiques. Aujourd'hui, le volume d'activité des technologies micro-fluidiques est estimé à une dizaine de milliards d'euros [78]. Le nombre d'applications industrielles potentielles est considérable : médecine, énergie, chimie verte, cosmétique, industrie agro-alimentaire et biologie [79]... et ceci d'autant plus qu'on peut gagner en résolution en l'utilisant en fabrication par photopolymérisation à des longueurs d'ondes plus courtes ou avec des protons accélérés [80]. La figure 17 (issue de Gonzalez et Hervas [81]) recense les domaines correspondant à la micro-fluidique et quelques applications.

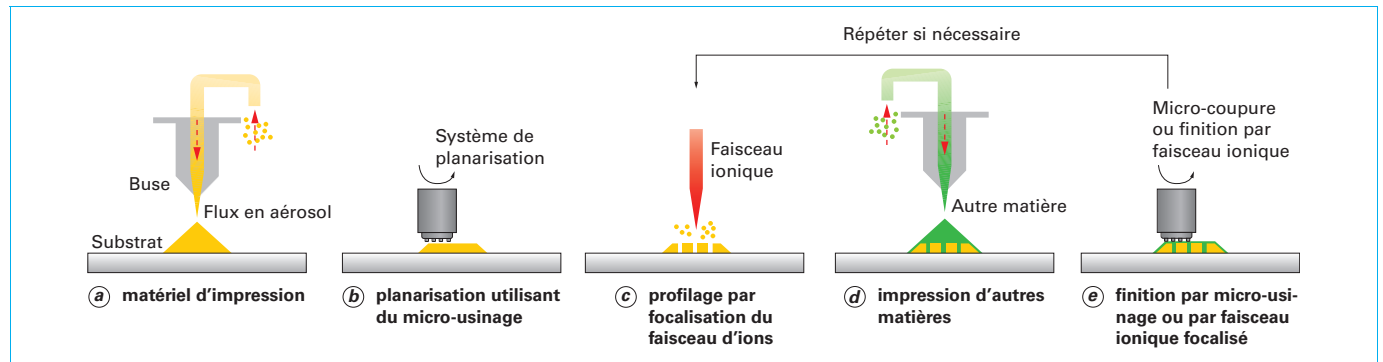


Figure 16 – Couplages technologies additives et soustractives et matériaux pour l'électronique

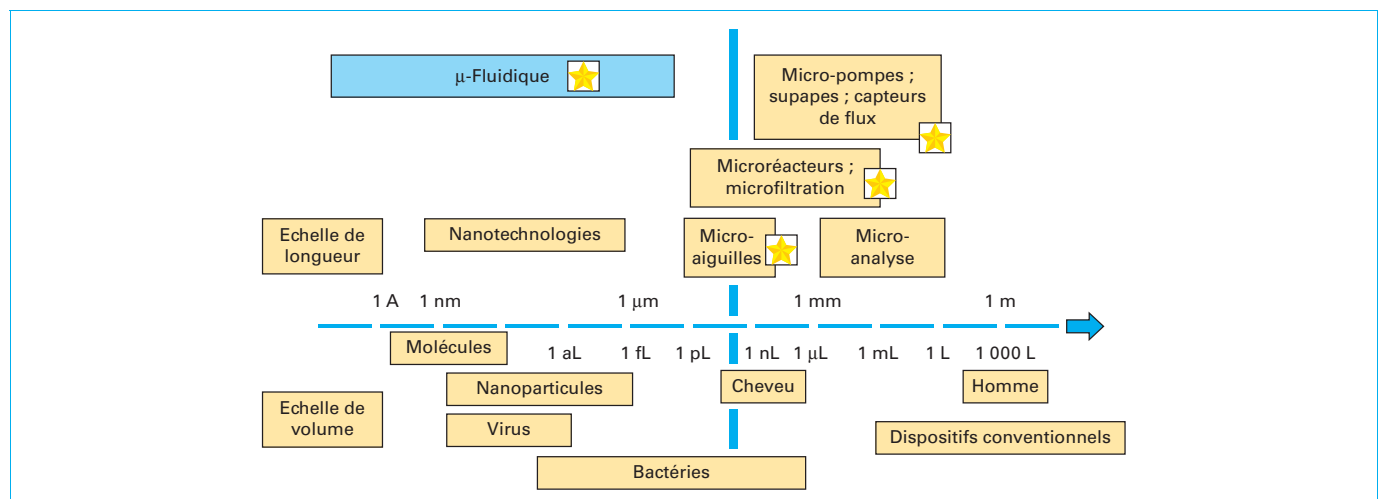


Figure 17 – Domaines spatiaux et applications  $\mu$ -Fluidique (caractérisés par une étoile)



Le volume des publications est de l'ordre de 100 000 (cf. par exemple [82] [83] [84] [85] [86] [87] (avec 875 références bibliographiques)). Les applications sont aujourd'hui nombreuses, en particulier dans le domaine de l'intensification des procédés (cf. par exemple [88]) et en biologie [89]. La figure 18, base d'un moule d'un diluteur réalisée par Corbel il y a dix ans environ au LRGP, illustre les potentialités de la fabrication additive.

Le tableau 3, issu en grande partie de Ho, Ng et Li [90], rassemble les technologies de fabrication additive utilisées, leurs attraits et leurs limites, avec des applications associées en biologie. On peut constater que, pour l'essentiel, ce sont les méthodes de stéréolithographie à 1 et à 2 photons qui s'attirent l'intérêt actuel des scientifiques, grâce aux potentialités de résolution (SL 2 photons en particulier) qu'elles autorisent. Si, au départ, ce sont des applications visant à produire des moules qui ont été ciblées, on réalise aujourd'hui des pièces directement pour autant que les géométries soient simples à réaliser (bio-capteurs, bio-bots, systèmes pour études de migration et de croissance cellulaires, interfaces micro-fluidiques, etc.). Dans le futur, il est envisagé de produire des pièces uniques avec des structures internes complexes incluant l'ensemble des éléments classiquement utilisés en micro-fluidique.

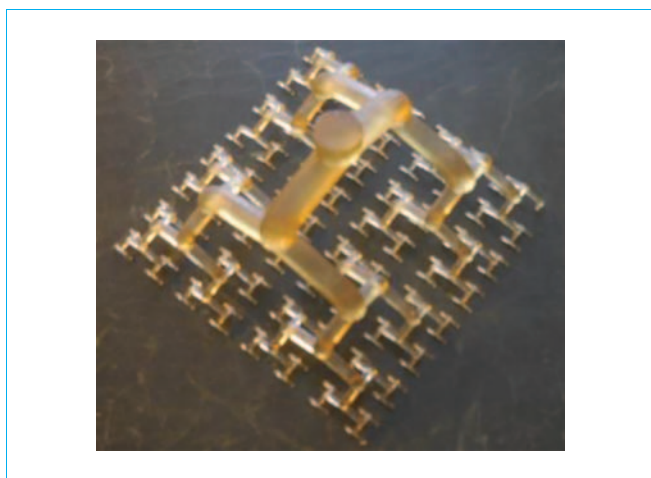


Figure 18 – Moule pour diluteur réalisé par stéréolithographie

Toutefois, ce développement suppose une bonne maîtrise de l'état de surface, dépendant de la technologie retenue pour l'application micro-fluidique [91] [92].

#### A retenir

- La micro-fluidique, domaine en plein développement grâce à la sélectivité associée, en jouant sur les lois d'échelles rend possibles des interactions chimiques ou biologiques spécifiques (écoulements laminaires).
- Les technologies 3D sont d'application récente, avec encore des verrous à faire sauter. La micro-fluidique reste pour l'essentiel assez tributaire des technologies de la micro-électronique.

## 4. Impression 4D

L'impression 4D s'attaque à l'assemblage et l'installation des produits qui devraient pouvoir s'assembler eux-mêmes (auto-assemblage) et leur mise en place dans des environnements extrêmes pourrait être facilitée par la « matière programmable » [93] [94] [95] [96] [97] [98] [99] [100] [101] [102] [103] [104]. Des matériaux programmables qui pourraient se construire d'eux-mêmes rendraient ainsi superflues les usines d'assemblage et les lourdes procédures d'installation. La robotisation, cœur des gains de productivité du XX<sup>e</sup> siècle, pourrait ainsi être intégrée aux produits eux-mêmes. De plus, par le biais de stimuli spécifiques, il est envisageable de faire évoluer leurs formes et/ou fonctionnalités... Selon Mélanie [105] et O'Neal [106], l'impression 4D disposerait d'un grand potentiel pour personnaliser des dispositifs et des structures. Ils citent le rapport Gartner qui estime que d'ici 2023, les startups de ce nouveau domaine devraient attirer 300 millions de dollars en capital de risque. Terminator ne serait donc pas loin, mais où en est-on ?

### 4.1 Organisation stimulée/programmée

Dans le § 3, on a vu qu'il est possible de réaliser par voie chimique des structures nanométriques dont la forme évolue en présence d'un stimulus. Mais pour atteindre des dimensions centimétriques, on imagine la difficulté de fabriquer chimiquement un ensemble moléculaire ou supra-moléculaire qui contiendrait environ  $10^{22}$  atomes ! Alors, il peut être fait appel à des éléments de taille raisonnable que l'on peut

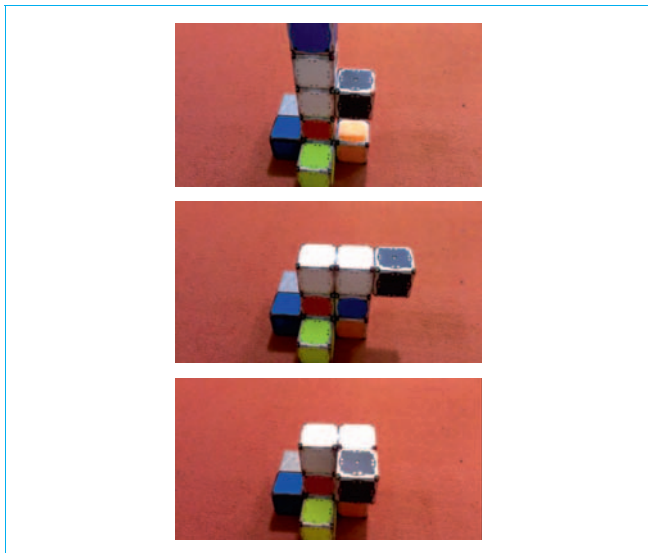
Tableau 3 – Applications des technologies 3D printing en micro-fluidique

Technologie 3D	Source d'énergie	Matériaux	Avantages	Inconvénients
Stéréolithographie (SL)	Laser (UV)	Résines	Bonne résolution	Post-traitement Supports à retirer
Masque programmable et SL	UV ou visible	Résines	Bonne résolution Gain en temps	Taille des pièces
SL à 2 photons	Laser pico ou femtoseconde	Résines	Très haute résolution	Temps long Taille modeste des pièces
FDM	Thermique	Polymères fusibles	Peu coûteux Élimination aisée des supports	Choix limité de matériaux Temps long
Jet d'encre	UV	Résines	Rapidité Multimatériaux	Élimination non aisée des supports
Bio-printing	Laser (UV)	Hydrogels, résines, cellules vivantes, etc.	Multimatériaux Impression du vivant	Temps long Fragilité de l'édifice construit

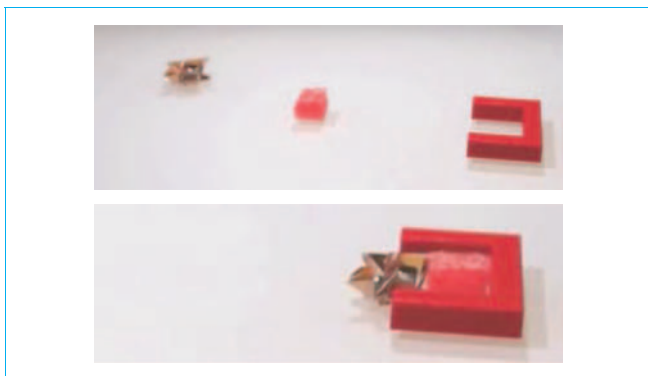
déplacer pour réaliser une forme donnée. Ces petits robots s'assemblent et se désassemblent en fonction de la programmation qui organise leurs déplacements. C'est ainsi que les cubes de l'équipe de Rus au MIT se déplacent pour créer de vraies structures tridimensionnelles, mais avec un nombre de voxels encore très limité comme le montre la figure 19 [107] ; voir également [108].

La technologie d'assemblage programmé de robots est encore en phase de recherche [109] [110] [111] [112] [113] [114] [115]. En effet, dès que le nombre de robots augmente, la programmation de leurs déplacements doit éviter les collisions tout en optimisant les temps de déplacement de chacune des entités mobiles [2].

Des chercheurs du MIT [116] ont réalisé un prototype de « robot miniature » capable de prouesses étonnantes. En effet, cette machine peut adopter différentes formes, se déplacer, transporter des charges... Des capacités qui laissent présager de nombreuses applications futures. À mi-chemin entre un origami et un transformeur, ce petit robot a la faculté de se replier sur lui-même afin d'adopter différentes formes [117]. Cet engin étonnant est également en mesure de marcher, de nager et de porter des charges plus lourdes que lui avant de s'autodétruire dans de l'acétone (figure 20). D'autres systèmes à origamis ont été publiés récemment [115] [118] [119].



**Figure 19 – Exemple d'impression 4D utilisant des cubes** (selon Sussan [44]) – Chaque cube fait un pouce de côté



**Figure 20 – Robot « origami » déplaçant un objet (du départ à l'atteinte de l'objectif) – La taille de l'origami est de l'ordre du centimètre**

Selon Hornyak [120], des robots sans contrôle par une unité centrale ont été réalisés au MIT. Les robots sont reliés par la force magnétique et se déplacent en se dilatant ou en se contractant. Ils utilisent la mesure locale du flux lumineux pour décider à quel moment démarrer un cycle d'expansion ou de contraction, ce qui force ainsi les unités à se déplacer en groupe. Cette extension à deux dimensions peut permettre une simulation « physique » du fonctionnement de cellules vivantes (cf. § 5).

## 4.2 Fabrication additive et matière informée/programmable

Pour les raisons évoquées ci-dessus – résolution ; nombre limité de voxels – la plupart des auteurs se sont tournés vers l'utilisation majoritairement d'une matière transformable pour fabriquer par un procédé 3D un polymère sensible à un stimulus (chaleur, solvant, humidité, pH, lumière, champ électromagnétique, etc.). Il s'agit donc de procédés classiques de fabrication additive avec des matériaux dits intelligents, informés ou programmables.

L'idée sous-jacente est de partir d'une géométrie donnée pour qu'elle devienne par apport énergétique une forme correspondant à une application. En jouant sur la répartition spatiale et en amplitude d'une forme de cette énergie [de ces énergies], il y aurait également possibilité de disposer d'un système adaptatif comme un actionneur, d'un robot souple, d'une structure évoluant dans le temps et peut-être dans ses fonctionnalités [2] [121] [122] [123] [124].

### 4.2.1 Quelques résultats typiques

Kimionis et al. [125] ont utilisé à la fois l'impression 3D et la réalisation d'origami pour la fabrication d'antennes radio-fréquences (RF). Un exemple de leur démonstration qui couple dans le même objet deux potentialités émergentes fait l'objet de la figure 21.

En dehors des origamis qui peuvent être sensibles à la température [126], des transformations plus massives peuvent être opérées avec des matériaux polymères sensibles à la lumière. Une autre approche concerne l'effet de la lumière sur la structure d'un polymère (expression désormais célèbre de « muscles photochimiques » [99] [127] [128] [129] [130] [131] [133] [134] [135] [136]). L'irradiation induit des rotations internes dans le matériau, ce qui contribue à changer la géométrie de la zone irradiée causant des déformations ; celles-ci peuvent être réversibles si l'on dispose de matériaux photochromes. Les courbures de fibres polymères peuvent être reliées à une répartition non homogène des photo-produits.

Autre exemple, la déformation importante de polymères contenant des groupes azobenzène [137] [138] [139] [140] qui, par irradiation, passent des configurations trans à cis. Les effets sont notables avec des retraits réversibles de plus de 20 %. Des résultats assez spectaculaires sont présentés dans d'autres publications [130] [141] [142] [143] [144] [145].

Au vu des structures moléculaires de l'azobenzène et de l'azotolane, il devrait être possible de tenir compte de l'orientation des moments de transition de cette molécule pour faire des transformations en lumière polarisée résolue dans l'espace... Des applications robotiques sont envisagées par Umedachi, Vikas et Trimmer [146].

En utilisant une anisotropie dans le matériau, Ge et al. [147] montrent sur la figure 22 comment il est possible de faire évoluer la forme d'un objet en fonction de la stimulation qu'il reçoit.

- Chen et al. [148] ont réalisé des impressions 4D de métaux à partir d'une machine spécialisée. C'est une des premières démonstrations d'utilisation de métal avec la publication de Lohmuller et al. [96] ; Kim et al. [149] avaient cependant déjà réalisé des impressions avec des nanoparticules piézo-électriques.



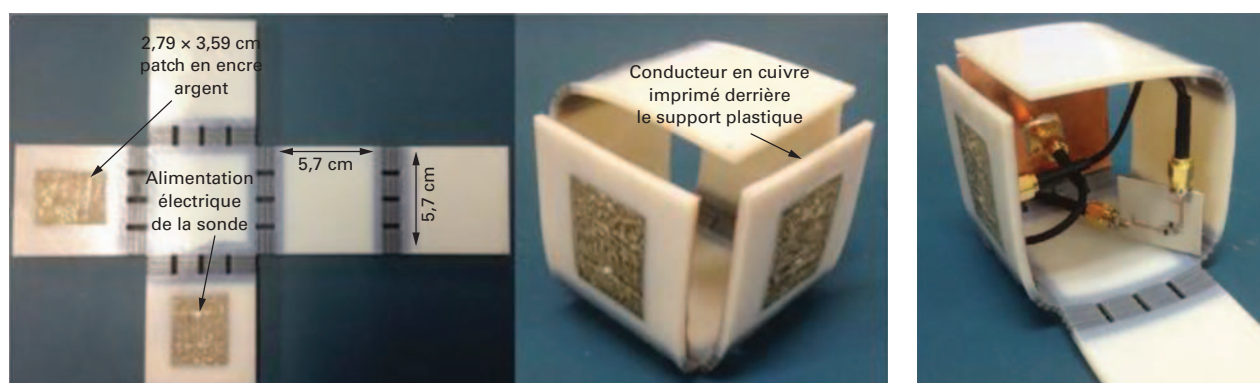


Figure 21 – Antenne RF réalisée par fabrication additive et multimatériaux avec réalisation d'un origami pour atteindre la structure 3D

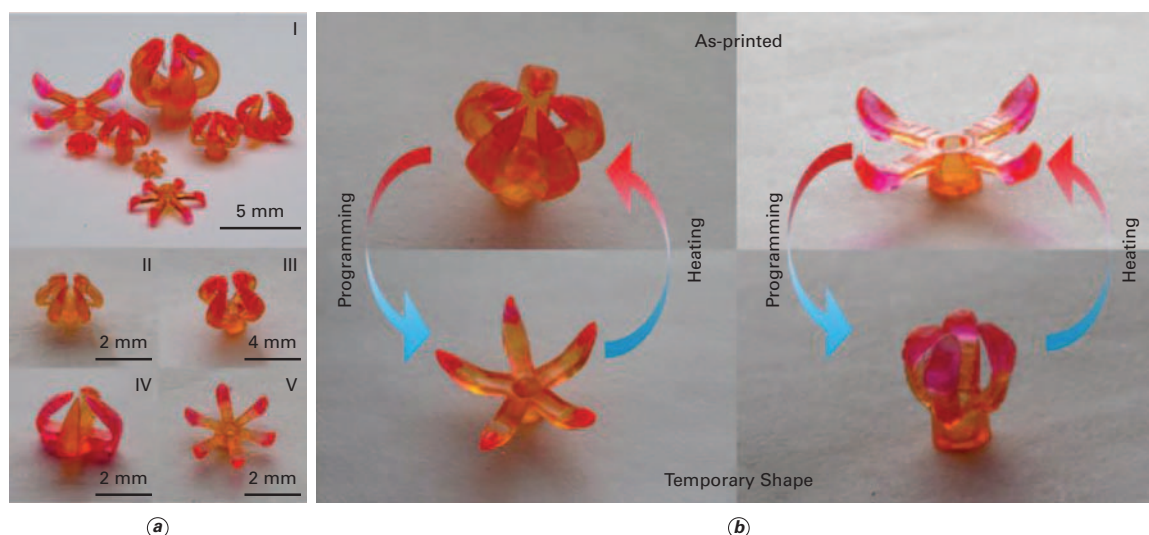


Figure 22 – L'anisotropie du matériau crée une courbure lors du changement de la température – Des morphologies complexes (ici une fleur) sont générées avec des évolutions dans les formes des objets

- Dufaud, Marchal et Corbel [150] ont étudié l'effet du courant électrique sur des composites contenant des céramiques PZT ayant des propriétés piézo-électriques visant la réalisation d'actionneurs. Plus récemment Martin, Fiore et Erb [151] ont associé à des résines photo-polymérisables des particules magnétiques qui peuvent être orientées spécifiquement en modifiant l'amplitude et l'orientation du champ. Cette réalisation où sont couplées deux formes d'énergie permet de réaliser des structures à propriétés magnétiques singulières, en même temps qu'un renforcement possible du matériau par augmentation de l'ordre des particules allongées dans la matrice polymère. Des cathéters pour applications néonatales auraient été réalisés sur ce principe.

#### 4.2.2 Quelques contraintes

Si le volume de la littérature augmente rapidement, le nombre de méthodes de déformation d'une macromolécule à cause d'une stimulation se limite à quelques principes classiques. De surcroît, l'objet étant réalisé, il faut que le stimulus atteigne les zones à

déformer, ce qui pour des actionneurs peut poser quelques problèmes d'encombrement... Ce peut être moins contraignant si le choix est tourné vers l'utilisation de la lumière comme stimulateur de déformation [152] [153] [154] car il est possible d'exciter sélectivement certaines zones de l'objet 3D avec une grande précision et à distance. Cependant, plusieurs problèmes non évoqués dans la plupart des publications sur le thème sont apparus et sont pour l'essentiel valables pour d'autres modes de stimulation [3].

#### ■ Tenue mécanique (E : module d'Young)

Pour réaliser un objet actif en un seul matériau, il convient que celui-ci ait à la fois une certaine tenue mécanique pour être un objet, et des propriétés élastomères pour pouvoir se déformer. Avec des modules d'Young de quelques dizaines de MPa, classiques en impression 3D, les forces nécessaires à une déformation vers le bas de 1 mm d'une barre horizontale de 1 cm, épaisse de 0, mm et de largeur 1 mm sont de l'ordre de  $2.10^{-4}$  Newton.

Les matériaux polymères classiques à propriétés élastiques ne sont donc pas adaptés à une déformation pour réaliser un

actionneur efficace ; d'ailleurs dans les publications, on montre juste des déformations, sans y associer un potentiel mécanique ou énergétique (cf. par exemple [94]).

#### ■ Rendement quantique

Si l'on veut provoquer grâce à la lumière la rotation d'une liaison double carbone-carbone ou azote-azote (cas de composés de la famille de l'azobenzène), il faut absorber un photon d'énergie convenable. Mais ce processus se produit avec un rendement quantique parfois très inférieur à l'unité. Indépendamment de la possibilité d'absorption sur de petits éléments (loi d'absorption de Beer-Lambert), il faut qu'un grand nombre de liaisons soient activées, ce qui avec un rendement quantique de 0,5 par exemple peut conduire à une élévation très importante de la température locale. Par ailleurs, cela pose la question du choix de la puissance de la source lumineuse. De surcroît, dans le système chimique généralement retenu (qui doit être réversible), le composé Cis produit absorbe également (mais moins) que le composé le plus stable qui est le Trans (figure 23). C'est le passage Trans-Cis qui induit la déformation qui est réversible par retour du Cis au Trans.

Pour mémoire : 1 Einstein définit  $6.023 \cdot 10^{23}$  photons à une longueur d'onde donnée (1 mole de photons). Par analogie avec une concentration, on peut parler d'Einstein/litre.

#### ■ Transfert de chaleur (Loi de Fourier)

Les matériaux retenus dans la littérature sont essentiellement des polymères faiblement conducteurs de chaleur. Si c'est la chaleur qui induit des transformations physiques de l'objet, il faut que la température change dans la masse du matériau (ce qui explique le choix d'une stimulation par la lumière). D'un point de vue applicatif, le temps caractéristique moyen de transfert de chaleur sur 1 cm est de l'ordre de 15 minutes avec les polymères utilisés.

#### ■ Transfert de matière (Loi de Fick)

Les transferts de matière sont généralement entre 10 et 100 fois moins rapides que pour la chaleur. Les effets éventuels seront donc très lents. C'est ce qui se passe par exemple quand une déformation est induite par le pH, nécessitant la diffusion d'ions  $H^+$  dans le matériau massif.

#### ■ Anisotropie de la fabrication

Si l'on réalise un objet par stéréolithographie (pour l'instant à 1 photon), la lumière arrivant sur la surface à polymériser est plus

absorbée à la surface qu'en profondeur. La partie présente vers la surface est donc plus polymérisée (voire rigidifiée) que les zones situées plus en profondeur. Avec des monomères synthétisés au laboratoire, nous n'avons jamais été capables de trouver les bonnes conditions d'élasticité et/ou de tenue mécanique prévues pour observer des déformations par irradiation ultérieure. De surcroît, l'absorption conjointe de la lumière par la composante azobenzène de la résine et par l'amorceur se traduit par une polymérisation de plus en plus complète, avec un durcissement massif de l'objet.

#### ■ Autres problèmes

Ne sont pas évoqués ici d'autres problèmes qui seraient à prendre en considération : celui de la maîtrise mathématique des déformations (considérée pour des matériaux massifs comme très difficile par Weeger [155], Ding et al. [156]), du design optimal, et de l'encombrement du système de production de stimuli.

### 4.3 Fabrication additive hybride et matière informée/programmable

Certains matériaux peuvent être sensibles à un stimulus et répondre aux contraintes industrielles (cf. par exemple <https://www.hisour.com/fr/electroactive-polymers-42852/>). Mais, pour le moment, il est difficile de les impliquer dans des fabrications additives homogènes. Force est d'utiliser des méthodes hybrides [104] [157] résumés ci-après. Un exemple est le bilame représenté figure 24 (cf. par exemple [149] [158]).

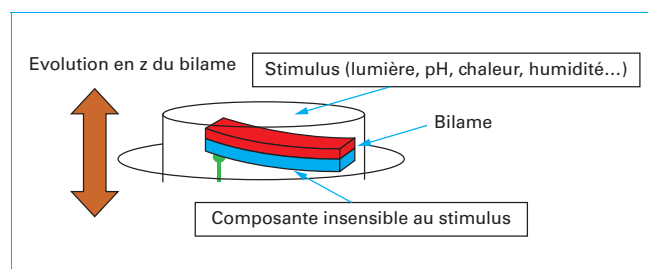


Figure 24 – Déplacement induit par des stimuli avec possibilité de réversibilité

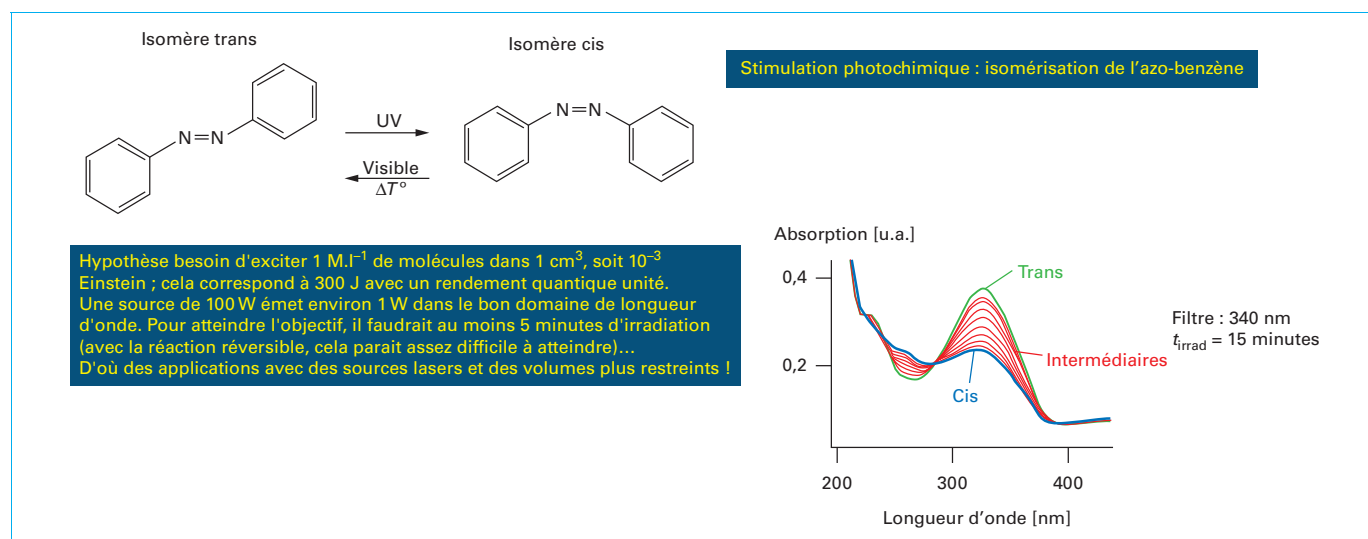


Figure 23 – Problèmes associés à une stimulation par de la lumière

Le 4D printing peut constituer une voie privilégiée d'approche du thème. Il peut s'agir comme le montre la figure 25 de solutions simples et traditionnelles d'actionneurs réalisés par fabrication additive [159]. Sur cette figure, le déplacement à gauche ou à droite dépend de la différence de pression gazeuse entre les deux compartiments de l'actionneur.

Dans le même esprit, les travaux de plusieurs équipes [160] [161] [162] [163] [164] [165] [166] conduisent à des pinces ou à des actionneurs utilisables en robotique. Le principe de fonctionnement est le même que celui utilisé par Peele et al. [159]. Des applications en microrobotique souple (robots nageurs) commencent à se développer [2] [167] [168] [169].

Il faudra donc attendre des procédés de fabrication multimatériaux applicables aisément avec des matériaux activables disposant des propriétés requises pour pouvoir observer une réelle révolution sur ce thème d'un grand intérêt pour la robotique.

#### À retenir

- Réalisation d'objets par auto-assemblage ou par assemblage programmé de voxels.
- Robots-nageurs comme dispositifs d'assemblage programmé.

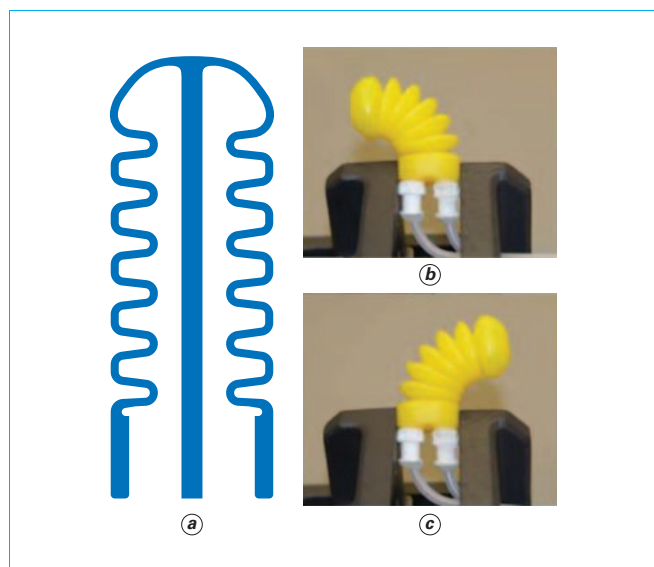


Figure 25 – Actionneur 3D pneumatique réalisé en fabrication additive (taille : environ 10 cm)

- Matière informée et impression 3D : modes de stimulation ; limites théoriques et expérimentales des procédés homogènes n'utilisant qu'un matériau actif ou activable.
- Intérêts de procédés hétérogènes ; exemples.

## 5. Organoïdes et bio-printing

### 5.1 Bio-printing

Le bio-printing appartient à l'ingénierie du vivant ou à la bio-ingénierie, qui intègre les sciences physiques, chimiques, mathématiques, ainsi que les principes d'ingénierie pour étudier la biologie, la médecine, les comportements et la santé (d'où un besoin criant d'interdisciplinarité selon Danzo et André [170] : il vise la fabrication d'organes vivants [2]. Il faut dire que les informations sensationnelles ont atteint les médias (cf. par exemple [171]) signalant les travaux de l'équipe de l'université Carnegie Mellon aux États-Unis dans la bio-impression 3D... mais ils ne sont pas les seuls [172] [173].

L'idée générique est représentée par la figure 26 : placer sur un support les bonnes cellules pour qu'un tissu vivant se développe [19] [103] [170] [174]. De proche en proche, le tissu se densifie, se différencie, etc. Il n'y aurait plus qu'à le transplanter pour remplacer un organe déficient ou malade, pour autant que la forme, les vaisseaux sanguins, les nerfs, les fonctionnalités soient les bons.

Aujourd'hui, il ne semble pas envisageable de maîtriser le système de bio-printing à partir de la seule connaissance de ses éléments cellulaires constitutifs ainsi que d'éventuels échafaudages sur lesquels les cellules seraient déposées, d'où des tendances compréhensibles pour une approche globale telle que les ingénieurs la pratiquent en tenant compte des phénomènes jugés comme prépondérants dans le modèle. Selon les thèses holistes, chaque cellule influence l'ensemble en construction qui, lui-même, de manière récursive, intervient à son tour sur l'entité élémentaire... « Il y a là une suite d'actions et de réactions, c'est-à-dire que nous avons un système d'équilibre entre différentes forces plutôt qu'un phénomène qui puisse se réduire à une cause et aux effets de cette cause » (Pareto, 1965). Mais alors, comment être sûr que l'on s'occupe des variables principales si les interdépendances complexes locales (cellules/environnement et réciproquement) existent ? Les objets du bio-printing tels qu'on les a présentés sont composites, systémiques, instables et sous contraintes (dont certaines nous sont encore inconnues...). Ainsi, quelles que soient les échelles considérées, le bio-printing est probablement inaccessible aux seules approches monodisciplinaires. Ces considérations sont donc une limite fondamentale au développement

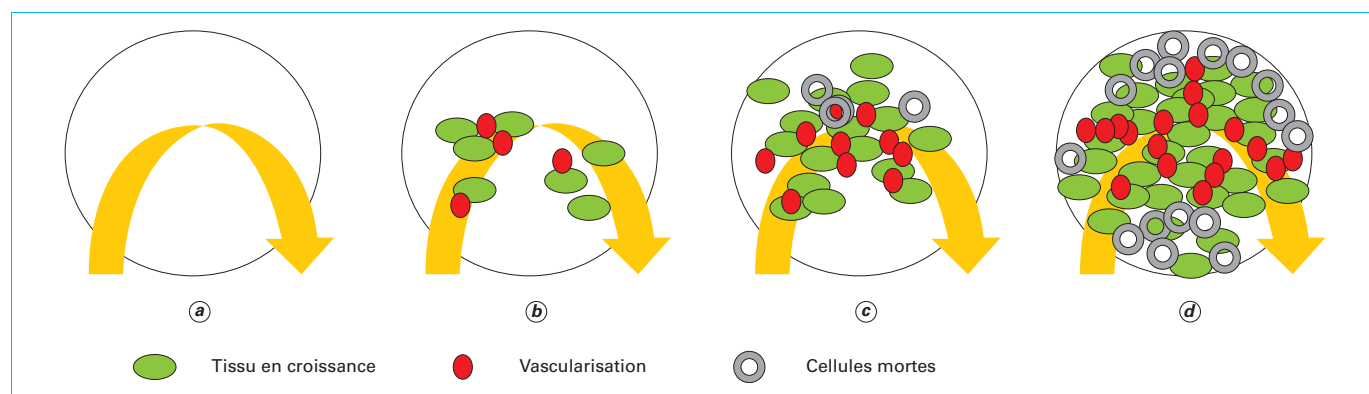
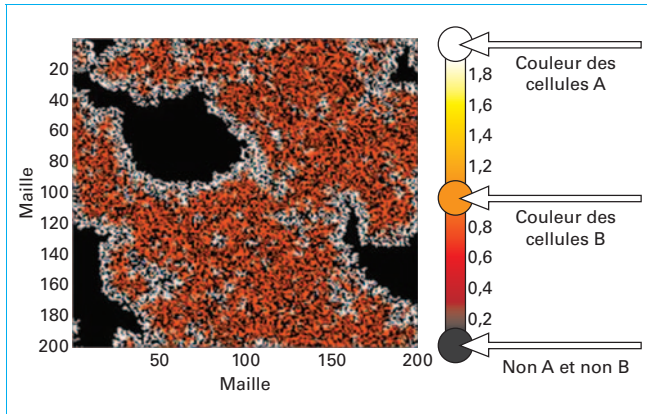


Figure 26 – Principe du bio-printing avec des changements dans le temps des matériaux vivants imprimés [174]



**Figure 27 – Modélisation 2D d'un bio-printing avec différenciation cellulaire et vascularisation**

médical du bio-printing visant le remplacement d'organes, même si des progrès sont faits tous les jours (cf. par exemple [175] [176] [177] [178] [179] [180] [181] [182] [183] [184] [185] [186] [187] [188] [189] [190]). Mais dans le fond, ces publications attestent des formes d'induction ou plus prosaïquement de « bricolage savant » dans un domaine en émergence et dont l'utilité potentielle est une évidence. Néanmoins, comme l'illustre la figure 27, des modélisations mathématiques [170] montrent qu'il est possible d'atteindre des différenciations cellulaires et des bases de vascularisation. Des espoirs sont donc permis...

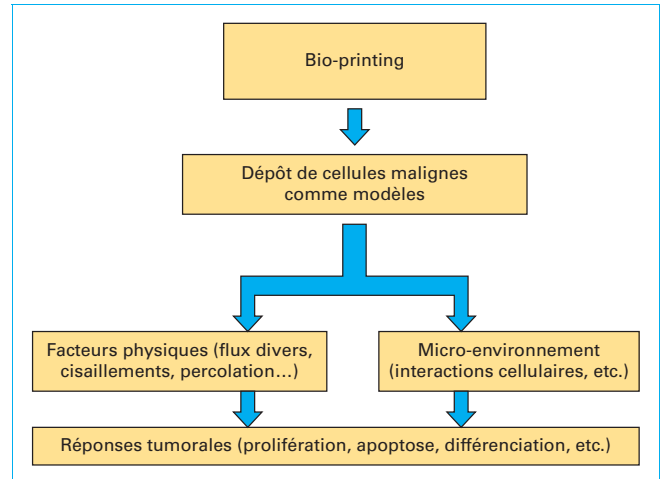
## 5.2 Organoïdes et bio-printing

Un organoïde est une structure multicellulaire tridimensionnelle qui reproduit in vitro la micro-anatomie d'un organe. C'est un système modèle dont on attend un comportement proche de l'organe que l'organoïde est censé représenter. Les cellules ne se comportent pas de la même manière dans les cultures 2D et in vivo, les cultures 3D d'organoïdes se sont naturellement développées en tant que systèmes modèles. Or, si les bio-impressions ont des durées de vie non compatibles avec celle des humains, la durée de vie de bio-construits peut être suffisante pour permettre de tester par exemple des médicaments pour envisager en médecine de précision des soins spécifiques dans le cas de maladies graves [191]. Il est possible de s'inspirer du développement embryonnaire pour imprimer des cellules souches qui pourront évoluer temporellement [192].

Le bio-printing associé à la fabrication d'organoïdes se développe ; il est orienté vers des études de toxicologie, de cosmétique et d'applications pour la recherche de médicaments (cf. par exemple [193] [194] [195]). De plus, compte tenu de la possibilité d'utiliser ses propres cellules biologiques, il sera de plus en plus envisageable de chercher des traitements personnalisés [195] [196] [197] [198] [199] [200] [201]. La figure 28 présente les méthodes 3D appliquées à l'étude de cancers avec une visée de médecine personnalisée [202].

### À retenir

- Le bio-printing vise la fabrication par fabrication additive de tissus et/ou d'organes vivants.
- De nombreuses preuves de concept ont fait l'objet de publications sans que des applications directement médicales soient stabilisées.
- Des aspects interdisciplinaires limitent le développement du domaine.
- Les organoïdes, structures 3D représentant la micro-anatomie d'un organe vivant, pourront être utilisés avec pertinence en médecine personnalisée dans des études médicamenteuses de maladies graves.



**Figure 28 – Recherches sur le cancer et bio-printing**

## 6. Covid-19 et impression 3D

**Avertissement de l'auteur :** Ayant été modestement impliqué dans la production de pièces 3D durant la crise, les lignes qui suivent constituent un témoignage plus qu'une analyse froide et étayée d'une réalité.

Il y a encore quelques mois, une perception linéaire du temps ouvrait la possibilité de penser un futur différent du présent engoncé aujourd'hui dans la crise. Le confinement a, de manière simultanée, bloqué les échanges économiques et permis, dans l'impréparation générale, de nouvelles solidarités [203]. La situation sanitaire n'est cependant pas stabilisée et des retours épidémiques sont à envisager, entraînant une activité économique fortement chaotique parce qu'on n'est pas capable de fonctionner en mode « dégradé ». Et pourtant, il faut retourner dans des conditions précaires au travail (pour ceux qui en ont encore un...).

Face aux situations inacceptables subies par le corps médical pendant plusieurs mois, nous ne pensions pas, en mars 2020, dans notre activité de recherche scientifique, loin du besoin immédiat de la société, loin des appels au secours, à un besoin de solidarité particulier. Nous ne pensions pas non plus que la présence de personnels du Centre national de la recherche scientifique (CNRS) ayant quelque expertise en fabrication additive (pour fabriquer des masques) puisse être « démocratisée », auto-organisée (parce que spontanée) en faisant participer les volontaires à un rapprochement avec le terrain, le corps social exprimant sa souffrance. Dans cette période, pour sauver une situation alarmante, inventivité, créativité, agilité, (bonne) volonté ont été au rendez-vous. Après plusieurs semaines, où le temps n'a pas été compté, il a été possible de considérer cette activité solidaire comme une forme privilégiée d'engagement, porteuse de nombreux potentiels générateurs de rencontres, de compréhension, de relation (même à l'intérieur de l'Organisme), voire d'établissement de liens durables. Ces engagements partis de « bricolages savants » se sont organisés et ont changé notre façon de voir, de gérer le quotidien, avec un effet mémoire intense. Les connaissances 3D ont apporté un petit bouleversement organisationnel.

D'un point de vue factuel, l'activité de soutien spontané a consisté au départ en la réalisation d'écrans de protection utilisant un matériau transparent flexible, en général à partir de données open source. L'existence de réseaux (Réseau des mécaniciens du CNRS, Fab-Labs, etc.) a permis rapidement d'échanger sur les



manières de procéder, sur les sources d'approvisionnement en matière, sur les meilleures techniques de fabrication, etc. Dans cette activité généreuse, les données quantitatives n'existent probablement pas. Devant la pénurie, des entreprises ont fourni des logiciels de fabrication libres, très vite élargis à la production d'objets plus variés : poignées de porte, systèmes de prélèvement, masques de protection, systèmes de ventilation pour malades, raccords sur masques, etc. Avec des apports disparates, du bricolage savant, des échanges informels non hiérarchisés permanents, des équipements ont pu être produits, sans doute en dehors des règles et des normes officielles.

Au-delà de l'action finalement modeste (difficile à quantifier) des travaux réalisés relativement au réel besoin du corps social, même dans les formes les plus ordinaires et les plus locales d'aide technique, être présent avec sa compréhension de l'événement extraordinaire qui a été vécu a été implicitement considéré par les réseaux informels CNRS et Fab-Labs comme une valeur primordiale pour « être avec ». Dans ces moments de crise, la proximité, la débrouillardise, la relation et la continuité ont constitué les contraintes de base d'une nouvelle grammaire de la solidarité dans l'action. Une base qui permettait l'expression de formes particulièrement importantes d'action directe solidaire, parce que les liens anciens qui nous reliaient à nos structures hiérarchiques étaient distendus par le confinement et l'inaction partielle associée par éloignement des machines et des instruments (et aussi, rappelons-le, avec une bienveillance généralisée de celles-ci, voire plus).

Sur deux mois, dans cette situation particulière, pleine d'enseignements, la solidarité a réinterprété et créé de nouvelles habitudes en repensant les rôles de chacun. La réponse à l'appel, à l'urgence, à l'émotion s'est immiscée dans ce qui réglait nos comportements d'hier [204]. La relation à l'autre se distingue profondément de la relation traditionnelle, s'appuyant sur des objectifs bien maîtrisés avec des gestions et des évaluations bien réglées. Quoi qu'on en pense ou dise, la recherche suit et respecte des processus normés. Dans l'urgence, avec de modestes moyens, des difficultés d'accès aux machines, des contrôles pour les déplacements, des connaissances lacunaires sur les risques liés aux productions et à leur utilisation, etc., des spécialistes 3D ont participé, en modifiant les modes organisationnels, en utilisant les « matériaux du bord », à une circulation de l'information et à la fourniture d'équipements de protection individuelle économes et pragmatiques. La débrouillardise, forme de défragmentation intellectuelle, l'a emporté sur les modes de gestion et leur conservatisme en supprimant nombre d'interdépendances. Techniciens et chercheurs, membres des Fab-Labs ont aussi appris en commun (ou élargi) quelques rudiments de solidarité sociale et ont pris part dans la prise de risque indispensable à des actions pour les autres, pour le bien commun.

L'exceptionnel ne dure pas. À titre d'exemple, l'auteur [203] a recherché des sites internationaux issus de collègues, d'entreprises ou de régions participant à la lutte contre la pandémie (systèmes de prélèvement, masques, visières, ventilation assistée, poignées de porte, hygiène et sécurité, etc.). En ayant pris le train en marche le 7 avril 2020, dès que les connaissances sur les effets du virus ont augmenté avec les moyens de s'en prémunir, le nombre de sites a rapidement fortement décliné, comme le montre la figure 29.

Début juin 2020, la crise passée, les unités de recherche (comme les entreprises) ont commencé à se recentrer sur leur réouverture prochaine, ce qui est normal – mais compliqué, à cause de règles de protection indispensables des personnels – dans le contexte « d'avant » (figure 29). Remobilisant donc leurs forces à leur seul bénéfice, alors qu'il aurait fallu peut-être continuer à mobiliser des forces opérationnelles au bénéfice de la communauté [des communautés] ou bien tenir compte des acquis organisationnels, de l'intérêt de la prise de risque, de la part de ceux qui ont joué avec succès le jeu de l'aide généreuse. À partir de cette expérimentation en vraie grandeur, entre anarchie solidaire, dirigisme national, égoïsme et inerties diverses, il doit y avoir moyen de trouver une réelle légitimité à ces liens renoués, sans être obligés de donner

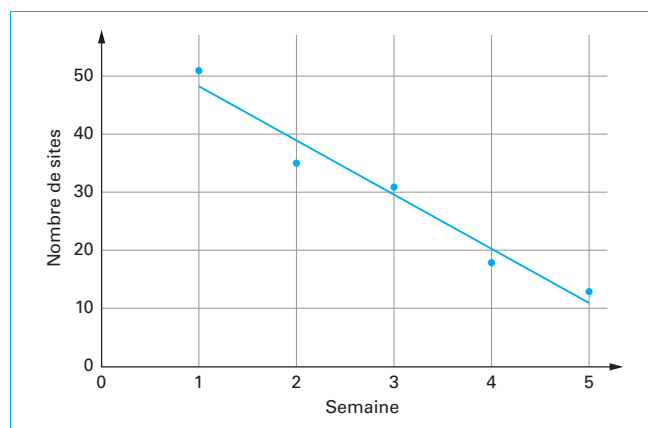


Figure 29 – Évolution temporelle du nombre de sites de lutte contre la Covid-19 du 16 avril jusqu'au 13 mai 2020

des bons points ou une belle médaille à ceux qui souhaitent participer à l'effort national.

Cependant, ce que l'on peut comprendre de la situation, c'est que si l'on veut trouver demain un nouvel accord social, prenant en considération les nombreux élan de solidarité constatés, il est impératif d'être toujours présents, de poursuivre la gestion de la crise sanitaire et socio-économique, mais sans doute autrement que dans cette urgence, finalement stimulante parce que génératrice de liens de toutes sortes. Il conviendrait alors d'engager, le plus vite possible, un processus de réflexions et de propositions, étayées « socialement », visant à préparer et à changer ce demain qui ne devrait alors pas se limiter à un simple *business as usual*, un retour aux anciens dogmes intangibles, quasiment élevés au rang d'éthique, là où l'on a besoin d'un *human as unusual* [205]. Mais c'est sans doute plus difficile à faire qu'à dire.

La crise du coronavirus a changé la donne possible et, de manière générale, une vague de contre-mondialisation pourrait en être la conséquence [206] [207] [208]. Toutefois, il faudra du temps pour savoir jusqu'où allaient et vont aller nos interdépendances. De là à y voir un espace pour plus de créativité... La conviction croissante voulant que « tout échange n'est pas forcément bon » pourrait se traduire en un renforcement des logiques de désunion internationale et de protectionnisme national. À l'image de l'État autoritariste consolidé, cette fermeture du monde viendrait s'inscrire dans la logique préexistante des forteresses à protéger dans nombre de pays.

Il n'est pas exclu non plus que, malgré cette anarchie constructive, cette débrouille et cette créativité déployées durant la crise, un phénomène de retournement puisse chercher à adopter des modes de fonctionnement moins horizontaux, plus hiérarchiques. En effet, « en situation de stress, forcée de réagir dans des temps très courts, la culture traditionnelle du commandement vertical a repris le dessus, par nécessité autant que par réaction d'un management plus âgé, peut-être secrètement heureux de voir son savoir-faire décisionnel remis au premier plan, au terme de plusieurs années pendant lesquelles l'agilité des jeunes leur aura paru survalorisée » [209]. Cette situation pourrait être exacerbée par un marché de l'emploi difficile lié à la crise économique associée à celle du coronavirus... Dans ces conditions, on perdrait les créativité locales, les capacités d'innovation, les initiatives heureuses au profit d'un retour à un conservatisme gestionnaire et comptable, peu porteur d'innovations nouvelles.

Le changement dont beaucoup parlent qui affecte la société n'est pas un chaos, mais reste cantonné dans des règles acceptées dans leur ensemble par la société. « N'est-ce pas ce qui s'est passé d'ailleurs à chaque moment critique de l'humanité où devant des changements profonds on est "revenu" aux humanités mais en les

*renouvelant entièrement comme au moment de l'humanisme de la Renaissance qui est un retour aux classiques précisément pour penser la science moderne et la découverte des nouveaux mondes, et cela avec de nouvelles méthodes et de nouveaux objets ? » [210]. Mais est-ce réaliste si l'on veut remettre à flot l'économie sur des bases temporelles de l'année ?*

En effet, les entreprises européennes sont confrontées à un certain nombre d'inconnues : de marché tout d'abord, de trésorerie associée, de poursuite de la pandémie avec les protections obligées des salariés et le rétrécissement des marchés, la stabilité de l'Union Européenne, la relation des entreprises françaises à l'argent public qui n'est plus présent à force d'augmenter la dette, etc. [211]. Il y a donc urgence à ranimer notre économie en sommeil, sans perdre les acquis de solidarité qui nous ont permis de préserver son appareil économique. Mais pour combien de temps et comment ? En tout état de cause, cette aventure a montré l'intérêt des productions agiles permises par la fabrication additive [212]. Pour le reste, attendons demain...

#### À retenir

- Espace de liberté et d'initiatives durant la crise liée au coronavirus en termes de production d'équipements de protection individuelle à partir de machines 3D (essentiellement SLS).
- Organisation de crise apprenante sans hiérarchie.
- La question du retour lié à cette autoformation est posée dans une société qui a besoin de se réinventer.

## 7. Conclusion

Un corps de savoirs, qui a au plus une trentaine d'années d'investissement en fabrication additive a été créé. Il ne connaît pas encore les limites de son territoire et par incréments va de l'avant, sans avoir eu trop à se préoccuper de ruptures tant son marché est en expansion : le développement de nouveaux matériaux a un impact sur la conception et la fabrication des produits et permet de nouvelles applications [131] [213]. Ce que tentent de montrer les descriptions qui ont été présentées, correspondant à de nouvelles voies d'innovation et d'application très récentes, c'est une approche sur de nouveaux sujets frontières, encore très peu explorés, mais porteurs de futur (en particulier pour le bio-printing et l'impression 4D). En alliant des procédés originaux et matière (informée et/ou multiple), on devra se placer délibérément dans un contexte interdisciplinaire engendrant des idées nouvelles entrant en rupture avec les procédés d'impression 3D traditionnels.

Ces domaines nouveaux, en cours de préconstruction, disposent dès à présent de marchés et de niches applicatives : robotique souple, capteurs, systèmes micro-fluidiques, organoïdes dans le domaine médical, etc. Pour atteindre une maturité autorisant ces transferts vers la socio-économie, la recherche d'une adéquation matériaux-procédé est indispensable, conduisant dans le futur proche à la réalisation de machines dédiées (et non généralistes). Pour les applications biologiques, des aspects épistémologiques seront à traiter pour atteindre un jour des fonctionnalités souhaitées dans la fabrication d'organes vivants et implantables. Il s'agit d'un enjeu considérable en médecine.

Les sujets traités sont à l'intersection de compétences diverses et hétérogènes, qui finalement configurent des projets de recherche applicable ouverts, adaptatifs, à géométrie variable. Une intégration entre domaines encore trop disjointes devient de plus en plus nécessaire si l'on veut gagner en France ou en Europe, dans la compétition sur ces thèmes très ouverts, créatifs et fortement interdisciplinaires.

## 8. Glossaire

### Bio-bots

Également appelés « soft-robots », ils sont composés de matériaux déformables (fluides, élastomères, gels, etc.) qui miment les propriétés élastiques et rhéologiques de tissus biologiques et d'organes.

### Bio-printing

Sujet émergent issu des technologies de fabrication additive qui vise la fabrication d'organes et de tissus vivants.

### Micro-fluidique

Science et technologie de systèmes manipulant des fluides et dont au moins l'une des dimensions caractéristiques est de l'ordre du micromètre.

### Organoïde

Structure multicellulaire tridimensionnelle qui reproduit in vitro la micro-anatomie d'un organe.

### Origami

À l'origine, nom japonais de l'art du pliage du papier. Ce principe a été appliqué à des matériaux plats dont on fait évoluer la forme par pliage.

### Voxel

Volume élémentaire transformé lors de la fabrication additive.



# Impression 3D : niches applicatives porteuses

## 3D Printing : Emerging applicatives niches

par **Jean-Claude ANDRÉ**  
Directeur de recherche au CNRS

### Sources bibliographiques

- [1] ANDRÉ (J.C.), LE MÉHAUTÉ (A.) et DE WITTE (O.). – *Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle*. Brevet français n° 8411241 (1984).
- [2] 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., Londres, UK (2017).
- [3] ANDRÉ (J.C.). – *L'émergence silencieuse de la complexité en impression 3D*. Entropie, 20-1, 34 p. <https://www.openscience.fr/L-emergence-silencieuse-de-la-complexite-en-impression-3D> (2020).
- [4] DE DINECHIN (J.). – *Guide de survie du chef de projet – Surmonter les épreuves, créer la confiance, organiser le succès*. Dunod Ed., Paris (2017).
- [5] SCHUMPETER (J.A.). – *The theory of economic development*. Harvard University Press Ed., Cambridge, USA (1934).
- [6] DAVIDSSON (P.). – *Researching Entrepreneurship*. Springer Ed., New-York, USA (2004).
- [7] BLANCO (S.). – *De quelques signaux faibles à une veille anticipative utile à l'innovation de rupture*. Revue des Sciences de Gestion, 3-4, p. 27-37 (2008).
- [8] SHANE (S.) et VENKATARAMAN (S.). – *The promise of entrepreneurship as a field of research*. Academy of Management Review, 25, p. 217-226 (2000).
- [9] ANDRÉ (J.C.). – *Impression 3D : niches applicatives porteuses*. Techniques de l'Ingénieur, ref. [BM 7 970v1] (2017).
- [10] ACKOFF (R.L.). – *Méthodes de planification de l'entreprise*. Éditions d'organisation, Paris (1973).
- [11] BODNARIUK (M.) et MELENTIEV (R.). – *Bibliometric analysis of micro-nano manufacturing technologies*. Nanotechnology and Precision Engineering, 2, p. 61-70 (2019).
- [12] RAMIREZ-FERRERO (M.). – *Market impact and perspectives of 3D printing technologies*. <http://www.dima3d.com/en/market-impact-perspectives-3d-printing-technologies/> (2015).
- [13] GARTNER. – *Gartner Hype Cycle*. <https://www.gartner.com/en/research/methodologies/gartner-hype-cycle> (2010).
- [14] FENN (J.) et RASKINO (M.). – *Mastering the Hype Cycle : How to choose the right innovation at the right time*. Harvard Business School Press Ed., Boston, USA (2008).
- [15] O'LEARY (D.E.). – *Gartner's hype cycle and information system research issues*. International Journal of Accounting Information Systems, 9, p. 240-252 (2008).
- [16] DEDEHAYIR (O.) et STEINERT (M.). – *The hype cycle model : A review and future directions*. Technological Forecasting and Social Change, 108, p. 28-41 (2016).
- [17] CAMPANI (M.) et VAGLIO (R.). – *A simple interpretation of the growth of scientific/technological research impact leading to hype-type evolution curves*. Scientometrics, 103, p. 75-83 <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1410/1410.8685.pdf> (2015).
- [18] LA MÉCANIQUE. – *Bio-printing : L'Oréal va imprimer de la peau humaine avec Organovo*. <http://www.lamecanique.com/bio-printing-loreal-va-imprimer-de-la-peau-humaine-avec-organovo/> (2015).
- [19] MELCHELS (F.P.W.), DOMINGOS (M.A.N.), KLEIN (T.J.), MALDO (J.), BARTOLO (P.J.) et HUTMACHER (D.W.). – *Additive manufacturing of tissues and organs*. Progress in Polymer Science, 37, p. 1079-1084 (2012).
- [20] COSTA (P.F.), VAQUETE (C.), BALDWIN (J.), CHHAYA (M.), GOMEZ (M.E.), REIS (R.L.), THEORODOPOULOS (C.) et HUTMACHER (D.W.). – *Biofabrication of customized bone grafts by combination of additive manufacturing and bioreactor knowhow*. Biofabrication, 6, 035006 (2014).
- [21] BASSOLI (E.), DEUTE (L.), GATTO (A.), SPALETTA (G.), PADERNO (A.), SINI (N.), PARRILLI (D.), GIARDINO (R.), STRUSI (V.), DALLATANA (D.), MASTROGIACOMO (S.), ZAMPARELLI (A.), IAFISCO (M.) et TONI (R.). – *A combined additive layer manufacturing/indirect replication method to prototype 3D vascular like structures of soft tissues and endocrine organs*. Virtual and Physical Prototyping, 7, p. 3-11 (2012).
- [22] CHHAYA (M.P.), MELCHELS (F.P.W.), HOLZAPFEL (B.M.), BALDWIN (J.G.) et HUTMACHER (D.W.). – *Sustained regeneration of high volume adipose tissue for breast reconstruction using computer aided design and bio-manufacturing*. Biomaterials, 52, p. 551-560 (2015).
- [23] MARGA (F.), JAKOB (K.), KHATIWALA (C.), SHEPHERD (B.), DORFMAN (S.), HUBBARD (B.), COLBERT (S.) et FORGACS (G.). – *Toward engineering functional organ modules by additive manufacturing*. Biofabrication, 4, 022001 (2012).
- [24] BOSE (S.), VAHABZADEL (S.) et BANDYOPADHYAY (A.). – *Bone tissue engineering using 3D printing*. Materials Today, 16, p. 497-504 (2013).
- [25] CVETKOVIC (C.), RAMAN (R.), WILLIAM (B.J.), TOLISH (M.), BAJAJ (P.), SAKAR (M.S.), ASADA (H.H.), SAIL (T.A.) et BASHIR (R.). – *Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle*. Proc. Natl. Acad. Sci., 111, p. 10125-10130 (2014).
- [26] VAN DER SANGEN. – *BioBots is a 3D printer for living cells*. <http://www.3dbio-printing-conference.com/3d-bio-printing/biobots-is-a-3d-printer-for-living-cells/> (2015).
- [27] ABURAI (M.), MARKL (E.) et STUJA (K.). – *New concept for design and control of 4 axis robot using the additive manufacturing technology*. Procedia Engineering, 100, p. 1364-1369 (2015).

- [28] LIN (D.), NIAN (Q.), DENG (B.), JIN (S.), HU (Y.), WANG (W.) et CHENG (G.J.). – *3D printing of complex structures : man made or toward nature ?* ACS nano, 8, p. 9710-9715 (2014).
- [29] THUILLIER (P.). – *Le petit savant illustré*. Seuil Éd., Paris (1980).
- [30] HAUDIN (F.), BRAU (F.) et DE WIT (A.). – *La chimie génératrice de forme : végétation métallique et jardins chimiques*. <https://www.openscience.fr/La-chimie-generatrice-de-forme-vegetation-metallique-et-jardins-chimiques> (2018).
- [31] LEDUC (S.). – *La biologie synthétique : étude de biophysique*. Poinat Éd., Paris (1912).
- [32] LEDUC (S.). – *Théorie physico-chimique de la vie et générations spontanées*. Poinat Éd., Paris (1910).
- [33] EASTES (R.E.), DARRIGA (C.), BATAILLE (X.) et MONFEUILLARD (H.). – *Des vers dans les jardins chimiques pour (re)mettre la science en culture*. Alliage, 64, p. 73-89 (2009).
- [34] ROTHMUND (P.W.K.). – *Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns*. Nature, 440, p. 297-302 (2006).
- [35] HAN (D.), PAL (S.), NANGREAVE (J.), DENG (Z.), LIU (Y.) et YAN (H.). – *DNA Origami with Complex Curvatures in Three-Dimensional Space*. Science, 332, p. 342-346 (2011).
- [36] SAWYER (E.). – *DNA origami*. [http://www.nature.com/scitable/blog/bio2.0/dna\\_origami](http://www.nature.com/scitable/blog/bio2.0/dna_origami) (2011).
- [37] DUREUIL (A.). – *Des nano-moteurs pour des courses de nano-voitures...* <https://www.info-chimie.fr/des-nano-moteurs-pour-des-courses-de-nano-voitures,46270> (2013).
- [38] MEDINA-SANCHEZ (M.), XU (H.) et SCHMIDT (O.G.). – *Micro- and nano-motors : the new generation of drug carriers*. Therapeutic Delivery, 9, p. 303-316 (2018).
- [39] BANDARI (V.K.), NAN (Y.), KARNAUSHENKO (D.), HONG (Y.), SUN (B.), STRIGGOW (F.), KARNAUSHENKO (D.D.), BECKER (C.), FAGHIH (M.), MEDINA-SANCHEZ (M.), ZHU (F.) et SCHMIDT (O.G.). – *A flexible microsystem capable of controlled motion and actuation by wireless power transfer*. Nature Electronics, 3, p. 172-180 (2020).
- [40] NOVOTNÝ (P.), WANG (H.) et PUMERA (M.). – *Nano-robots : Machines Squeezed between Molecular Motors and Micro-motors*. Chem., 6, p. 867-884 (2020).
- [41] BAQUIAST (J.P.). – *La morphogénèse*. <http://www.automatesintelligents.com/echanges/2004/jan/morphogenese.html> (2004).
- [42] SAUVAGE (J.P.). – *From Chemical Topology to Molecular Machines (Nobel Lecture)*. Angewante Chemie, International Edition, 56, p. 11080-11093 (2017).
- [43] MUGNIER (L.). – *Introduction aux problèmes inverses : application à l'imagerie optique à haute résolution en astronomie*. C9 in P. Léna Éd. « Des données à l'objet : le problème inverse », EDP Sciences/CNRS Éd., Paris <http://laurent.mugnier.free.fr/ftp/SupOpt/methodesPhy-LM.pdf> (2008).
- [44] SUSSAN (R.). – *Retour sur la matière programmable*. <http://www.internetactu.net/> 2014/07/11/retour-sur-la-matiere-programmable/ (2014).
- [45] ZENTEL (R.). – *Polymer Coated Semiconducting Nanoparticles for Hybrid Materials*. Inorganics, 8, p. 1-21 (2020).
- [46] SANCHEZ (C.). – *Chimie des matériaux hybrides*. [https://www.college-de-france.fr/media/clement-sanchez/UPL5460438176618849830\\_sanchez.pdf](https://www.college-de-france.fr/media/clement-sanchez/UPL5460438176618849830_sanchez.pdf) (2011).
- [47] KOTOV (N.A.). – *Self-assembly of inorganic nanoparticles : Ab ovo*. Journal Exploring the Frontiers of Science, 119, 66008 (2017).
- [48] INSP. – *Microscopie en champ proche*. Institut des Nano-Sciences de Paris <http://www.insp.jussieu.fr/Microscopie-en-champ-proche.html> (2020).
- [49] TIAN (Y.), LU (K.), WANG (F.), GUO (Z.), ZHOU (C.), LIANG (C.), YUAN (Y.) et ZHANG (D.). – *Design of a novel 3D tip-based nanofabrication system with high precision depth control capability*. International Journal of Mechanical Sciences, 169, 105328 (2020).
- [50] GE (Q.), LI (Z.), WANG (Z.), KOWSARI (K.), ZHANG (W.), HE (X.), ZHOU (J.) et FANG (N.X.). – *Projection micro stereo-lithography based 3D printing and its applications*. International Journal of Extreme Manufacturing, 2, 022004 <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ab8d9a> (2020).
- [51] PARK (S.H.), YANG (D.Y.) et LEE (K.S.). – *Two-photon stereo-lithography for realizing ultra-precise three-dimensional nano/microdevices*. Laser & Photonics Reviews, 3, p. 1-11 (2009).
- [52] AMRA (C.), ANDRÉ (J.C.) et GALLAIS (L.). – *Procédé pour la réalisation d'un objet tridimensionnel par un processus de photo-polymérisation multi-photonique et dispositif associé*. Brevet français 16-59211 du 28-09-2016. Dépôt d'une demande internationale de brevet (PCT) concernant l'invention citée en référence : numéro PCT/FR2017/052622 du 27-09-2017 (2017).
- [53] ANDRÉ (J.C.) et CORBEL (S.). – *Stéréo-photo-lithographie laser*. Polytechnica Éd., Paris (1994).
- [54] MAYER (F.), RICHTER (S.), WESTHAUSER (J.), BLASCO (E.), BARNER-KOWOLLIK (C.) et WEGENER (M.). – *Multi-material 3D laser micro-printing using an integrated microfluidic system*. Science Advances, 5, eaau9160 (2019).
- [55] PEREVOZNIK (D.), NAZIR (R.), KIYAN (R.), KURSELIS (K.), KOSZARNA (B.), GRYKO (D.T.) et CHICHKOV (B.N.). – *High-speed two-photon polymerization 3D printing with a microchip laser at its fundamental wavelength*. Optics Express, 27, p. 25119-25125 (2019).
- [56] LI (Q.), GROJO (D.), ALLONCLE (A.P.), CHICHKOV (B.) et DELAPORTE (P.). – *Digital laser micro- and nano-printing*. Nano-photonics, 8, p. 27-44 (2018).
- [57] NANOSCRIBE. – *Ultra-High Resolution 3D Printing at the Micro-Scale with Nanoscribe*. <https://3dprint.com/122337/nanoscribe-microscale-printing/> (2016).
- [58] LI (L.), HONG (M.), SCHMIDT (M.), ZHONG (M.), MALSHE (A.), HUIS IN'TVELD (B.) et KOVALENKO (V.). – *Laser nano-manufacturing – State of the art and challenges*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 60, p. 735-755 (2011).
- [59] KOUMOULOS (E.P.), GKARTZOU (E.) et CHARITIDIS (C.A.). – *Additive (nano)-manufacturing perspectives : the use of nano-filters and tailored materials*. Manufacturing Review, 4, p. 12 (2017).
- [60] LIN (L.), KOLLIPARA (P.S.) et ZHENG (Y.). – *Digital manufacturing of advanced materials : Challenges and perspective*. Materials Today, 28, p. 49-62 (2019).
- [61] HAIL (C.U.), HÖLLER (C.), MATSUZAKI (K.), ROHNER (P.), RENGIER (J.), SANDOGHDAR (V.), POULIKAKOS (D.) et EGHLIDI (H.). – *Nano-printing organic molecules at the quantum level*. Nature Communications, 10, p. 1880 (2019).
- [62] AHN (S.H.), YOON (H.S.), JANG (K.H.), KIM (E.S.), LEE (H.T.), LEE (G.Y.), KIM (C.S.) et CHA (S.W.). – *Nanoscale 3D printing process using aerodynamically focused nanoparticle (AFN) printing, micro-machining and focused ion beam (FIB)*. CIRP Annals – Manufacturing Tech., 64, p. 523-536 (2015).
- [63] HOERBER (J.), GLASSCHROEDER (J.), PFEFFER (M.), SCHILP (J.), ZAEH (M.) et FRANKE (J.). – *Approaches for additive manufacturing of 3D electronic applications*. Procedia CIRP, 17, p. 806-811 (2014).
- [64] SAENGCHAIRAT (N.), TRAN (T.) et CHUA (C.K.). – *A review : additive manufacturing for active electronic components*. Virtual and Physical Prototyping, 12, p. 31-46 (2017).
- [65] NIKLAUS (F.). – *The next generation of 3D printers*. <https://erc.europa.eu/erc-stories/next-generation-3d-printers> (2014).
- [66] YU (C.C.) et CHEN (H.L.). – *Nanoimprint technology for patterning functional materials and its applications*. Microelectronic Eng., 132, p. 98-119 (2015).
- [67] PIQUÉ (A.), KIM (H.A.), RAYMOND (C.Y.), BENIAM (I.) et BRECKENFELD (E.). – *Laser induced forward transfer (LIFT) of congruent voxels*. Appl. Surface Sci., DOI:10.1016/j.apusuc.2015.09.005 (2015).
- [68] MIKŠYS (J.), ARUTINOV (G.) et RÖMER (G.R.B.E.). – *Pico- to nanosecond pulsed laser-induced forward transfer (LIFT) of silver nanoparticle inks : a comparative study*. Applied Physics A, 125, p. 814 (2019).
- [69] BRECKENFELD (E.), KIM (H.), AUYEUNG (R.C.Y.), CHARIPAR (N.), SERRA (P.) et PIQUÉ (A.). – *Laser-induced forward transfer of silver nanopaste for microwave interconnects*. Appl. Surface Sci., 331, p. 254-261 (2015).
- [70] FLORIAN (C.), CABALLERO-LUCAS (F.), FERNÁNDEZ-PRADAS (J.M.), ARTIGAS (R.), OGIER (S.), KARNAKIS (D.) et SERRA (P.). – *Conductive silver ink printing through the laser-induced forward transfer technique*. Appl. Surface Sci., 336, p. 304-308 (2015).
- [71] SHAN (Y.), ZHANG (X.), CHEN (G.) et LI (H.). – *Laser direct printing of solder paste*. AIP Advances, 9, 125306 (2019).
- [72] DAALKHAIJAV (U.), YIRMIBESOGLU (O.D.), WALKER (S.) et MENGÜÇ (Y.). – *Rheological Modification of Liquid Metal for Additive Ma-*

- nufacturing of Stretchable Electronics. Advanced Materials Technologies, 3, 1700351 (2018).
- [73] SCHAEER (E.) et ANDRÉ (J.C.). – *Pour un nouveau du Génie des Procédés*. ISTE Ed., Londres, UK (2019).
- [74] CHANMANWAR (R.M.), BALASUBRAMANIAM (R.) et WANKHADE (L.N.). – *Application and manufacturing of microfluidic devices : Review*. International Journal of Modern Engineering Research, 3, p. 849-856 (2013).
- [75] FERNANDES (A.C.), GERNAEY (K.V.) et KRÜHNE (U.). – *Connecting worlds – a view on microfluidics for a wider application*. Biotechnology Advances, 36, p. 1341-1366 (2018).
- [76] ABKARIAN (M.). – *La micro-fluidique*. [http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCMQFjAAahUKEwjedoD3wojJAhVVCy-hoKHcYGBcY&url=http%3A%2F%2Fwww.coulomb.univ-montp2.fr%2Fperso%2Fmanouk.abkarian%2FManouk\\_Abkarian\\_Homepage%2FLinks\\_files%2FMicrofluidique.pdf&usq=AFQjCNHV8W7uk3JyF4T\\_k68TeHHrmoJJSJQ&bvm=bv.107406026,bs.2,d.ZWU](http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CCMQFjAAahUKEwjedoD3wojJAhVVCy-hoKHcYGBcY&url=http%3A%2F%2Fwww.coulomb.univ-montp2.fr%2Fperso%2Fmanouk.abkarian%2FManouk_Abkarian_Homepage%2FLinks_files%2FMicrofluidique.pdf&usq=AFQjCNHV8W7uk3JyF4T_k68TeHHrmoJJSJQ&bvm=bv.107406026,bs.2,d.ZWU) (2011).
- [77] JENSEN (K.L.). – *Micro-reaction engineering \* is small better ?* Chemical Engineering Science, 56, p. 293-303 (2001).
- [78] INSTITUT PIERRE-GILLES DE GENNES. – *Comprendre la micro-fluidique*. [http://www.institut-pgg.fr/Comprendre-la-Microfluidique\\_65.html](http://www.institut-pgg.fr/Comprendre-la-Microfluidique_65.html) (2015).
- [79] O'NEILL (P.F.), BEN AZOUZ (A.), VÁZQUEZ (M.), LIU (J.), MARCZAK (S.), SLOUKA (Z.), CHANG (H.C.), DIAMOND (D.) et BRABAZON (D.). – *Advances in three-dimensional rapid prototyping of microfluidic devices for biological applications*. Bio-microfluidics, 8, 052112 (2014).
- [80] VAN KAN (J.A.), SHAO (P.G.), WANG (Y.H.) et MALAR (P.). – *Proton beam writing a platform technology for high quality 3D metal molds fabrication for nanofluidic applications*. Microsystems Technology, 17, p. 1519-1527 (2011).
- [81] GONZALEZ (A.) et HERVAS (M.). – *Real sample analysis on micro-fluidic devices*. Talanta, 74, p. 342-357 (2009).
- [82] FLORENT (M.). – *Stratégie d'intensification des procédés*. Thèse de l'Université de Lorraine, Nancy (2013).
- [83] MATLOSZ (M.), FALK (L.) et COMMENGE (J.M.). – *« Process intensification » in « Micro-chemical engineering in practice »*. Wiley Ed., New-York, USA (2009).
- [84] COMMENGE (J.M.), FALK (L.), CORRIOU (J.P.) et MATLOSZ (M.). – *Optimal design for flow uniformity in microchannel reactors*. Al-ChE J., 48, p. 345-358 (2008).
- [85] WALMSLEY (T.G.), VARBANOV (P.S.), SU (R.), ONG (B.) et LAL (N.). – *Frontiers in process development, integration and intensification for circular life cycles and reduced emissions*. Journal of Cleaner Production, 201, p. 178-191 (2018).
- [86] GRÜTZNER (T.), ZIEGENBALG (D.) et GÜTTEL (R.). – *Process Intensification – An Unbroken Trend in Chemical Engineering*. Chemie Ingenieur Technik, 90, p. 1823-1831 (2018).
- [87] TIAN (Y.), DEMIREL (S.E.), HASAN (M.M.F.) et PISTIKOPOULOS (E.N.). – *An overview of process systems engineering approaches for process intensification : State of the art*. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, 133, p. 160-210 (2018).
- [88] FALK (L.), DE BELLEFON (C.), GOURDON (C.) et SERRA (C.). – *Intensification des procédés*. Actualité Chimique 338-339, p. 101-111 (2010).
- [89] GdR nano et micro-fluidique <http://www.gdrmicrofluidique.com/> (2016).
- [90] HO (C.M.B.), NG (S.H.) et LI (K.H.H.). – *3D printed microfluidics for biological applications*. Lab Chip, 15, p. 3627-3637 (2015).
- [91] WALCZAK (R.) et ADAMSKI (K.). – *Inkjet 3D printing of microfluidic structures – on the selection of printer towards printing your own microfluidic chips*. J. Micro-mech. Micro-Eng., 25, 085013 (2015).
- [92] O'CONNOR (J.), PUNCH (J.), JEFFERS (N.) et STAFFORD (J.). – *A comparison between the hydrodynamic characteristics of 3D printer polymer and etched silicon micro-channels*. Micro-fluid. Nano-fluid., 19, p. 385-394 (2015).
- [93] KHAN (F.A.), CELIK (H.K.), ORAL (O.) et RENNIE (A.E.W.). – *A Short Review on 4D Printing*. International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry, 2, p. 59-67 <http://dergi-park.gov.tr/download/article-file/501553> (2018).
- [94] LISTEK (V.). – *Interview with Nicole Hone who uses 4D Printing to Make Tangible Animation*. <https://3dprint.com/237494/interview-with-nicole-hone-who-uses-4d-printing-to-make-tangible-animation/> (2019).
- [95] SCHWARTZ (J.J.) et BOYDSTON (A.J.). – *Multimaterial actinic spatial control 3D and 4D printing*. Nature Communications, 10, p. 791 <https://www.nature.com/articles/s41467-019-08639-7> (2019).
- [96] LOHMULLER (P.), FAVRE (J.), KENZARI (S.), PIOTROWSKI (B.), PELTIER (L.) et LAHEURTE (P.). – *Architectural effect on 3D elastic properties and anisotropy of cubic lattice structures*. Materials & Design, 182, 108059 (2019).
- [97] SHEN (X.), JIA (B.), ZHAO (H.), YANG (X.) et LIU (Z.). – *Study on 3D printing process of continuous carbon fiber reinforced shape memory polymer composites*. IOP Conference Series : Material Science and Engineering, 563, 022029 (2019).
- [98] GONZÁLEZ-HENRÍQUEZ (C.M.), SARABIA-VALLEJOS (M.A.) et RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ (J.). – *Polymers for additive manufacturing and 4D-printing : Materials, methodologies, and biomedical applications*. Progress in Polymer Science, 94, p. 57-116 (2019).
- [99] GOO (B.), HONG (C.H.) et PARK (K.). – *4D printing using anisotropic thermal deformation of 3D-printed thermoplastic parts*. Materials & Design, 188, 108485 (2020).
- [100] AHMED (K.), SHIBLEE (N.I.), KHOSLA (A.), NAGAHARA (L.), THUNDAT (T.) et FURUKAWA (H.). – *Review – Recent Progresses in 4D Printing of Gel Materials*. Journal of Electrochemical Society, 167, 037563 (2020).
- [101] FANG (Z.), SONG (H.), ZHANG (Y.), JIN (B.), WU (J.), ZHAO (Q.) et XIE (T.). – *Modular 4D Printing via Interfacial Welding of Digital Light-Controllable Dynamic Covalent Polymer Networks*. Matter, 2, p. 1-11 (2020).
- [102] LE DUIGOU (A.), CHABAUD (G.), SCARPA (F.) et CASTRO (M.). – *Bioinspired Electro-Thermo-Hygro Reversible Shape-Changing Materials by 4D Printing*. Advanced Functional Materials, 2019, 1903280 (2019).
- [103] SUN (L.), LI (J.), CHEN (Y.), YANG (Y.), TAO (Y.), WANG (G.) et YAO (L.). – *4DTexture : A Shape-Changing Fabrication Method for 3D Surfaces with Texture*. CHI EA '20 : Extended Abstracts of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems – LBW212, p. 1-4 (2020).
- [104] JEONG (H.Y.), WOO (B.H.), KIM (N.) et JUN (Y.C.). – *Multicolor 4D printing of shape-memory polymers for light-induced selective heating and remote actuation*. Scientific Reports, 10, 6258 (2020).
- [105] MÉLANIE (R.). – *En quoi l'impression 4D influencera-t-elle les techniques de fabrication actuelles ?* <https://www.3dnatives.com/impression-4d-technologie-23092019/> (2019).
- [106] O'NEAL (B.). – *4D Printed Structures to Impact Many Industries in the Future*. <https://3dprint.com/265043/4d-printed-structures-impact-many-industries-future/> Article : [https://www.researchgate.net/profile/Abdus-salam\\_Ali\\_Ahmed/publication/339662414\\_4D\\_Printing\\_Technology\\_A-Revolution\\_Across\\_Manufacturing/link-s/5e5e997f4585152ce804d181/4D-Printing-Technology-A-Revolution-Across-Manufacturing.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Abdus-salam_Ali_Ahmed/publication/339662414_4D_Printing_Technology_A-Revolution_Across_Manufacturing/link-s/5e5e997f4585152ce804d181/4D-Printing-Technology-A-Revolution-Across-Manufacturing.pdf) (2020).
- [107] GILPIN (K.), KNAIAN (A.) et RUS (D.). – *Robot pebbles : one centimeter modules for programmable matter through self-disassembly*. <http://cba.mit.edu/docs/papers/10.05.knaian.ICRA.pdf> (2012).
- [108] MIT. – *MIT Researchers Upgrade Self-Transforming Robot Blocks – The jumping, spinning and flipping M-Blocks achieve better communication and coordination*. <https://www.roboticsbusinessreview.com/research/mit-researchers-upgrade-self-transforming-m-blocks/> (2019).
- [109] LI (Q.), FUK (G.), MOULIN (E.), MAALOUN (M.), RAVISO (M.), KULIC (I.), FOY (J.T.) et GUISEPPONE (N.). – *Macroscopic contraction of a gel induced by the integrated motion of a light-driven molecular motors*. Nature Nanotech., 10, p. 161-165 (2015).
- [110] BAKARICH (S.E.), GORKIN III (R.), in het PANHUIS (M.) et SPINKS (G.M.). – *4D printing with mechanically robust, thermally actuating hydrogels*. Macromol. Rapid Com., 36, p. 1211-1217 (2015).
- [111] CRAWFORD (M.). – *4D printing, the next level of additive manufacturing*. <https://www.asme.org/engineering-topics/articles/manufacturing-processing/4d-printing-next-level-additive-manufacturing> (2015).
- [112] THOMAS (C.), TIBBITS (S.) et BANNING (G.). – *The programmable world*. Scientific American, 311, p. 60-65 (2014).
- [113] FISCHER (J.), THIEL (M.) et WEGENER (M.). – *Matter made to order*. IEEE Spectrum, 51, p. 34-58 (2014).



- [114] BÜCKMANN (T.), KADIC (M.), SCHITTNY (R.) et WEGENER (M.). – *Mechanical metamaterials with anisotropy and negative effective mass density tensor made from one constituent material*. Phys. Status Solidi, 252B, p. 167-174 (2015).
- [115] ABTAN (A.A.). – *Design and Fabrication of Origami Elements for use in a Folding Robot Structure*. PhD from the University of Leeds, UK. <http://etheses.whiterose.ac.uk/26458/1/Akeel%20Abtan%20Thesis%20Final%20V.pdf> (2019).
- [116] HARDESTY (L.). – *Centimeter-long origami robot*. <http://news.mit.edu/2015/centimeter-long-origami-robot-0612> (2015).
- [117] RANOSA (T.). – *MIT tiny origami robot can fold itself and self-destruct : perfect profile for future microsurgeon ?* <http://www.techtimes.com/articles/56678/20150530/mit-tiny-origami-robot-can-fold-itself-and-self-destruct-perfect-profile-for-future-micro-surgeon.htm> (2015).
- [118] CALLENS (S.J.P.), TÜMER (N.) et ZADPOOR (A.A.). – *Hyperbolic origami-inspired folding of triply periodic minimal surface structures*. Applied Material Today, 15, p. 453-461 (2019).
- [119] LIU (J.), OU (H.), ZENG (R.), WEI (W.), HE (J.), ZHOU (J.), WEI (W.), LONG (K.), WEN (G.) et XIE (Y.M.). – *Miura-ori tube metamaterial with tunable dynamic property*. <https://arxiv.org/abs/1903.10282> (2019).
- [120] HORNYAK (T.). – « *Particle » Robots Work Together to Perform Tasks – Clusters of decentralized units could be used in search and rescue operations or drug delivery*. <https://www.scientificamerican.com/article/particle-robots-work-together-to-perform-tasks/> (2019).
- [121] ZAREK (M.), MANSOUR (N.), SHAPIRA (S.) et COHN (D.). – *4D Printing of Shape Memory-Based Personalized Endoluminal Medical Devices*. Macromol. Rapid Commun. 1600628. DOI:10.1002/marc.201600628 (2017).
- [122] LEHN (J.M.). – *Toward Self-Organization and Complex Matter*. Science, 295, p. 2400-2403 (2002).
- [123] FRENZEL (T.), KADIC (M.) et WEGENER (M.). – *Three-dimensional mechanical metamaterials with a twist*. Science, 358, p. 1072-1074 (2017).
- [124] KUANG (X.), ROACH (D.J.), WU (J.), HAMEL (C.M.), DING (Z.), WANG (T.), DUNN (M.L.) et QI (H.J.). – *Advances in 4D printing : Materials and applications*. Adv. Fun. Materials, 29, 1805290 (2019).
- [125] KIMIONIS (J.), ISAKOV (M.), KOH (B.S.) et TENTZERIS (M.M.). – *3D printed origami packaging with inkjet-printed antennas for RF harvesting sensors*. IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 63, p. 4521-4532 (2015).
- [126] GE (Q.), DUNN (C.K.), QI (J.) et DUNN (M.L.). – *Active origami by 4D printing*. Smart Mater. Struct., 23, 094007 <http://doi:10.1088/0964-1726/23/9/094007> (2014).
- [127] NAKANO (H.). – *Direction control of photo-mechanical bending of a photochromic molecular fiber*. J. Mater. Chem., 20, p. 2071-2074 (2010).
- [128] YOSHINO (T.), KONDO (M.), MAMIYA (J.), KINOSHITA (M.), YU (Y.L.) et IKEDA (T.). – *Three dimensional photo-mobility of cross-linked azobenzene liquid crystalline polymer fiber*. Adv. Mater., 22, p. 1361-1363 (2010).
- [129] KUKSENOK (O.) et BALAZS (A.C.). – *Modeling the photoinduced reconfiguration and directed motion of polymer gels*. Adv. Funct. Mater., 23, p. 4601-4610 (2013).
- [130] PETR (M.), HELGESON (M.E.), SOULAGES (J.), MCKINLEY (G.H.) et HAMMOND (P.T.). – *Rapid Viscoelastic Switching of an Ambient Temperature Range Photo-responsive Azobenzene Side Chain Liquid Crystal Polymer*. Soft Matter, DOI:10.1039/b000000x [https://www.researchgate.net/publication/232322420\\_Rapid\\_Viscoelastic\\_Switching\\_of\\_an\\_Ambient\\_Temperature\\_Range\\_Photo-Responsive\\_Azobenzene\\_Side\\_Chain\\_Liquid\\_Crystal\\_Polymer](https://www.researchgate.net/publication/232322420_Rapid_Viscoelastic_Switching_of_an_Ambient_Temperature_Range_Photo-Responsive_Azobenzene_Side_Chain_Liquid_Crystal_Polymer) (2015).
- [131] GAO (W.), ZHANG (Y.), RAMANUJAN (D.), RAMANI (K.), CHEN (Y.), WILLIAMS (C.B.), WANG (C.C.L.), SHIN (Y.C.), ZHANG (S.) et ZAVATTIERI (P.D.). – *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*. Computer-Aided Design, 69, p. 65-89 (2015).
- [132] PATEL (D.K.), SAKHAEI (A.K.), LAYANI (M.), ZHANG (B.), GE (Q.) et MAGDASSI (S.). – *Highly Stretchable and UV Curable Elastomers for Digital Light Processing Based 3D Printing*. Adv. Mater., 1606000. DOI:10.1002/adma.201606000 (2017).
- [133] SHAO (H.), WEI (S.), JIANG (X.), HOLMES (D.P.) et GHOSH (T.K.). – *Bioinspired Electrically Activated Soft Bi-stable Actuators*. Advanced Functional Materials, 28, 1802999 (2018).
- [134] KRIEGMAN (S.), WALKER (S.), SHAH (D.), LEVIN (M.), KRAMER-BOTTIGLIO (R.) et BONGARD (J.). – *Automated shapeshifting for function recovery in damaged robots*. <https://arxiv.org/pdf/1905.09264.pdf> (2019).
- [135] JAYASHANKAR (D.K.), GUPTA (S.S.), STELLA (L.Y.N.) et TRACY (K.). – *3D printing of compliant passively actuated 4d structures*. Solid Freeform Fabrication 2019 : Proceedings of the 30<sup>th</sup> Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference Reviewed Paper <http://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2019/082%203D%20Printing%20of%20Compliant%20Passively%20Actuated%204D%20Str.pdf> et <https://3dprint.com/262342/4d-printing-singapore-researchers-pair-compliant-mechanisms-chitosan-biopolymers/> (2019).
- [136] MIT. – *MIT scientists made a shape-shifting material that morphs into a human face*. <https://arstechnica.com/science/2020/01/just-change-the-temperature-to-make-this-material-transform-into-a-human-face/> (2020).
- [137] MAHIMWALLA (Z.), YAGER (K.), MAMIYA (J.I.), SHISHIDO (A.), PRIIMAGI (A.) et BARRETT (C.). – *Azobenzene photomechanics prospects and potential applications*. Polym. Bull., 69, p. 967-1006 (2012).
- [138] MAHIMWALLA (Z.). – *Characterization of photo-induced photo-mechanical responses in azobenzene polymers*. PhD Université Mc Gill, Montréal, Canada (2013).
- [139] ROSALES (A.M.), MABRY (K.M.), NEHLS (E.M.) et ANSETH (K.S.). – *Photoresponsive elastic properties of azobenzene-containing poly(ethylene-glycol)-based hydrogels*. Bio-macromolecules, 16, p. 798-806 (2015).
- [140] DE SIMONE (A.), GIDONI (P.) et NOSELLI (G.). – *Liquid crystal elastomer strips as soft crawlers*. J. Mech. & Phys. Solids, 84, p. 254-272 (2015).
- [141] YAMADA (M.), KONDO (M.), MIYASATO (R.), NAKA (Y.), MAMIYA (J.I.), KINOSHITA (M.), SHISHIDO (A.), YU (Y.), BARRETT (C.J.) et IKEDA (T.). – *Photo-mobile polymer material – various three dimensional movements*. J. Mater. Chem., 19, p. 60-62 (2009).
- [142] ZHANG (L.), LIANG (H.), JACOB (J.) et NAUMOV (P.). – *Photo-gated humidity-driven motility*. Nature Comm., DOI:10.1038/ncomms8429 <https://www.nature.com/ncomms/2015>.
- [143] ERCOLE (F.), DAVIS (T.P.) et EVANS (R.A.). – *Photo-responsive systems and biomaterials : photochromic polymers, light-triggered self-assembly, surface modification, fluorescence modulation and beyond*. Polymer Chemistry, 1, p. 37-54 (2010).
- [144] ILIC-STOJANOVIC (S.), NIKOLIC (L.), NIKOLIC (V.), PETRONIC (S.), STANKOVIC (M.) et MLADENOVIC-RANISAVLJEVIC (I.). – *Stimuli-sensitive hydrogels for pharmaceutical and medical applications*. Facta Universitatis, 9, p. 37-56 (2011).
- [145] YAO (Y.), WATERS (J.T.), SHNEIDMAN (A.V.), CUI (J.), WANG (X.), MANDSBERG (N.K.), LI (S.), BALAZS (A.C.) et AIZENBERG (J.). – *Multi-responsive polymeric microstructures with encoded predetermined and self-regulated deformability*. PNAS, 115, p. 12950-12955 <https://doi.org/10.1073/pnas.1811823115> ou <https://www.pnas.org/content/115/51/12950> (2018).
- [146] UMEDACHI (T.), VIKAS (V.) et TRIMMER (B.A.). – *Highly deformable 3D printed soft robot generating inching and crawling locomotion with variable friction legs*. IEEE/RSJ Int. Conf. Int. Robots & Systems (IROS), p. 4590-4593 (2013).
- [147] GE (Q.), SAKHAEI (A.H.), LEE (H.), DUNN (C.K.), FANG (N.X.) et DUNN (M.L.). – *Multi-material 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers*. Scientific Reports 6, 31110. Doi:10.1038/srep31110 (2016).
- [148] CHEN (X.), LIU (X.), OUYANG (M.), CHEN (I.), TAIWO (O.), XIA (Y.), CHILDS (P.R.N.), BRANDON (N.P.) et WU (B.). – *Multi-metal 4D printing with a desktop electrochemical 3D printer*. Scientific Reports, 9, p. 3973 (2019).
- [149] KIM (K.), ZHU (W.), QU (X.), AARONSON (C.), MCCALL (W.R.), CHEN (S.) et SIRBULY (D.J.). – *3D optical printing of piezoelectric nanoparticle-polymer composite materials*. ACS Nano, 8, p. 9799-9806 (2014).
- [150] DUFAUD (O.), MARCHAL (P.) et CORBEL (S.). – *Rheological properties of PZT suspensions for stereo-lithography*. Journal of the European Ceramic Society, 22, p. 2081-2092 (2002).
- [151] MARTIN (J.J.), FIORE (B.E.) et ERB (R.M.). – *Designing bioinspired composite reinforcement architecture via 3D magnetic printing*.

- Nature Comm., 6, Doi:10.1038/ncomms9641 (2015).
- [152] ANDRÉ (J.C.). – *Emerging breakthroughs in AM : 4D-printing and bio-printing-Promises, Future markets, R, R&D methodologies*. Additive Manufacturing European Forum AMEF2017, Brussels, Belgium, Proceedings 7 pp. (2018).
- [153] ANDRÉ (J.C.). – *From self-organization to 4D (Bio)-Printing – A plea to go beyond exciting proof of concept*. Von Karman Conference, Cologne, Germany (2018).
- [154] LI (S.), STAMPFL (J.), XU (H.), DIAZ (E.), MALKIN (V.), RUS (D.) et WOOD (R.). – *A Vacuum-driven Origami « Magic-ball » Soft Gripper*. IEEE <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/120930> ou <https://3dprintingindustry.com/news/mit-engineers-use-3d-printing-to-build-origami-inspired-object-gripper-151180/> (2019).
- [155] WEEGER (O.), BODDETI (N.), YEUNG (S.K.), KAJIMA (S.) et DUNN (M.L.). – *Digital design and nonlinear simulation for additive manufacturing of soft lattice structures*. Additive Manufacturing, 25, p. 39-49 (2019).
- [156] DING (Z.), WEEGER (O.), QI (H.J.) et DUNN (M.L.). – *4D rods : 3D structures via programmable 1D composite rods*. Materials & Design, 137, p. 256-265 (2018).
- [157] JANBAZ (S.), BOBBERT (F.S.L.), MIRZAALI (M.J.) et ZADPOORA (A.A.). – *Ultra-programmable buckling-driven soft cellular mechanisms*. Material Horizons. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/MH/c9mh00125e#!divAbstract> (2019).
- [158] AHADJIAN (S.), OSTROVIDOV (S.), HOSSEINI (V.), KAJI (H.), RAMALINGAM (M.), BAE (H.) et KHADEMHOSSEINI (A.). – *Electrical stimulation as a biomimicry tool for regulating muscle cell behavior*. Organogenesis, 9, p. 87-92 (2013).
- [159] PALLE (B.N.), WALLIN (T.J.), ZHAO (H.) et SHEPERD (R.F.). – *3D printing antagonistic system of artificial muscle using projection stereo-lithography*. Bio-inspiration, Biomimicry, 10, 055003 (2015).
- [160] WALTERS (P.), ROSSITER (J.) et MCGORAN (J.). – *Smart materials and novel actuators : creative applications in art and design*. [http://www.uwe.ac.uk/sca/research/cfpr/research/3D/research\\_projects/smart\\_materials\\_novel\\_actuators.html](http://www.uwe.ac.uk/sca/research/cfpr/research/3D/research_projects/smart_materials_novel_actuators.html) (2010).
- [161] HWANG (Y.), PAYDAR (O.H.) et CANDLER (R.N.). – *Pneumatic micro-finger with balloon fins for linear motion using 3D printed molds*. Sensors & Actuators, 234, p. 65-71 (2015).
- [162] JEONG (H.Y.), AN (S.C.), SEO (I.C.), LEE (E.), HA (S.), KIM (N.) et JUN (Y.C.). – *3D printing of twisting and rotational bistable structures with tuning elements*. Scientific Reports volume 9, Article number : p. 324 <https://www.nature.com/articles/s41598-018-36936-6> (2019).
- [163] LI (Q.), SCHENNING (A.P.H.J.) et BUNNING (T.J.). – *Light-Responsive Smart Soft Matter Technologies*. Adv. Opt. Materials, 7, 1901160 (2019).
- [164] LAU (H.F.). – *3D-Printed Inflatable Actuators – Design and Development of Soft Actuators for a Pneumatically-Actuated Soft Robotic Arm*. <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/357220> (2019).
- [165] ZOLFAGHARIAN (A.), KAYNAK (A.) et KOUZANI (A.). – *Closed-loop 4D-printed soft robots*. Materials and Design, 188, 108411 (2020).
- [166] TANG (Y.), CHI (Y.), SUN (J.), HUANG (T.H.), MAGHSOUDI (O.H.), SPENCE (A.), ZHAO (J.), SU (H.) et YIN (J.). – *Leveraging elastic instabilities for amplified performance : Spine-inspired high-speed and high-force soft robots*. Science Advances, 6, eaaz6912 – DOI:10.1126/sciadv.aaz6912 <https://advances.sciencemag.org/content/6/19/eaaz6912> (2020).
- [167] PALAGI (S.), MARK (A.G.), REIGH (S.Y.), MELDE (K.), QIU (T.), ZENG (H.), PARMEGGIANI (C.), MARTELLA (D.), SANCHEZ-CASTILLO (A.), KAPERNAUM (N.), GIESSELMANN (F.), WIERSMA (D.S.), LAUGA (E.) et FISCHER (P.). – *Structured light enables biomimetic swimming and versatile locomotion of photo-responsive soft micro-robots*. Nature materials, 15, p. 647 (2016).
- [168] HU (W.), LUM (G.Z.), MASTRANGELI (M.) et SITTI (M.). – *Small-scale soft-bodied robot with multimodal locomotion*. Nature, 554, p. 81-85 (2018).
- [169] REN (Z.), HU (W.), DONG (X.) et SITTI (M.). – *Multi-functional soft-bodied jellyfish-like swimming*. Nature communications, 10, p. 1-12 (2019).
- [170] DANZO (A.) et ANDRÉ (J.C.). – *Que peut apporter une modélisation mathématique à la maîtrise du bio-printing ?* Entropie, 1 <http://openscience.fr/Que-peut-apporter-une-modélisation-mathématique-a-la-maitrise-du-bio-printing> (2020).
- [171] LOUMÉ (L.). – *Bientôt l'impression d'un cœur en 3D ?* <http://www.sciencesetavenir.fr/sante/cœur-et-cervier/20151028.OBS8505/videe-bientot-l-impression-d-un-c-ur-en-3d.html> (2015).
- [172] PRIMANTE 3D. – *À la découverte de la bio-impression : 2 experts français répondent sur ses avancées réelles*. <http://www.primante3d.com/bioprinting-21042020/> (2020).
- [173] ESSOP (A.). – *Researchers develop handheld 3D bioprinter for treating large skin burns*. <https://3dprintingindustry.com/news/researchers-develop-handheld-3d-bioprinter-for-treating-large-skin-burns-168452/> (2020).
- [174] GUÉDON (E.), MALAQUIN (L.) et ANDRÉ (J.C.). – *Bio-printing – État des lieux et perspectives*. Techniques de l'Ingénieur, ref. [RE 268] (2017).
- [175] SHAPIRA (A.), KIM (D.H.) et DVIR (T.). – *Advanced micro- and nano-fabrication technology for tissue engineering*. Biofabrication, 6, DOI:10.1088/1758-5082/6/2/020301 (2014).
- [176] KUCUKGUL (C.), OZLER (S.B.), KARAKAS (H.E.), GOZUACIK (D.) et KOC (B.). – *3D hybrid bio-printing of nanovascular structures*. Procedia Eng., 59, p. 183-192 (2013).
- [177] KUCUKGUL (C.), OZLER (S.B.), INCI (I.), KARAKAS (H.E.), IRMAK (S.), GOZUACIK (D.), TARALP (A.) et KOC (B.). – *3D bioprinting of biomimetic aortic vascular constructs with self-supporting cells*. Biotech. & Bioeng., 112, p. 811-821 (2015).
- [178] CHANDLER (D.L.). – *Tough bio-gel structures produced by 3D printing*. <https://newsoffice.mit.edu/2015/3-d-printing-tough-biogel-0601> (2015).
- [179] 3D PRINTING BUZZ. – *Archives for the category bio-printing organs/human tissue cells*. [http://textually.org/3DPrinting/cat\\_printable\\_organs.html](http://textually.org/3DPrinting/cat_printable_organs.html) (2015).
- [180] GILPIN (L.). – *New 3D bioprinter to reproduce human organs changes the face of healthcare : the inside society*. <http://www.techrepublic.com/article/new-3d-bioprinter-to-reproduce-human-organs/> (2015).
- [181] ARMSTRONG-SMITH (I.) et GALLAGHER (R.). – *Thinking about printing in the 4<sup>th</sup> dimension*. <https://studylib.net/doc/6866363/the-importance-of-developing-autonomous-self> (2014).
- [182] CHUA (C.K.) et YEONG (N.Y.). – *Bio-printing : principles and applications*. e-book et World Scientific Ed., Singapour <http://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/9193#t=oc> (2015).
- [183] LAVERGNE (B. & M.). – *L'imprimante 3D : une révolution en marche*. Favre Ed., Paris (2014).
- [184] GAO (G.), KIM (H.), KIM (B.S.), KONG (J.S.), LEE (J.Y.), PARK (B.W.), CHAE (S.), KIM (J.), BAN (K.), JANG (J.), PARK (H.J.) et CHO (D.W.). – *Tissue-engineering of vascular grafts containing endothelium and smooth-muscle using triple-coaxial cell printing*. Applied Physics Reviews, 6, 041402 <https://doi.org/10.1063/1.5099306> (2019).
- [185] LISTEK (V.). – *The Year in Review : Bioprinting in 2019*. <https://3dprint.com/261238/the-year-in-review-bioprinting-in-2019/> (2019).
- [186] LUO (G.), YU (Y.), YUAN (Y.), CHEN (X.), LIU (Z.) et KONG (T.). – *Freeform, Reconfigurable Embedded Printing of All-Aqueous 3D Architectures*. Advanced Materials, 31, 1904631 (2019).
- [187] BRUNO (R.D.), REID (J.) et SACHS (P.C.). – *The revolution will be open-source : how 3D bioprinting can change 3D cell culture*. Oncotarget, 10, p. 4724-4726 (2019).
- [188] SKYLAR-SCOTT (M.A.), UZELL (S.G.M.), NAM (L.L.), AHRENS (J.H.), TRUBY (R.L.), DAMARAJU (S.) et LEWIS (J.A.). – *Bio-manufacturing of organ-specific tissues with high cellular density and embedded vascular channels*. Science Advances, 5, eaaw2459 (2019).
- [189] HE (Y.), DERAKHSHANFAR (S.), ZHONG (W.), LI (B.), LU (F.), XING (M.) et LI (X.). – *Characterization and Application of Carboxymethyl Chitosan-Based Bioink in Cartilage Tissue Engineering*. Journal of Nanomaterials, 2020, ID 2057097 <https://www.hindawi.com/journals/jnm/2020/2057097/> (2020).
- [190] KARABAY (U.), HUSEMOGLU (R.B.), EĞRILMEZ (M.Y.) et HAVITCIOGLU (H.). – *3D Printed Polylactic Acid Scaffold for Dermal Tissue Engineering Application : The Fibroblast Proliferation in vitro*. Journal of Medical Innovation and Technology, 1, p. 51-56 <http://jomit.org/index.php/js/article/view/32/11> (2020).

- [191] RANGA (A.), GJOREVSKI (N.) et LUTOLF (M.P.). – *Drug discovery through stem cell-based organoid models*. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 69-70, p. 19-28 (2014).
- [192] DROST (J.) et CLEVERS (H.). – *Organoids in cancer research*. *Nature Reviews Cancer*, 18, p. 407-418 (2018).
- [193] KING (S.M.), HIGGINS (J.W.), NINO (C.R.), SMITH (T.R.), PAFFENROTH (E.H.), FAIRBAIRN (C.E.), DOCUYANAN (A.), SHAH (V.D.), CHEN (A.E.), PRESNELL (S.C.) et NGUYEN (D.G.). – *3D Proximal Tubule Tissues Recapitulate Key Aspects of Renal Physiology to Enable Nephrotoxicity Testing*. *Front. Physiol.*, | doi:10.3389/fphys.2017.00123 (2017).
- [194] RAYNAL (J.). – *Bio-impression – Des machines à tisser le vivant*. *Industrie et Technologies*, p. 38-40. [https://www.ibcp.fr/lbti/sites/lbti/IMG/pdf/Magazine\\_Industrie\\_et\\_Technologies.pdf](https://www.ibcp.fr/lbti/sites/lbti/IMG/pdf/Magazine_Industrie_et_Technologies.pdf) (2015).
- [195] KNOWLTON (S.), ONAL (S.), YU (C.H.), ZHAO (J.J.) et TASOGLU (S.). – *Bioprinting for cancer research*. *Trends in Biotechnology*, 33, p. 504-513 (2015).
- [196] SANTORO (M.), LAMHAMED-CHERRADI (S.E.), MENEGAZ (B.A.), LUDWIG (J.A.) et MIKOS (A.G.). – *Flow perfusion effects on three-dimensional culture and drug sensitivity of Ewing sarcoma*. *Proceeding of the National Academy of Science*, 112, p. 10304-10309 (2015).
- [197] CHARBE (N.), McCARRON (P.A.) et TAMBUIWALA (M.M.). – *Three-dimensional bio-printing : A new frontier in oncology research*. *World Journal of Clinical Oncology*, ESPS Manuscript NO : 29964 ; *World Journal of Clinical Oncology*, 8, p. 21-36 (2017).
- [198] OZBOLAT (I.T.), PENG (W.) et OZBOLAT (V.). – *Application areas of 3D bioprinting*. *Drug Discovery Today*, 21, p. 1257-1271 (2016).
- [199] MARTI-FIGUEROA (C.R.) et ASHTON (R.S.). – *The case for applying tissue engineering methodologies to instruct human organoid morphogenesis*. *Acta Biomaterialia*, 54, p. 35-44 (2017).
- [200] JIAN (H.), WANG (M.), WANG (S.), WANG (A.) et BAI (S.). – *3D bioprinting for cell culture and tissue fabrication*. *Bio-Design and Manufacturing*, 1, p. 45-61 (2018).
- [201] MOLICA (P.A.), BOOTH-CREECH (E.N.), REID (J.A.), ZAMPONI (M.), SULLIVAN (S.M.), PALMER (X.L.), SACHS (P.C.) et BRUNO (R.D.). – *3D bioprinted mammary organoids and tumors in human mammary derived ECM hydrogels*. *Acta Biomaterialia*, 95, p. 201-213 (2019).
- [202] ASGHAR (W.), EL ASSAL (R.), SHAFIEE (H.), PITTERI (S.), PAULMURUGAN (R.) et DEMIRCI (U.). – *Engineering cancer microenvironments for in vitro 3-D tumor models*. *Materialstoday*, 18, p. 539-553 (2015).
- [203] ANDRÉ (J.C.). – *Engagement solidaire et déconfinement*. <https://www.jle.com/fr/covid19-engagement-solidaire-deconfinement> (2020).
- [204] RODRÍGUEZ-ESPÍNDOLA (O.) et BELTAGUI (A.). – *Can 3D Printing address operations challenges in Disaster Management ?*. [https://publications.aston.ac.uk/id/eprint/33651/1/Proceedings\\_Euroma\\_2018.pdf](https://publications.aston.ac.uk/id/eprint/33651/1/Proceedings_Euroma_2018.pdf) (2018).
- [205] PONSOT (J.F.) et MARIE (J.). – *Relance économique : sommes-nous vraiment tous devenus keynésiens ?* [https://theconversation.com/relance-economique-sommes-nous-vraiment-tous-devenus-keynesiens-140097?utm\\_medium=email&utm\\_campaign=La%20lettre%20de%20The%20Conversation%20France%20du%209%20juin%202020%20-%201645915828&utm\\_content=La%20lettre%20de%20The%20Conversation%20France%20du%209%20juin%202020%20-%201645915828+CID\\_5f5f95052052eca3c9701-ba85e2f1012&utm\\_source=campaign\\_monitor\\_fr&utm\\_term=Relance%20economique%20-%20sommes-nous%20vraiment%20tous%20devenus%20keynesiens](https://theconversation.com/relance-economique-sommes-nous-vraiment-tous-devenus-keynesiens-140097?utm_medium=email&utm_campaign=La%20lettre%20de%20The%20Conversation%20France%20du%209%20juin%202020%20-%201645915828&utm_content=La%20lettre%20de%20The%20Conversation%20France%20du%209%20juin%202020%20-%201645915828+CID_5f5f95052052eca3c9701-ba85e2f1012&utm_source=campaign_monitor_fr&utm_term=Relance%20economique%20-%20sommes-nous%20vraiment%20tous%20devenus%20keynesiens) (2020).
- [206] ESCHENBRENNER (C.) et SCHILDKNECHT (B.). – *Relocalisation, économie distribuée et digital*. <https://www.a3dm-magazine.fr/news/toutes-industries/relocalisation-economie-distribuee-digital> (2020).
- [207] DUMAS (P.). – *La fabrication additive, un atout pour la relocalisation ?* <https://www.a3dm-magazine.fr/news/toutes-industries/fabrication-additive-un-atout-relocalisation> (2020).
- [208] MOREAU (F.). – *Produire au bon endroit avec la fabrication additive*. <https://www.a3dm-magazine.fr/news/toutes-industries/produire-endroit-fabrication-additive> (2020).
- [209] IDE – Institut de l'Entreprise. – *L'impact de la crise du Covid-19 sur le travail : première analyse*. <https://www.institut-entreprise.fr/limpact-de-la-crise-du-covid-19-sur-le-travail-premiere-analyse> (2020).
- [210] WORMS (F.). – *Vers de nouvelles humanités*. [https://theconversation.com/vers-de-nouvelles-humanites-129203?utm\\_medium=email&utm\\_campaign=La%20lettre%20de%20week-end%20de%20The%20Conversation%20France%20-%20201630615664&utm\\_content=La%20lettre%20de%20week-end%20de%20The%20Conversation%20France%20-%20201630615664+CID\\_aacc8c2472e783dfa4f3fcb06c3109e&utm\\_source=campaign\\_monitor\\_fr&utm\\_term=Vers%20de%20nouvelles%20humanites](https://theconversation.com/vers-de-nouvelles-humanites-129203?utm_medium=email&utm_campaign=La%20lettre%20de%20week-end%20de%20The%20Conversation%20France%20-%20201630615664&utm_content=La%20lettre%20de%20week-end%20de%20The%20Conversation%20France%20-%20201630615664+CID_aacc8c2472e783dfa4f3fcb06c3109e&utm_source=campaign_monitor_fr&utm_term=Vers%20de%20nouvelles%20humanites) (2020).
- [211] ALLIBERT (P.). – *La confiance l'emportera*. <https://www.institut-entreprise.fr/la-confiance-l'emportera> (2020).
- [212] 3D NATIVES. – *Réinventer la production : bilan et perspectives de la fabrication additive face à la crise*. <https://www.youtube.com/watch?v=7jyEVEiUdUc> (2020).
- [213] KUSIAK (A.). – *Smart manufacturing*. *International Journal of Production Research*, 56, p. 508-517 <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1351644> (2018).

## À lire également dans nos bases

### Principes et enjeux

*Fabrication additive – Principes généraux*. [BM 7 017].

*Créativité et fabrication additive – Infographie*. [IBM 7 017].

*Fabrication additive ; révolution ou simple évolution sociétale ?* [AG 115].

*L'impression 3D dans une perspective de développement durable*. [AG 6 753].

*L'impression 3D et développement durable – Infographie*. [IAG 6 753].

*Propriété intellectuelle et enjeux réglementaires de l'impression 3D*. [BM 7 980].

### Procédés de fabrication additive

*Fabrication additive en aéronautique et en spatial*. [BM 7 940].

*Fabrication additive : contrôles*. [BM 7 950].

*Fusion laser sélective de lit de poudres métalliques*. [BM 7 900].

*Numérisation 3D et prototypage rapide – Exemples d'industrialisation de produits*. [AG 3 404].

*Stérolithographie par photopolymérisation*. [BM 7 910].

### Procédés par familles de matériaux

*Élaboration de pièces céramiques par fabrication additive*. [N 4 807].

*Microstérolithographie de pièces céramiques complexes*. [RE 13].

*Panorama des technologies de fabrication additive utilisant la silicone*. [BM 7 925].

### Matériaux et poudres

*Caractérisation et analyse des poudres – Propriétés physiques des solides divisés*. [J 2 251].

*Caractérisation et analyse des poudres – Propriétés comportementales des solides divisés*. [J 2 252].

*Fabrication de poudres métalliques par la méthode PREP*. [IN 221].

*Frittage : aspects physico-chimiques – Partie 1 : frittage en phase solide*. [AF 6 620].

*Frittage : aspects physico-chimiques – Partie 2 : frittage en phase liquide*. [AF 6 621].



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



RÉDIGÉE ET VALIDÉE  
PAR DES EXPERTS




MISE À JOUR  
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE  
SUR TOUS SUPPORTS  
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS  
DANS CHAQUE OFFRE

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

## SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



### Questions aux experts\*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



### Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



### Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



### Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



### Info parution

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

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

## Les offres Techniques de l'Ingénieur



### INNOVATION

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



### MATÉRIAUX

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



### MÉCANIQUE

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



### ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ

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



### ÉNERGIES

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



### GÉNIE INDUSTRIEL

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



### ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE

- Electronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique



### TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

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



### AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique



### INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

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



### MESURES – ANALYSES

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



### PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

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



### SCIENCES FONDAMENTALES

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



### BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques



### CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

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