



Date de publication :
10 juillet 2022

Fabrication additive : Révolution ou simple évolution sociétale ?

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

par **Jean-Claude ANDRÉ**

Mots-clés

fabrication additive | impact
social | économie collaborative
| innovation sociale

Résumé L'industrie 4.0 vise la numérisation de l'usine. Mais aussi les nouvelles pratiques des « makers » s'inventent avec des formes de « débrouille » économique. Ils agissent avec des machines 3D de faible coût et exploitent les logiciels libres : alors, chacun avec un bon design peut utiliser des données numériques pour réaliser un objet. Ils s'appuient sur des principes d'économie ouverte qui reposent sur des contributeurs ne cherchant pas en premier lieu un profit immédiat et participent, souvent via des Fab-Labs, à l'attractivité des technologies 3D. On montre pourquoi et comment l'impression 3D favorise ce mouvement de cyberculture, avec des liens scientifiques, technologiques et commerciaux, possiblement conflictuels, avec les milieux plus traditionnels de la fabrication additive.

Keywords

additive manufacturing | Social
Impact | Collaborative
Economy | Social innovation

Abstract The 4.0 industry aims the digitization of the factory. But, new “makers” practices are being invented with forms of resourceful economy. They act with low cost 3D machines and operate with free software: then, each maker, with an adapted design can use numerical data for the realization of an object. They are exploiting open economy principles which are based on contributors who are not searching an immediate financial profit and they contribute, often through Fab-Labs, to the attractive development of the 3D technologies. This paper show why and how the 3D printing promotes this cyber-cultural movement with scientific, technologic and commercial links with the 3D traditional bodies, sometime with possible conflicts.

Pour toute question :

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

Par mail :

infos.clients@teching.com

Par téléphone :

00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **03/11/2024**

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

Fabrication additive : Révolution ou simple évolution sociétale ?

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

1. Technologie 3D et fabrication additive	AG 115v2 – 2
1.1 En quoi les technologies 3D changent (ou peuvent changer) la société ?	— 2
1.2 Industrie 4.0	— 3
1.3 Des faits concernant la fabrication additive	— 5
2. Impacts des technologies 3D sur la société	— 6
2.1 Le mouvement « maker »	— 7
2.1.1 Généralités	— 7
2.1.2 Le phénomène « maker »	— 8
2.2 Les « FabLab »	— 10
2.2.1 Un état des lieux des FabLab	— 11
2.2.2 Cohabitation makers/industriels	— 12
3. Les citoyens et les utilisateurs « 3D »	— 14
3.1 Soutien à la créativité	— 15
3.2 Vers un e-Artisanat	— 16
3.3 Renforcement de l'attractivité : du désirable à l'instrumentalisation	— 16
3.4 Détournements : crypto-fabrication 3D	— 17
4. Les industriels	— 17
4.1 Des lenteurs compréhensibles	— 17
4.2 Stratégies d'attente et ouvertures	— 18
4.3 La fabrication (pièces uniques ou production de masse)	— 19
4.3.1 L'innovation technique	— 19
4.3.2 L'innovation organisationnelle	— 20
4.3.3 L'emploi salarié	— 20
4.4 Propriété intellectuelle	— 21
4.5 Normes et démarche qualité	— 21
5. Fabrication additive et Covid-19	— 22
6. Conclusion	— 24
7. Glossaire	— 24
Pour en savoir plus	Doc. AG 115v2

Après la machine à vapeur, l'électricité et l'automatisation, la « robolution » est une révolution industrielle incluant la fabrication additive. En travaillant dans un monde digital et virtuel, il est possible de tenter de refaire le chemin inverse par impression 3D et de revenir à la matière réelle (par opposition à virtuelle). Le concept centralisateur d'Industrie 4.0 correspond à une nouvelle façon d'organiser les moyens de production : l'objectif est la mise en place d'usines dites « intelligentes » (smart factories) plus flexibles, disposant, grâce au numérique, d'une plus grande adaptabilité dans la production et d'une allocation plus efficace des ressources.

Elle se caractérise par une interconnexion des machines et des systèmes au sein des sites de production, mais aussi entre eux et l'extérieur (clients, partenaires, autres sites de production). À travers le recours à l'internet des objets, aux systèmes cyber-physiques et à la fabrication additive, c'est-à-dire aux réseaux virtuels servant à contrôler des objets physiques, cette nouvelle façon de produire se caractérise par une communication continue et instantanée entre les différents outils et postes de travail intégrés dans les chaînes de production et d'approvisionnement.

Dans le même temps, des amateurs qui se définissent comme des « makers » agissent avec des machines 3D de faible coût et exploitent les logiciels libres : alors chacun, avec un bon design, peut utiliser des données numériques pour se former, pour réaliser/créer un objet. Ils s'appuient sur des principes d'économie ouverte qui reposent sur des contributeurs ne cherchant pas en premier lieu un profit immédiat et participent, souvent via des FabLab, à l'information du public et à l'attractivité des technologies 3D.

L'impression 3D favorise ainsi ce mouvement de cyberculture avec des évolutions sociales diverses, tout en développant des liens scientifiques, technologiques, commerciaux et sociaux, possiblement conflictuels et complices, avec les milieux socio-économiques plus traditionnels de la fabrication. Ainsi, la fabrication additive ne se limite pas à l'entreprise, elle dispose de champs d'usage et d'utilisateurs beaucoup plus vastes. Ce cadre étant rappelé, il est intéressant de chercher à savoir pourquoi on en est arrivé là... c'est tout l'enjeu de cet article.

1. Technologie 3D et fabrication additive

1.1 En quoi les technologies 3D changent (ou peuvent changer) la société ?

L'impression 3D ou « fabrication additive » recouvre en réalité toute une série de procédés qui ont en commun de fabriquer des objets par dépôt de couches successives extrêmement fines de matière [ou plus simplement d'ajouts comme des fils fondus], lesquelles sont solidifiées au fur et à mesure par une source d'énergie (laser, par exemple) [...]. Elle est définie par l'AFNOR [1] comme « l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique ». Or, « Si nous ne savons pas exactement quels seront les métiers dont nous aurons besoin en 2025, nous savons dès à présent qu'un certain nombre de compétences seront critiques, comme celles liées au digital, à l'intelligence artificielle, à la fabrication additive, à l'ingénierie système ou encore aux jumeaux numériques »... [2] La répartition des tâches dans le cadre de la fabrication va subir de plus en plus les effets de la digitalisation, avec des suppressions de postes devenus inadaptés, mais aussi de nouveaux emplois ; mais quels seront-ils ?

Selon Mayo *et al.* [3], Sardar [4] aurait fait valoir que nous vivons dans une période post-normale dans laquelle les distinctions conventionnelles et stabilisées entre les faits, les valeurs et la politique n'ont plus cours. Mayo [5] considère que l'incertitude des temps présents, accélérée par la crise de la Covid-19, se traduit par une incapacité de l'humanité à aller au-delà d'une normalité fabriquée qui perpétuerait un sens familier du présent avec une certaine paralysie associée à des incompréhensions réciproques amenant un blocage de nos relations sociales et culturelles [6]. « Notre

désir de stabilité et de certitude, de désaccentuer le changement et de rendre toutes les choses normales, perpétue une crise culturelle, qui elle-même nourrit l'ignorance et favorise l'incertitude : les caractéristiques distinctives de la condition post-normale. » [5] La stabilisation recherchée nécessite de l'imagination et de la créativité, ainsi qu'une prise de conscience de la complexité des interdépendances et des réseaux au sein desquels nous fonctionnons [7] [8]. Même dans les entreprises, la croissance de l'implantation de la fabrication additive a baissé... Pour autant, les formations nécessaires à ce déploiement n'ont été que très faiblement engagées... Le cadre d'apprentissage par anticipation est relativement absent. Mais pour McKinsey [9], « L'engagement numérique s'est énormément accéléré, et les grandes entreprises ont rapidement innové pour remplacer ou compléter les expériences traditionnelles [...]. Par nécessité ou commodité, les entreprises ont créé de nombreuses nouvelles offres. En effet, 80 % des entreprises estiment que leur modèle de base doit être numérisé pour rester économiquement viable » [10] [11].

Il n'empêche que l'impression 3D est considérée depuis plusieurs années comme l'une des technologies liées au numérique susceptible de transformer profondément [...] les modes de production et, par conséquent, les modèles économiques actuels [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32]...

Il s'agit, au sens de Star et Griesemer [33], d'un nouvel « objet-frontière » intégré depuis peu dans la mémoire du public, que l'on parle d'impression 3D, de photocopie 3D, de 3D printing ou de fabrication additive... « Suffisamment plastique pour s'adapter aux besoins locaux et aux contraintes des divers groupes qui l'utilisent, tout en étant suffisamment robuste pour maintenir une identité commune d'un site à l'autre. » L'Institut Gartner avait placé, pour l'année 2016, la fabrication additive dans les dix priorités stratégiques pour les pays développés [34] ; pour autant depuis cette date, d'autres priorités sont apparues [35]. Les innovations dans le domaine permettent des développements industriels dans le

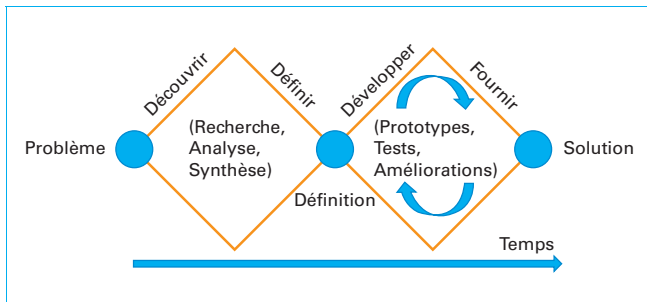


Figure 1 – Relation « problème/solution » en innovation [39]

spatial, la mécanique, les transports, l'énergie, les matériels militaires et la médecine. Selon cet auteur, une augmentation de plus de 60 % par an pour les entreprises était attendue jusqu'en 2019, avec un marché annuel actuel de l'ordre de 10 à 30 milliards €/an.

Selon la vision classique de la créativité fondée par Guilford [36] [37] qui la définissait de la manière suivante comme « la complexité et la capacité à générer des idées nouvelles » (Guilford cité par Capron Puozzo [38]) sur le principe dichotomique divergence/convergence, la démarche créative commence par la reconnaissance ou la fabrication d'un problème. À partir de là, un processus de divergence s'engage, et finalement se termine, par convergence, dans une nouvelle solution du problème (quand elle existe). La figure 1 issue de Mathias [39] présente une méthode de design rapide dite « de double diamant » qui utilise ces modes de divergence et de convergence entre entrée et sortie.

Les quatre phases de ce processus de conception fournissent une intention et une direction aux activités décrites. Elles peuvent être appliquées par tout designer, comme des makers des FabLab dont il sera fait mention plus loin.

1/ Découverte (divergent) : La tâche est clarifiée dans cette phase par l'exploration de l'espace du problème et l'identification de toutes les exigences de conception possibles.

2/ Définition (convergent) : Une spécification de conception est synthétisée à partir de l'établissement des problèmes essentiels et des exigences en une liste de spécifications basées sur la performance.

3/ Développement (divergent) : Les solutions possibles pour répondre à la spécification de performance sont évaluées, itérées et combinées pour développer une conception plus complète.

4/ Livrables (convergent) : La conception choisie est consolidée dans une spécification finale détaillant le fonctionnement et la fabrication, à réaliser ou à communiquer à d'autres.

Où se situe alors ce nouveau terme à la mode : la **disruption** ? C'est la faculté que possèdent les créatifs de rapprocher des mondes apparemment distincts, de trouver du lien là où il n'en existait pas auparavant, d'aller voir ce qui se passe en dehors d'une discipline scientifique, d'un métier ou d'une spécialisation, d'être ouvert à tout, sans tabous. C'est une pensée de l'aventure. Elle invite à affronter la nouveauté et l'imprévu. Cette relation de transformation, faite de bricolage, d'adaptation aux circonstances et à l'imprévu, d'oubli des modèles préétablis et d'ingéniosité oblige, quoi qu'il en soit, à inventer un mode de transmission spécifique, qui n'est pas de l'ordre de l'enseignement d'un savoir abstrait. C'est un domaine où la fabrication additive prend toute sa place.

Ce qui était essentiel – et cela reste vrai actuellement – c'était de conquérir la matière et surtout sa mise en forme avec des intensifications sur des prolongements d'idées nouvelles et des tensions dans la compétition, alors qu'aujourd'hui les technologies 3D font partie des éléments acceptés du développement économique avec de moins en moins de ruptures et de plus en plus d'innovations incrémentales parce que la complexité est « gratuite » [40]. Si les tendances incrémentales de grande ampleur sont généralement du ressort des stratégies et des prévisionnistes traditionnels, avec

la fabrication additive, il s'agit selon WEF [41] de « *tendances exponentielles qui commencent subtilement, parfois même de manière imperceptible, mais se renforcent à plusieurs reprises pour se matérialiser et finalement, changer la donne* »... Les futurs ne peuvent pas être imaginés dans un sens étroit et classique, mais peuvent (doivent) s'appuyer sur les différentes pratiques actuelles permises par les machines 3D (approche culturelle). En élargissant cette perspective, Groves [42] a soutenu que l'anticipation est rendue possible et distribuée par des assemblages anticipatifs qui enchevêtrent les idées, les corps, les matériaux, les technologies, les environnements et les organisations et façonnent des styles particuliers d'anticipation. Il soutient ainsi que l'anticipation et le « bricolage savant » sont pratiqués de différentes manières et dépendent d'éléments et de processus non normalisés qui s'entremêlent avec ces pratiques.

La figure 2 présente une situation classique en innovation à chaque fois qu'un procédé ne fait plus de progrès suffisants : le procédé nouveau (figure de gauche) est considéré comme intéressant mais, pour des raisons classiques liées à la faiblesse pratique de la nouveauté, sa performance n'atteint pas celle du procédé qu'il doit remplacer (en partie). Il s'implante donc lentement parce les industriels sont en attente de solutions plus robustes. En revanche, avec l'impression 3D, l'attractivité a été immédiate dès 1984, date des premiers brevets sur ce thème, parce que la technologie pouvait remplacer des méthodes plus traditionnelles et plus fastidieuses de production (formes complexes, réduction du nombre d'intermédiaires entre la conception et la fabrication, relative simplicité de création d'objets, etc. [40]). En associant matière imprimable, procédé de fabrication et numérisation, la fabrication additive change en partie la nature des métiers de la fabrication. Elle est considérée par Gartner et Fink [43] comme une technologie disruptive.

1.2 Industrie 4.0

« *Lors de la première révolution industrielle, l'eau, [le charbon] et la vapeur ont permis de mécaniser la production. La seconde révolution industrielle a exploité l'énergie électrique pour créer la production de masse. La troisième révolution industrielle s'est appuyée sur l'électronique et les technologies de l'information pour automatiser la production. La quatrième révolution industrielle (dite 4.0.) en est issue : c'est la révolution numérique, née au milieu du siècle dernier. Elle se caractérise par une fusion des technologies qui gomme les frontières entre les sphères physique, numérique et biologique* » [44] [45] [46] [47] [48]. L'Industrie 4.0 s'inscrit dans une logique irréversible d'exploitation de réseaux numériques, réelle fuite en avant, anxiogène pour certains, addictive pour d'autres, parce qu'elle perturbe les notions de savoir-faire, de secret, de compétences, de savoir-vivre, de modes d'échanges entre les humains et avec les machines, en forçant une adaptation imposée de l'extérieur. L'Homme est classiquement formé par une culture issue du passé (ne serait-ce que dans la formation technique), les technologies de l'Industrie 4.0 se situent dans le présent et préparent le futur, avec obligatoirement des problèmes de désadaptation.

Dans la pratique, on évoque dans le concept d'Industrie 4.0 les éléments présentés sur la figure 3. Le développement de nouveau contexte implique, *a minima*, des échanges profonds entre les différents professionnels qui travaillent dans l'électronique, l'ingénierie informatique, la mécanique, les procédés et les autres technologies de l'information, dont fait partie l'intelligence artificielle en plein redéveloppement [49].

La fabrication additive, en association avec d'autres thématiques, intègre donc un contexte plus global ayant des effets probables, possiblement plus diffus, sur la société au travail. Pour autant, les effets de cette évolution sont pour le présent plus liés au numérique qu'aux technologies 3D. Cependant, le développement des applications effectives de l'Industrie 4.0 aura certainement des conséquences sociales dans le futur, même si ce thème n'est pas abordé dans cet article [49].

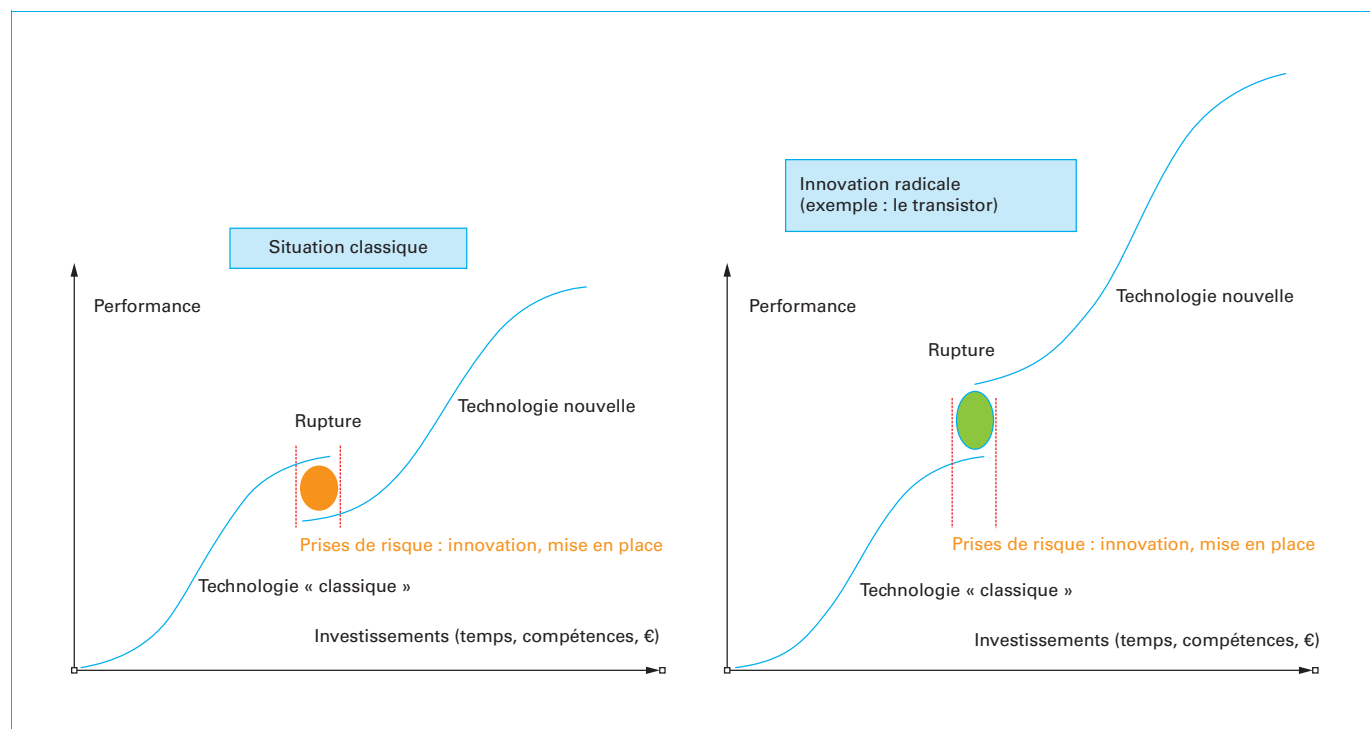


Figure 2 – Ruptures lentes et soudaines en innovation de rupture (ovale rouge : domaine intéressant à performance encore faible ; ovale vert : attractivité immédiate grâce à une performance spécifique)

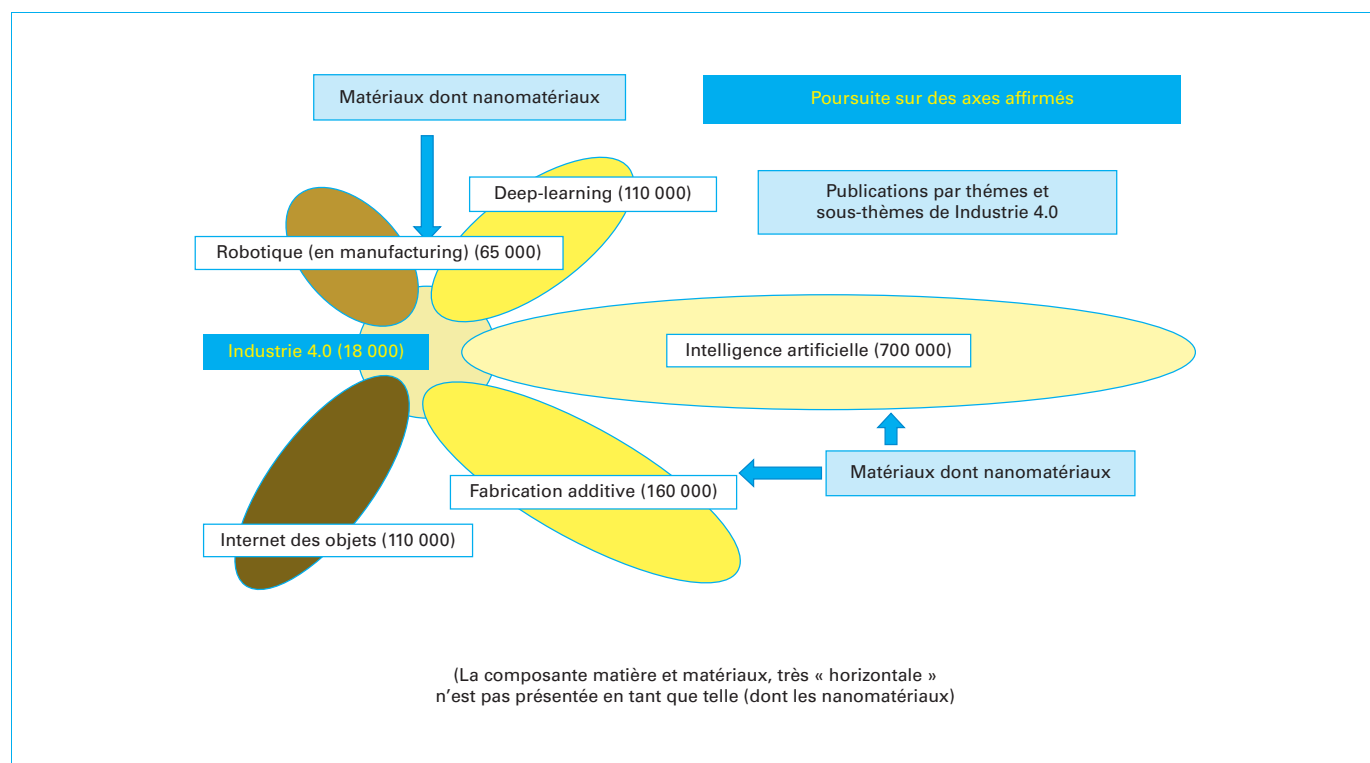


Figure 3 – Éléments caractéristiques de l'Industrie 4.0 (avec le nombre de publications scientifiques selon la BU de l'Université de Lorraine)

1.3 Des faits concernant la fabrication additive

L'US Government Accountability Office (GAO) [50] place la fabrication additive dans l'imaginaire du public comme une technologie qui peut/doit s'inscrire dans les fondements du développement durable, en ce sens qu'il est possible d'éviter des pertes de matière [51] [52] [53] [54] [55] [56]. Cette donnée est d'autant plus vraie qu'une grande partie des matières non utilisées pour la fabrication 3D est en principe recyclable directement, et ceci, quelle que soit la méthodologie 3D utilisée (monomère liquide en stéréolithographie, poudres en fusion ou frittage, etc.). Si cet aspect est non contestable (surtout pour les résines utilisées en stéréolithographie [BM 7 975]), il faut cependant considérer que l'impression 3D rentre dans un processus global associant les technologies de l'information et de la communication (avec les ordinateurs à durée de vie de quelques années qu'il faut produire) et une consommation de produits fonctionnels et d'énergie sous forme électrique.

Une étude bibliographique réalisée à la conjonction de l'analyse de cycle de vie et de la fabrication additive ne permet pas actuellement de donner une information crédible sur les avantages potentiels de la fabrication additive relativement aux procédés traditionnels [BM 7 975]. Il serait intéressant d'examiner le coût d'un transfert de fichier 3D par voie électronique, de la réalisation d'un objet, de sa reprise éventuelle pour rectifier sa forme relativement à une consigne, et sa durée de vie pour prouver le bien-fondé des propos ambiants sur l'aspect « révolutionnaire » des procédés de fabrication additive... Par exemple, selon Flipo, Dobré et Michot [57], une simple recherche sur Google produirait 7 g de CO₂ ; ou encore, on doit gérer 40 millions de tonnes de déchets électroniques par an, avec en ligne de mire des réserves de matières premières en baisse [58]. Seules quelques approches s'engageant dans ce domaine émergent semblent avoir été tentées [59] [60] [61], mais avec des conclusions qui ne permettent pas de conclure sérieusement de l'intérêt environnemental des technologies 3D relativement aux procédés d'usinages traditionnels [BM 7 975]. Cependant, si l'on est capable de produire en local avec une imprimante 3D, même si l'on utilise un fichier issu d'une source située aux antipodes, le gain énergétique peut être très favorable en comparaison d'une fabrication réalisée à la source émettrice...

Néanmoins, l'accès à de nouvelles formes de liberté dans la réalisation d'objets à finalités très variables, et la possibilité de réaliser des pièces infaisables autrement, constituent probablement des atouts majeurs fortement attractifs à prendre en considération dans le développement tous azimuts de la technologie 3D. On sait aujourd'hui que les différentes technologies sont dépendantes les unes des autres, certes à des degrés divers. Gille [62] rappelle cependant qu'elles doivent disposer entre elles d'un minimum de cohérence pour pouvoir se déployer. C'est bien le cas des technologies 3D qui sont, en particulier, un accomplissement matériel du développement sans précédent de l'informatique [63].

Si les procédés de fabrication additive n'ont pas encore trouvé toute leur place dans la production de biens matériels pour différentes raisons techniques (états de surface, multimatériaux, etc.), ils sont maintenant bien connus du public via divers médias, avec des espoirs pour de nombreuses niches applicatives... [BM 7 970]. À noter que la croissance initiale en termes de financements ou de nombre de machines vendues qui était exponentielle devient quasiment linéaire. Il en est de même avec une proportionnalité étonnante pour les publications scientifiques (évolution temporelle du nombre de publications par an sous le critère « fabrication additive ») et l'évolution du marché économique présentées sur les figures 4 à 6. Un élément remarquable : les tendances linéaires pour les trois composantes (publications annuelles, brevets et marché) ont un départ pratiquement simultané, situé entre 2012 et 2014... Il aura donc fallu environ 30 ans pour que la technologie se développe effectivement [66]. Les évolutions, lentes au départ, suivent ensuite une évolution quasi exponentielle avec un ralentissement relatif à ce modèle sur les dernières années (tendance linéaire). Mais le total est impressionnant, avec plus de

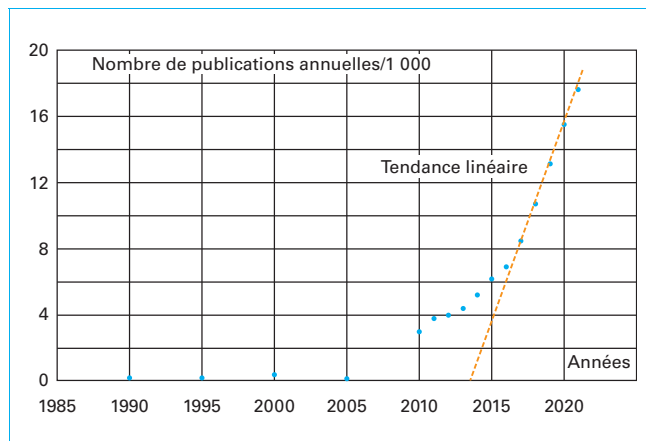


Figure 4 – Évolution temporelle des publications en fabrication additive (courbe définie à partir des données du CNRS)

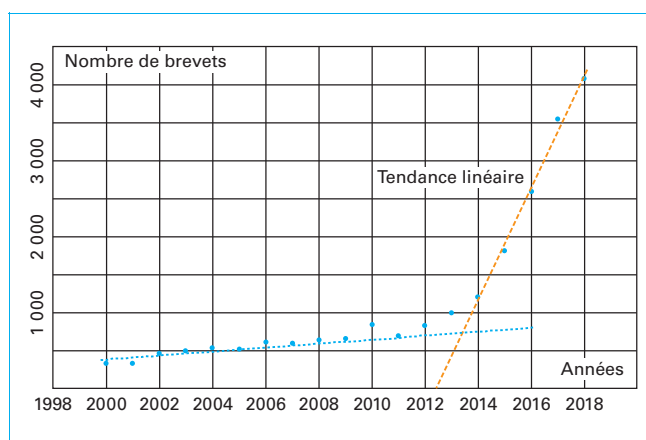


Figure 5 – Évolution temporelle des brevets (selon l'Office européen des brevets cité par Flévet [64])

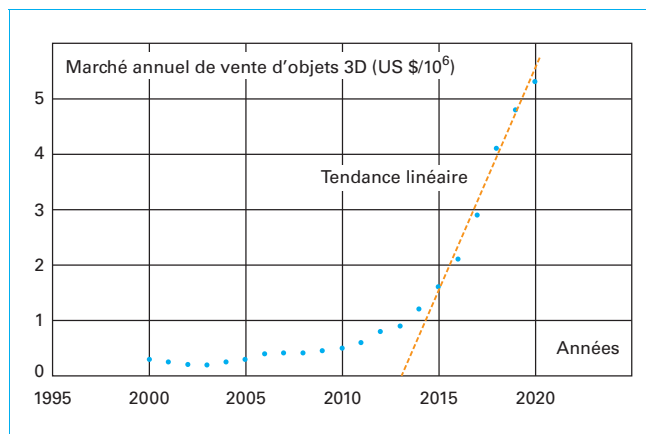


Figure 6 – Évolution temporelle du marché des objets 3D (selon Metal-AM [65])

150 000 publications sur environ 30 ans... et une explosion des soutiens financiers de l'UE à l'intérieur de ses programmes cadres (figure 7 présentée par Esteban-Muniz [67]). Dans le même temps,

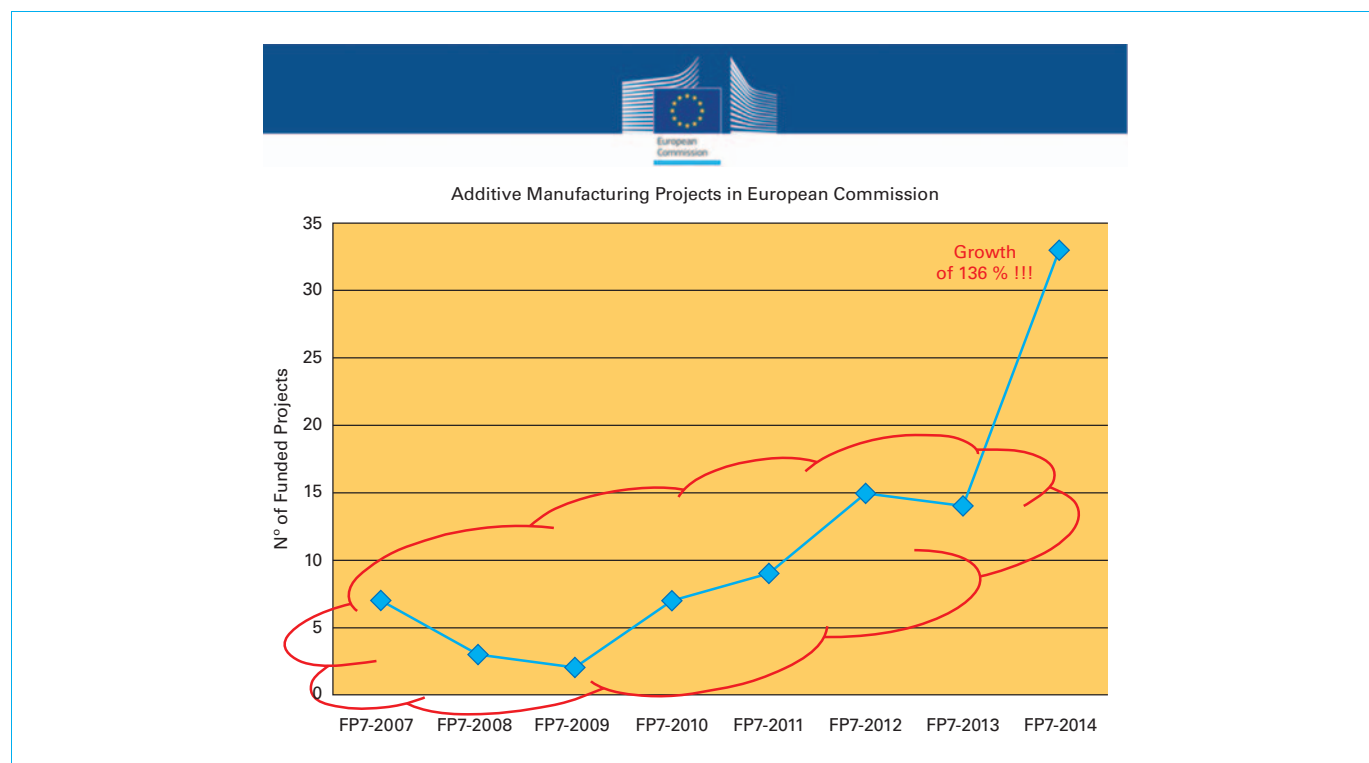


Figure 7 – Augmentation des soutiens de l'EU à la fabrication additive (avec l'aimable autorisation de l'auteur [67])

Le cours des actions de 3D Systems, un des plus importants fabricants de machines 3D, s'est effondré de 90 % environ. Mais, en dépit de ces fortes corrections, les sociétés de l'impression 3D ont présenté des niveaux de capitalisation dignes de la bulle Internet, plus de 60 fois supérieurs à leurs bénéfices. Malgré leur forte croissance, les résultats plus faibles que prévu de ces groupes ont pesé sur le comportement des investisseurs [68]. Aujourd'hui, l'existence d'ETI (entreprises à taille intermédiaire) stabilise le système économique (3D Systems, EOS, Addup, etc.).

Si l'origine de l'impression 3D est 1984, son essor, quel que soit le domaine considéré (figures 4 à 6) démarre, comme signalé, en phase de manière visible et mesurable vers 2013 (recherche, brevets, business) à ± 1 an : il y a conjonction entre recherche académique et essor économique. On est donc très loin du concept émis lors de l'exposition internationale de 1933 et 1934 à Chicago où la devise était « *Science Finds, Industry Applies, Man Conforms* », autrement dit « La science découvre, l'industrie applique, l'Homme suit ». S'il en avait été ainsi, l'industrialisation et l'intégration de la technologie dans la société auraient eu lieu bien après le développement scientifique ; les makers et les FabLab n'auraient pas existé comme promoteurs d'idées.

L'explosion attendue n'a pas (encore ?) eu lieu, mais le domaine se développe toujours avec, en plus, de nouveaux espoirs dans des niches applicatives non envisagées il y a de cela dix ans. Après les balbutiements de 1984 (premiers brevets sur le thème), pratiquement toutes les cibles possibles sont couvertes : prototypage, médecine, pièces fonctionnelles, art, etc. [40] parce que les technologies 3D utilisent de plus en plus, avec la précision requise, la « bonne matière » relativement à une fonctionnalité souhaitée. Il est ainsi possible de réaliser des objets complexes directement utilisables, ou juste pour simplement effectuer des réparations. Certains procédés sont aujourd'hui qualifiés pour des usages en situations difficiles (aéronautique, espace). Il faut cependant relativiser l'importance du phénomène 3D qui ne représente à l'échelle

mondiale qu'un marché de quelques dizaines de milliards €/an alors que, pour la seule France, le marché de la mécanique est en 2020 de 120 milliards [69]. En fait, ce qui est important, c'est l'augmentation à deux chiffres de ce marché, l'existence de machines à très faible coût (quelques centaines d'euros) et surtout la rupture conceptuelle liée à ce nouveau mode de fabrication qui impactent le travail et le comportement du public.

À retenir

- Transfert optimal de la recherche sur l'impression 3D et le secteur aval (et réciproquement) lié à une forte attractivité du domaine ; la complexité est (presque) gratuite...
- Intégration dans le contexte « Industrie 4.0 » renforçant la légitimité des méthodes de fabrication additive.
- Développement important à deux chiffres du domaine fortement soutenu par les milieux socio-économiques.
- Possibilité de réaliser des pièces complexes, précises et en « bonne matière ».
- Impact industriel et économique encore très modeste, mais lisibilité grande.

2. Impacts des technologies 3D sur la société

Les estimations financières du marché de la 3D sont importantes : en 2020 selon Lamour [70] de l'ordre de 20 milliards € ; en 2016 pour Alex [34] de 5 à 15 milliards € ; en 2021 pour Shah *et al.* [71] de 10,5 milliards US\$; en 2020 pour Xerfi [72] de 15 milliards € ; en 2020 selon le cabinet Wohlers cité par Industrie.Mag [73] de

18,5 milliards US\$; et en 2021 pour Industrie.Mag, de 17 milliards [73]... Au fond ces données très approximatives ne correspondent qu'à des sommes pour le monde qui sont très inférieures au pourcent du seul montant de la dette de la France (estimé à 2 100 milliards € par le Journal du Net (JDN) [74], montant qui a largement augmenté avec la pandémie de la Covid-19, ce qui permet de situer le modeste impact actuel de la fabrication additive dans les sociétés développées. Ce qui est important à noter surtout c'est l'image positive de la fabrication additive dans la société et son évolution continue à deux chiffres. Ceci étant signalé, la liberté de créer (même chez soi) d'une part, l'absence de difficultés liées à la complexité des formes des objets d'autre part, font de cette technologie, qui peut être peu coûteuse, un élément nouveau pouvant modifier un certain nombre de caractéristiques sociales tant sur les individus, les groupes sociaux ou les entreprises. Une des forces des dispositifs de fabrication additive, en dehors du champ considérable d'initiatives personnelles autorisées par cette technologie, réside dans le fait que ce qui était coûteux dans les procédés traditionnels (usinage par exemple) devient quasiment gratuit... Selon Anderson [75] [76], les arguments sont les suivants :

- « La variété est gratuite » : grâce à l'informatique, il est possible de réaliser facilement des pièces uniques différentes ou de s'intégrer dans une production de masse.
- « La complexité est gratuite » : c'est l'ensemble des déplacements en 2D qui définit le temps de réalisation d'une pièce dans un procédé à balayage laser, il est encore plus réduit si l'on réalise une irradiation au travers d'un masque ; il l'est encore moins si l'on peut éliminer la mise en place de couches, etc.
- « La flexibilité est gratuite » : grande aptitude de l'informatique à modifier un ou plusieurs paramètres sans que la machine en soit modifiée elle-même.

Ainsi, on est encore bien loin de considérer les technologies de fabrication additive comme une nouvelle forme omniprésente d'opium du peuple, mais une intrusion technologique comme l'imprimante 3D, outil devenu domestique comme tout ordinateur portable aujourd'hui, peut avoir de nombreux effets sur la société et sur ses comportements. En effet, cette innovation technologique prometteuse peut se révéler un instrument de pouvoir, d'autonomie et d'une certaine domination (de ceux qui maîtrisent bien le fonctionnement de la machine 3D et en particulier sa composante logicielle), non anticipée en juillet 1984 lors des tout premiers brevets, parce qu'elle permet de renouveler considérablement les façons de produire, de créer, d'interagir à distance et par suite, de modifier nos modes de vie [77] [78]). En tout premier lieu, il convient de laisser une place éminente aux « makers » qui, avec les « hackers », ont conduit aux FabLab, ce qui a permis (avec les médias) de communiquer positivement sur l'impression 3D, d'aider à sa diffusion et de faciliter un transfert de la technologie vers les citoyens.

Encadré 1 – Hackers

Selon Raymond [79], il existe une communauté disposant d'une culture partagée de programmation et de « sorciers des réseaux » dont l'histoire remonte aux premiers mini-ordinateurs. « *Les hackers résolvent des problèmes, ils construisent, et ils croient en la liberté et en l'assistance mutuelle bénévole.* » Pour agir en hacker, il est indispensable de considérer l'importance des savoirs des autres hackers, ce qui implique de partager l'information, de résoudre les problèmes et de faire connaître les solutions, de façon à ce que d'autres hackers puissent résoudre de nouveaux problèmes. En corollaire, les hackers sont généralement hostiles à la censure, au secret ; ce sont en quelque sorte des « incontrôlables » compétents dans leur domaine. « *Il n'y a pas de chefs, à proprement parler, dans le monde des hackers, mais il a son culte des héros et des anciens de la tribu, ses historiens et ses porte-parole.* » Mais cette image de Robin des Bois et d'épopée numérique associée à besoin, selon Robert [80], d'être relativisée.

2.1 Le mouvement « maker »

2.1.1 Généralités

L'impuissance ressentie de l'État et du politique par rapport à la mondialisation économique et financière, l'affaiblissement du rôle de l'État providence dans un contexte de crises économiques, accentuent et accélèrent des mouvements d'autonomisation de la société civile. De nouvelles pratiques s'inventent avec de nouvelles formes de débrouille économique et sociale [81]. Les modes d'organisation du monde ont profondément changé, passant à des structures plus ou moins autarciques de faible taille, tournées vers elles-mêmes, dans un contexte complexe, à la fois plus ouvert sur le monde *via* internet et plus individualiste, ce qui s'adapte parfaitement bien à la fabrication additive [82] [83]. Soutenue par des « originaux », on peut penser que le conformisme traditionnel, imposant des normes communes, a évolué vers un conformisme à géométrie variable avec des micro-cultures locales s'appuyant sur des relations plus larges (par exemple, penser « global » et agir « local » !).

À l'heure où nous traversons une grande crise économique et sociale avec ses problèmes environnementaux, une pandémie mondiale, où les entreprises sont sommées de produire plus et « mieux », plus propre, plus frugal, avec moins de moyens, dans des sites de production où l'hyperconnectivité prend le pas sur la conversation et l'échange amical, si possible approfondi, certaines organisations s'interrogent sur un renforcement, voire sur un retour de l'inventivité, de la créativité, de la générosité et de la spontanéité dans les relations entre humains [84]. « *Internet remet la collaboration au goût du jour au moment même où l'idéologie de la compétition tous azimuts se révèle pour ce qu'elle a toujours été : une vision tronquée et bornée de la société.* » [85]. Il découle de ce positionnement associé à une « mentalité 2.0 », une recherche récente où la société est censée refléter des tendances plus naturelles et non un ensemble d'entraves et de règles imposées aux citoyens.

Eric Sadin [86] considère que nous vivons un nouveau TINA (*There Is No Alternative*), « *non plus considéré comme un mal nécessaire, mais porté par une fascination considérant cette trajectoire comme étant non seulement vertueuse mais naturellement inscrite dans le cours de l'histoire.* » Le monde des logiciels libres, le piratage constituent des réalités aujourd'hui avérées. D'un point de vue factuel, grâce à la puissance de l'informatique, il est possible de dépasser les cadres traditionnels, administratifs et géographiques, pour réaliser des objets 3D conformes aux souhaits du demandeur, ce qui constitue pour ce dernier une nouvelle forme de liberté. Par ailleurs, la fabrication additive réintègre pour le citoyen de base le numérique dans la sphère de production matérielle (cf. § 1.2). Il s'agit cependant dans les FabLab de savoir « travailler à travers les matériaux » dans un espace qui permet une proximité étroite entre les utilisateurs, les producteurs, les technologies et les matériaux. Le FabLab offre ainsi un « hub hybride » pour tisser des relations entre eux [87], avec parfois des accents de durabilité [88]. « *Si la personne était l'ultime levier du changement social, alors les choix individuels de mode de vie deviendraient en eux-mêmes des actes politiques. La consommation et les technologies du quotidien, et parmi elles, les technologies de l'information, se trouveraient alors dotées d'une nouvelle dimension politique.* » [89]. Pour autant, ce phénomène émergent reste encore fortement minoritaire.

Dans cette orientation, cette nouvelle vie sociale de dépendance partagée rejeterait la logique productiviste, sans pour autant rechercher un retour à des formes sociales villageoises historiques... Pour Arnspurger [90], les composantes les plus aisées de la société souhaitent le maintien des formes consuméristes et capitalistes actuelles (cf. également Sundararajan [91]), alors que la demande des exclus ne concernerait que des besoins élémentaires comme du travail, un logement et de la nourriture ; la classe moyenne oscillerait entre ces deux positions dans un contexte d'ambiguïté et d'insatisfaction. Le développement « maker », avec ses conséquences liées au partage, est susceptible d'introduire des modifications dans ce décor qui devient de jour en jour plus

anxiogène (ne serait-ce qu'en s'informant via les médias traditionnels). Mais peut-on attendre d'une technologie qu'elle modifie à elle seule les comportements ? Au mieux, elle constitue une opportunité, avec probablement une impression ludique de détournement, pour conforter un monde différent rêvé, d'un procédé de transformation de la matière conçu pour servir (ou détourner) le but économique pour lequel la technologie s'est développée...

L'informatique devenant une forme de vecteur d'augmentation (apparente) de son pouvoir personnel, permet facilement d'interagir avec des personnes partageant les mêmes idées ou les mêmes intérêts. Pour la fabrication additive, une « économie de la gratuité » se développe avec, à l'exemple des hackers, l'impression que tout est possible : échanger avec le monde, pirater des logiciels, rejeter les principes de propriété industrielle, etc. On passe avec les makers de l'immatériel au matériel. Pour Bosqué, Noor et Ricard [92], le mouvement « hacker » s'est créé pour développer l'initiative individuelle, pour jouer avec les technologies (dont celles de l'information et de la communication) avec des formes de braconnage technologique et de détournement des usages prévus. Mais dans la vraie vie, il a pu s'agir de déjouer des codes, de décrypter pour pénétrer des systèmes informatiques ; ces attitudes se sont enracinées sur des formes de virtuosité, de jeu, se posant en redresseurs de torts à la Robin des Bois, mais également de rejet des normes technologiques considérées comme trop rigides. En dehors de l'aspect médiatique (Anonymous), certains hackers ont cependant inventé des méthodologies originales avec une valeur souvent pionnière grâce à une créativité libérée de nombreuses contraintes (encadré 1). Le mouvement « maker », qui en est issu, défend une production distribuée (il agit sur le « faire » avec une vision généralement positive) pour créer, valoriser et personnaliser nos objets du quotidien. Les consommateurs ont aujourd'hui accès à de très nombreuses informations (environnement, ressources utilisées, externalités sociales, etc.) via internet, ce qui peut se traduire d'un point de vue modèle économique du passage du mode linéaire du commerce à un mode maillé non stationnaire, beaucoup plus coopératif [93] [94] [95]. Le slogan de l'exposition de Chicago s'inverserait alors !

Pour Rachel Botsman [96], l'économie collaborative, dans laquelle le mouvement maker peut s'intégrer, se définit comme « des réseaux d'individus et de communautés connectées, par opposition à des institutions centralisées, et qui transforment la manière dont nous produisons, consommons, finançons et apprenons » (voir également Petropoulos [97]). Elle englobe selon Terrasse, Barbezieux et Herody [98] :

- la consommation collaborative, c'est-à-dire :
 - l'organisation des échanges et de la consommation (achats groupés, locations de particulier à particulier, revente et don d'objets, troc, systèmes d'échanges locaux, monnaies, etc.),
 - le logement (habitat partagé, autoconstruction, échanges de logements, etc.),
 - l'énergie (coopération dans la production d'énergie, achats groupés, etc.),
 - la mobilité (auto partage, covoiturage, etc.),
 - l'alimentation et l'agriculture (autoproduction alimentaire, circuits courts, coopératives de consommateurs, etc.) ;
- la réparation et la fabrication d'objets (hacker-spaces, FabLab, TechShop, Repair café, etc.) ;
- le financement de projets (crowdfunding, investissements citoyens, finance solidaire, etc.) ;
- l'éducation et le savoir (partage de contenus numériques, Massive Open Online Course (MOOC), Wikipédia, etc.).

Les promoteurs de l'économie collaborative se réclament de plusieurs courants de pensée [98] :

- La **mouvance du « libre »** se caractérise par le passage d'un principe de propriété (droits de propriété et droits d'auteur) à une logique d'accès libre, gratuit et universel des utilisateurs aux

connaissances, compétences et ressources matérielles via des systèmes ouverts ; ce domaine est celui des makers.

- L'**économie de la fonctionnalité** est une économie qui « vise à optimiser l'utilisation des biens et services. L'objectif économique est de créer une valeur d'usage la plus élevée possible pendant le plus longtemps possible, tout en consommant le moins de ressources matérielles et d'énergie possible » [99].

- L'**économie du don** recouvre les modes d'échange dans lesquels les biens et services en circulation ne sont pas considérés pour leur valeur.

2.1.2 Le phénomène « maker »

Le développement « maker » a été rendu possible par une informatique de très haute puissance et aisément connectée avec un rapport d'émerveillement et d'addiction perpétuées pour les technologies numériques, laissant aux utilisateurs une impression forte de liberté et d'indépendance [86] [100]. L'assimilation des potentialités du numérique peut alors disposer d'un pouvoir suffisant pour modifier les formes culturelles, revoir le modèle civilisationnel et la nature de l'emploi [101]... avec « l'émergence d'une humanité non plus seulement interconnectée, hyper-mobile, faisant de l'accès une valeur capitale, mais désormais hybridée à des systèmes qui orientent et décident de comportements collectifs et individuels, sous des modalités encore discrètes, mais déjà prégnantes, appelées à être étendues à de nombreux champs de la société » [100]. Le comportement des makers refuse l'ajustement actuel du jetable et en conséquence des lois de la société de consommation. De plus, en apprenant à bricoler, à réparer, en rejetant la parcellisation/fragmentation trop forte des productions et des compétences, ils remettent en cause les modes actuels de fabrication s'appuyant sur des modes très hétérogènes et fortement mondialisés. À leur niveau, il s'agit de revenir à des formes d'artisanat intégré [102]. Dans ce domaine, les dimensions humaines de l'expérience et de la connaissance, de la confiance, de la motivation et du plaisir s'intègrent à l'environnement FabLab [103].

Il s'agit aussi d'être membre d'un groupe qui affiche ou peut afficher une originalité, une image spécifique, différente de celle de la moyenne des citoyens, dans un monde où l'on peut observer une diversification des modes de vie et un renforcement de l'autonomie, avec le principe de libre disposition de soi (culture post-conventionnaliste selon Lipovetsky [104]). La polarisation créée par la montée de formes d'individualisme amène à réfléchir sur le lien social et le besoin d'ouvrir de nouvelles solidarités, comme de nouvelles formes d'associations et de nouveaux types de solidarités citoyennes. C'est une forme d'ingénierie sociale qui, lentement, va faire changer les habitudes et les comportements du public qui n'en exprimait auparavant pas le besoin... De là à penser que cette transition dysfonctionnelle est intentionnelle pour permettre d'accéder à de nouvelles formes de domination et de contrôle, il n'y a qu'un pas... Sur cette base, il serait utile de maîtriser des stratégies d'induction comportementales qui vont faire accepter, désirer la nouvelle technologie dans son cadre réparti chez des makers. « Le sens de nos actes, de nos vies, est effectivement situationnel : l'individu n'est jamais producteur de sens, le sens émerge de ce soubassement multiple et contradictoire, ensemble ouvert et donc non démontrable, infini. » [105]. Cette cyberculture spécifique ouvre ainsi un champ nouveau d'étude avec ses approches susceptibles de préfigurer l'avenir en termes de logiques relationnelles...

Ce contexte nouveau s'intègre en partie dans ce que Jean Serrier [106] considère comme de l'utopie, un rêve à réintégrer dans le réel, à cause de certains caractères spécifiques :

- l'utopie est associée à un rêve, une idée d'un futur, le sentiment de faire œuvre originale ;
- sentiment d'appartenance à une communauté de pensée, partiellement isolée et tolérante aux autres ;
- formes de désir d'un retour à une certaine pureté.

Ce nouveau contexte diffère des autres formes d'utopies plus anciennes, en ce qu'il ne cherche pas l'isolement, une nostalgie du

passé. Il s'agit ici d'organisations ouvertes, éphémères, sans volonté spécifique d'idéalisation, voire de normalisation ou d'usage de symboles identitaires, avec lesquelles il y a possibilité de progresser par le biais d'échanges à tous niveaux [107].

Ainsi, le développement « révolutionnaire » récent de la fabrication additive dans la société [108] serait essentiellement l'œuvre d'amateurs éclairés et performants (des « indigènes » du numérique qui auraient aspiré à une autre vie, au-delà de leurs écrans ?) [75] [76], qui se définissent comme des « makers » agissant essentiellement avec des machines de faible coût et exploitant, autant que faire se peut, les logiciels libres : grâce aux technologies de l'information et de la communication, chacun avec un bon design peut transformer des données numériques pour obtenir un objet, un produit [75] [76] [109]. Ils s'appuient sur des principes d'économie ouverte qui reposent sur des contributeurs ne cherchant pas en premier lieu un profit immédiat (à l'exemple de Wikipédia). Il s'agit d'une forme d'économie passionnelle nouvelle qui rompt avec les standards de l'économie libérale en intégrant le système DIY (*Do It Yourself*) et du bricoleur 2.0 [110] [111]. « *La dynamique d'opinion produit la propagation d'opinions minoritaires, dès lors que celles-ci sont en conformité avec les croyances propagées de la population concernée et qu'elles ont un minimum de soutien initial en son sein.* » [112]. En ce sens, la nouvelle technologie pourrait avoir un impact sur le social (et réciproquement), car en lien avec des choix organisationnels et sociaux [113].

D'un point de vue scientifique, il est possible de s'interroger sur la manière dont se pose et pourrait être résolu le « défi de la globalité », de l'exploration des objets-frontières, face à la fragmentation des savoirs et des techniques. C'est mettre en question la pertinence actuelle de lignes de fractures telles que celles qui opposent les conservatismes des disciplines et des spécialisations entre eux qui ont des difficultés dans la convergence de savoirs et ne s'engagent pas dans des projets interdisciplinaires. Plus largement, c'est aussi s'interroger sur les modalités d'accès, vu du haut, aux savoirs profanes, qui ne seraient plus l'apanage du spécialiste, des élites scientifiques et technologiques, mais celui du débrouillard intelligent, du bricoleur créatif, que la curiosité et la soif de connaissance amènent à éprouver la porosité des frontières disciplinaires (parce qu'ils ne les connaissent pas et/ou qu'elles ne limitent pas leur créativité comme dans certains domaines scientifiques plus professionnalisés).

Les projets collaboratifs, réelle relation en mode « système D », qui en sont la manifestation, sont porteurs d'espairs nombreux et utiles pour la société (art, artisanat, réparation de machines, création d'objets techniques, innovations diverses, création d'un pouvoir citoyen, etc.). Ils constituent une passerelle entre les militants et le public ordinaire qui peut, parce qu'il y a trouvé son intérêt personnel, se concilier pour un temps avec des approches collectives nouvelles [102]. Le but est la mutualisation en réseau de ressources avec cette idée de partage, de co-élaboration et de collaboratif (relations de confiance, bienveillance, réciprocité, transparence et liberté mutuelle...).

Tout le monde peut être bénéficiaire et contributeur dans un « jeu » à somme positive. Dès lors, une innovation renforcée, dans un domaine où les principes d'intelligence collective doivent intervenir, est considérée comme possible en dépit de ressources économiques et matérielles rares. L'idée sous-jacente est que la somme des créativité individuelles, agencées et exploitées de façon intelligente, peut devenir le support d'une « immense » intelligence collective, et d'un levier d'innovation et de performance pour la société. Cependant, comme l'avait déjà envisagé Keynes en 1930 [114], si le meilleur moyen d'explorer la nouvelle technologie de la fabrication additive n'est pas de remplacer des bras par des machines 3D, peut-être faut-il réexplorer les processus de fabrication, avec le risque de requalification pour certains (les makers pour une part importante) et d'élimination d'un certain nombre de salariés du système de production actuel... [115].

Les réactions face à la déviance ne sont pas toujours des réactions de désapprobation, et peuvent alors être profitables. De surcroît, avec l'abandon des royalties des brevets (au bout de

20 ans), un mouvement nouveau a pu se créer, dans un cadre lui-même nouveau, avec des populations applicatrices très hétérogènes. Celle des makers représente un ensemble de travailleurs, plutôt bénévoles (mais il existe des emplois salariés), motivés, créatifs et généralement hautement qualifiés, sans toujours disposer d'un contrat de travail bien clair, avec des activités peu planifiées. Cette diffusion actuelle des technologies 3D laisserait entendre que les entrepreneurs et les inventeurs pourraient ne plus être à la merci des grandes entreprises pour réaliser leurs idées. Enracinés dans le monde du logiciel libre, dans l'open innovation, ils appliquent des valeurs et des pratiques originales aux mécanismes de fabrication pour respecter ce que le président Obama avait appelé « une révolution en marche » ! [116] [117] [118] [119].

Pour Anderson [75] [76], le mouvement maker, inscrit dans une culture du web internationale underground à la mode se définit par :

- l'utilisation d'outils numériques (autofabrication numérique) ;
- la mise à disposition de la communauté des modèles réalisés ;
- l'utilisation de fichiers courants (open source) pour mieux communiquer.

Pour Michèle Freud [120], la créativité (dont celle des makers) nécessite une bonne dose de persévérance. Trop souvent, à la première difficulté, au premier échec, notamment lorsque les résultats ne sont pas à la hauteur de leurs espérances, certains abandonnent. « *L'économie de la créativité et l'économie de la résolution de problèmes sont deux domaines bien différents. Tandis que la créativité échappe par essence à toute localisation fonctionnelle dans l'entreprise et peut être le fait de chercheurs individuels, personnes extérieures ou déplacées, usagers et utilisateurs, les processus de résolution de problèmes sont le plus souvent organisés et collectifs, dans le cadre de lieux dédiés à cette fonction.* » [121] Or, pour qu'elle soit féconde, la créativité nécessite de s'investir réellement, d'être soutenu (au moins moralement) pour atteindre ses objectifs. C'est au fil des performances, de la construction d'une idée, ou de sa consolidation, que nous pouvons améliorer l'intuition de nos propres possibilités. Les créatifs sont très souvent des personnes persévérantes qui cherchent à approfondir pour valider leurs idées, pour autant qu'elles disposent de temps [122] [123] [124]. Poussées par leur curiosité, leur désir de comprendre, elles peuvent s'absorber dans leur tâche et y consacrer une énergie très importante mobilisant la plupart de leurs ressources intellectuelles, émotionnelles et sociales. Elles ne renoncent pas volontiers et refusent de laisser tomber. Les créatifs, même ayant essuyé des échecs, en tirent des leçons et persévèrent ; dans le mouvement open source, ils disposent de contacts et d'aides, certes éphémères, mais qui autorisent un support psychologique à la créativité. C'est en comprenant (avec d'autres) les causes de leurs échecs provisoires qu'ils parviennent à corriger leurs erreurs et à progresser. Dans un espace libre et coopératif, avec un partage horizontal des savoirs, la distribution des capacités permet la conception et la fabrication de pièces 3D, s'appuyant sur la figure emblématique du « maker pionnier ». C'est aussi un moyen d'introduire le citoyen dans la boucle de l'innovation [125].

L'anthropologie utilise le terme de « mutation » pour décrire le flou actuel, le brouillé des valeurs, l'indéfini des repères qui se diluent, le temps dans lequel cohabitent des formes traditionnelles, sans que de nouvelles soient légitimées. « *C'est un temps suspendu dans lequel s'opère une transformation des structures de la civilisation industrielle qui rend l'avenir incertain.* » [126]. La modernité technoscientifique fondée sur une rationalité triomphante ne peut faire abstraction de l'émergence de ces nouvelles créativité désordonnées. Selon Chaurant et Brauer [127], la déviance par rapport à la tradition est aussi un moyen de marquer son originalité, son unicité, de se démarquer des autres. « *En ne respectant pas les normes du groupe, l'individu n'agit pas comme un vrai membre du groupe et manifeste sa relative indépendance par rapport à son groupe (ou à la société). Or, l'originalité est dans la plupart des cas une caractéristique valorisée [nous sommes plus intéressés par une personne qui a « un truc en plus » que par*

des personnes interchangeables]. De façon paradoxale, adopter des comportements déviants peut alors conduire à une valorisation de l'individu ». De fait, dans ce contexte « maker », les comportements sont évalués plutôt positivement, et la déviance relativement au système est alors associée à la créativité et à ses conséquences matérielles (par exemple [128]).

Ainsi, avec Bernard Stiegler [129], on peut parler avec les makers de l'émergence (modeste) d'une nouvelle révolution industrielle qui permettrait d'envisager de nouvelles formes de production très localisées et décentralisées, et revalorisant les savoir-faire, après deux siècles de prolétariatisme fordien. Parmi les concepts retenus, celui des idées qui deviennent « plus grandes » [75] [76] ; les projets en s'élargissant peuvent devenir ceux d'un groupe de « militants » qui, par diffusion, les élargissent de plus en plus à la société. Apparemment, à l'opposé d'un tel point de vue, l'intégration des technologies numériques donne à penser que l'automatisation va se généraliser et l'emploi salarié régresser, sinon tout à fait disparaître [130]. Pour Marc Giget [131], « Nous connaissons actuellement un paradoxe. Nous vivons une période de poussée technologique considérable : on a dépassé les 12 millions de chercheurs dans le monde, 2 millions de brevets déposés l'an dernier et 110 000 revues scientifiques. Mais dans le même temps, les progrès des nouvelles technologies ont des conséquences redoutables sur les emplois en les détruisant massivement ». Dans les faits, on suit, sur la lancée du système d'Alan Smith (rappelée par Cohen [132]), une spirale qui considère que plus la société s'enrichit globalement, plus la division du travail s'accroît (comme actuellement la fragmentation des productions industrielles) pour augmenter la productivité et la croissance... Il existe ainsi une évolution dans le travail d'ingénierie : Autrefois, à l'exemple de Gustave Eiffel, on pouvait, en s'appuyant sur la compétence d'une personne (et au moins une partie de son équipe), participer au progrès technique. Aujourd'hui, ce progrès nécessite la convocation de nombreuses disciplines (par exemple pour la fabrication additive : matériaux, procédé, imprimabilité, cahier des charges fonctionnel, HSE – hygiène, sécurité et environnement, logiciels, gestion des déchets, etc.) qui peuvent être reliées entre elles par des systèmes numériques [86].

Que penser de ces perspectives apparemment contradictoires ? Songez en effet à un monde où les quatre libertés du logiciel s'appliquent également ainsi aux objets domestiques : liberté d'usage, d'étude, d'amélioration et de diffusion. Ne sommes-nous pas alors réellement, au moins pour certains, dans des conditions qui, apparemment, nous permettent de nous affranchir d'une certaine logique économique et financière actuelle ? [133] L'idée qu'une organisation radicalement nouvelle des sociétés industrielles est non seulement possible, mais inévitable, se dessine avec, pour Stiegler, un choix de société d'une nouveauté probablement sans précédent... « Nous vivons l'entrée dans un nouveau mode de travail : l'ère du travail contributif, où le contributeur n'est ni simplement un producteur, ni simplement un consommateur. » [129]

Mais, dans le même temps, des petites organisations non structurées, mais reliées par les réseaux informatiques, se développent, correspondant peu ou prou aux propositions de Jérémie Rifkin [134]. Cette mondialisation égalitaire se traduit/tradira par une organisation underground où les membres deviennent capables d'assurer leurs propres services et à tendre vers de nouvelles formes d'autonomie qui pourraient servir de leur côté « exotique », voire un peu « folklorique » pour devenir (un jour) une gêne idéologique pour les gouvernants. « Quand la foule des gouvernés commence à organiser sa survie en petites communautés capables de se suffire à elles-mêmes et d'assurer leurs services publics, alors les gouvernements, plus soucieux de théâtre et de simulation que d'assurer le bon fonctionnement des services publics défaillants, étiquettent comme mouvements marginaux ces tentatives. » [135] [136]. Des formes de récupération des mouvements comme la proposition de La Poste ou de certains grands magasins de fournir un service d'impression 3D à la clientèle peuvent exister, faisant rentrer une expérimentation originale dans le système...

« On touche ici aux limites de la compétitivité et l'on doit se demander s'il est possible de poursuivre à la fois l'utopie humaine du plein emploi et l'utopie de la rentabilité technique [...]. Il n'est plus possible de reculer dans le domaine de l'innovation scientifique et technique programmant l'obsolescence de l'Homme et la raréfaction du travail. L'utopie économique d'une société du travail programme sa propre disparition à cause de son encouragement à la performance technique et la baisse des coûts de production. » [135] Dans ce contexte de remise en cause donc angoissant parce que réaliste, le mouvement maker apporte sa solution et change la donne. Il réenchante potentiellement le dispositif de production en le sortant de ses méthodes fordiennes de production automatisées en le personnalisant...

Mais, selon un grand nombre d'auteurs [137] [138] [139] [140] [141] [142] [143] [98] [144], se préparent, comme on peut l'imaginer, quelques difficultés d'usage « libre » de procédés qui sont couverts par des propriétés industrielles dans des opérations commerciales issues des makers. En effet, des initiatives emblématiques de l'économie collaborative reposent sur des modèles d'affaires traditionnels et s'inscrivent clairement dans une perspective lucrative. Cet état de fait questionne l'appropriation de l'étiquette « économie collaborative » par un certain nombre d'acteurs pour qui cela vise essentiellement une volonté commerciale. Néanmoins, comme l'indique l'enquête de Nomadéis-TNS-Sofres [145], il s'agit d'un marché potentiel très important (même si, dans cet ensemble, la place de la fabrication additive n'est pas connue).

2.2 Les « FabLab »

Pour Schneider et Lösch [146], les FabLab peuvent, dans une vision très positive, être analysés comme un cas empirique de démocratisation de la création du futur. C'est bien connu, ce sont les minorités qui innovent... ces minorités actives présentes dans les Open-Labs ou les FabLab (*Fabrication Laboratory*) peuvent être des puissances créatrices susceptibles de mettre en marche un processus délocalisé d'influence à destination de la majorité silencieuse, avec des machines de faible coût, permettant par l'expérimentation d'élargir des marchés applicatifs, tout en conduisant en retour à des adaptations sociales [147]. Pour rappel, un FabLab est un lieu ouvert à tous (ou presque), où sont mis à disposition du public toutes sortes d'outils et de machines pour la conception et la réalisation d'objets, notamment des machines-outils et des dispositifs de fabrication additive pilotés par ordinateur. La caractéristique principale des FabLab est leur esprit d'ouverture aux autres, avec en point de mire le développement d'intelligence collective (mais tous n'en sont pas là). Ils s'adressent aux entrepreneurs, designers, artistes, bricoleurs, étudiants ou aux hackers en tous genres... soit à tout volontaire souhaitant passer le plus rapidement possible de la phase de concept à la phase de prototypage, de la phase de prototypage à la phase de mise au point, de la phase de mise au point à la phase de déploiement, etc. Ils regroupent différentes populations, de tranches d'âge et métiers divers. Ils constituent aussi un espace de réalisation d'objets uniques : art, objets décoratifs, objets de remplacement, prothèses, orthèses, outils..., mais aussi de transformation ou de réparation d'objets de la vie courante [148].

Une technologie nouvelle démocratisée est donc insérée dans un certain contexte social avec parfois des développements non prévus initialement (depuis des modifications « cosmétiques » jusqu'à des détournements créatifs allant jusqu'à la fraude). Dans le même temps, cette appropriation par des groupes actifs se traduit par une augmentation de leur autonomie et de leur capacité d'agir et d'être connus [149]. D'ailleurs, pour Steven Johnson [150], internet constitue un modèle intellectuel permettant de mieux penser la nouvelle société dans son organisation ; ce n'est pas « la solution du problème, mais une façon de le penser », c'est « directement utiliser internet pour améliorer la vie des gens, mais aussi s'inspirer de la façon dont il a été organisé ». Le débat est ouvert...

Pour les plus radicaux d'entre eux, la réappropriation populaire des outils ouvrirait la voie à une « démocratisation » de la production industrielle visant l'abolition de la société de consommation [134] [151] [152]. D'autres espèrent réduire les coûts du travail et rendre ainsi obsolète le mouvement de délocalisation de la production industrielle vers les pays du tiers-monde... [153] [154] [155]. Ces commentaires posent donc la question de leur possible intégration dans Industrie 4.0... Hors débat organisationnel d'une société qui change, Briens [156], dans son approche prospective, a introduit plusieurs scénarios liés en particulier à la décroissance, induisant une limitation des échanges commerciaux en association avec des risques macro-économiques (dettes, inégalités, immigration, protectionnisme, démocratie, etc.). Dans un tel décor, il est naturel de penser que, dans une logique de débrouillardise pragmatique, la fabrication additive dispose d'une place de choix par nécessité de produire localement, avec des mémoires d'usinage traditionnel perdues ou obsolètes (absence de *knowledge management*), laissant des champs entiers d'activité à cette technologie... En tout état de cause, la montée en puissance de technologies à haute valeur ajoutée comme la fabrication additive peut multiplier, grâce à Internet, les possibilités de profiter gratuitement des efforts et des productions intellectuelles et techniques des autres, surtout en raison d'une nature « non rivale » du savoir communiqué [157].

2.2.1 Un état des lieux des FabLab

Lancés par le Media Lab du MIT à la fin des années 1990, les FabLab sont des lieux ouverts au public où sont mis à disposition toutes sortes d'outils, notamment des machines 3D servant à la conception et à la réalisation d'objets. Neil Gershenfeld, à l'origine du concept et son équipe du MIT [158] se sont vite rendu compte du potentiel inventif et singulier de l'utilisation de ces machines. La caractéristique principale des FabLab est leur ouverture à tous les publics. Dans un FabLab, la création se fait sur des bases de temps courts avec des possibilités variées selon l'expérience des personnes (figure 8).

L'un des défis de contenu numérique est pour les acteurs créatifs de proposer, avec des contraintes temporelles fortes et les moyens matériels disponibles, des innovations significatives plutôt à des moments où elles font sens (médias sociaux, moments d'actualité), ce que Mazerant et al. [159] appellent le « marketing en temps réel » (MTR) qui établit des connexions rapides. Le développement créatif est donc soumis à une certaine pression temporelle externe, ce qui peut avoir un effet négatif sur l'originalité et sur la qualité de l'artisanat, deux autres dimensions de la créativité en plus de la signification des objets créés qui conduisent les réponses des utilisateurs (satisfaits ou pas). C'est à l'aune de cette maîtrise du temps que l'on reconnaît les « bons » FabLab ouverts sur l'extérieur (qui autrement se limitent à la réalisation de pièces classiques et/ou de

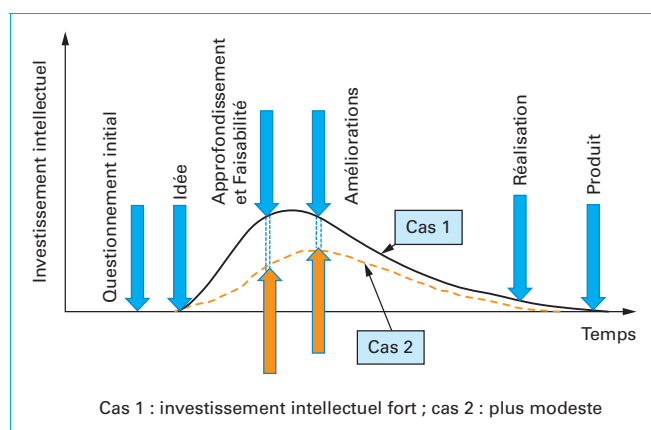


Figure 8 – Exemple de processus innovant de courte durée partant de l'idée jusqu'au produit avec deux exemples possibles

remplacement de pièces usagées). Il n'y a pas [à la connaissance de l'auteur] de classement des FabLab comme cela se passe dans le domaine de la recherche scientifique, comme l'a montré il y a plus de 50 ans Storer [160], et l'agilité des créatifs présents dans les FabLab n'entraîne pas de financements complémentaires significatifs. L'effet Saint-Mathieu classique en sciences n'y a pas sa place...

Les FabLab constituent aussi un espace de rencontre et de création collaborative [161]. Lallement [162] a analysé les mutations de la figure du travail dans les FabLab, a défini une typologie des activités des hackers et a mis en évidence des points de frottement avec le système marchand. Lhoste et Barbier [163] ont également examiné les activités de production et de circulation des connaissances à l'intérieur des communautés innovantes avec une attention particulière à la matérialité des pratiques, avec une transition vers des processus d'institutionnalisation (de l'épopée auto-réalisatrice à un certain conservatisme et une réintégration dans le système économique classique). À partir d'une lecture du travail des intermédiaires, il peut être tenté de comprendre leur rôle dans les dynamiques d'institutionnalisation des FabLab. Dans la littérature en théorie des organisations, l'« institutionnalisation » est le processus de structuration des relations entre acteurs qui « acquièrent graduellement le statut moral et ontologique de faits pour acquis qui, en retour, façonnent les futures interactions et négociations » [164].

Encadré 2 – FabLab

« À l'aune d'une analyse comparée des [différents] types de « Tiers-Lieux », nous interprétons les FabLab comme une forme d'expérimentation collective et distribuée de l'innovation ouverte qui doit beaucoup aux trajectoires des fondateurs et à leur stratégie de « soft hacking » des institutions. » [163] Les différents FabLab combinent cinq fonctions correspondant sensiblement à cinq publics : la simple découverte du pouvoir de faire, de fabriquer, qui s'adresse aux enfants ou aux bricoleurs ; l'éducation par l'action, qui s'adresse aux écoles et universités ; le prototypage rapide, qui s'adresse aux entrepreneurs et créateurs ; la production locale, qui répond notamment aux besoins de pays en développement, mais aussi à ceux d'artistes, designers ou bricoleurs qui ne cherchent pas la grande série mais l'innovation, l'invention des objets, des espaces, des formes de demain [165]. Avec le développement des FabLab, un réseau mondial de plusieurs milliers d'organisations permet de rendre les procédés de fabrication numérique accessibles à des publics divers, et leur transformation par une « élite » grâce à des FabLab collectifs. Dans cette organisation ouverte se révèle l'interaction constitutive entre les pratiques techniques et les changements de la gouvernance locale. Schneider et Lösch [146], en faisant jouer aux FabLab un rôle dans l'innovation [166], considèrent que la création de l'avenir et la gouvernance de l'innovation socio-technique peuvent être démocratisées si les moyens de créer et d'explorer l'avenir sont eux-mêmes démocratisés... Le développement de ces structures ouvertes est issu des technologies numériques [89] [167] [168] mais aussi de la résurgence de mouvements plus anciens centrés sur le « faire » tels que des ateliers communautaires de bricolage [163]. Les FabLab entrent en continuité avec les mouvements hackers, pourtant plus individuels [162]. Ils reposent sur une volonté de production de communs par les pairs (*commons-based peer production*) [169] avec certaines volontés politiques visant un changement de la société [170]. Selon Eyckenne [171] [172], les FabLab s'inscrivent dans le mouvement des « Tiers-Lieux », cette notion [173] recouvrant des principes d'ouverture, de convivialité et d'échanges et un usage situé hors des sphères privée et professionnelle. « En favorisant l'accès à des espaces d'expérimentation par le bricolage, les FabLab sont aussi conçus par l'acteur public comme des lieux d'innovation ouverte qui supportent des promesses de démocratisation de pratiques collaboratives pouvant aussi déboucher sur des activités d'entrepreneuriat » [163].

Dans ce contexte, il est possible de considérer que l'on passe d'une innovation centrée sur les producteurs industriels à une innovation centrée sur (ou proche de) les utilisateurs. La dimension éducative est un élément important de la charte des FabLab : apprendre, mais surtout, le faire ensemble. La réalisation d'un projet ne peut pas être déléguée à une personne plus aguerrie (principe du DIY : *Do It Yourself*), mais doit passer par l'acquisition des compétences nécessaires permise par les membres de la communauté, avec une aide pour trouver les bonnes personnes-ressources. « Ces lieux se veulent des vecteurs d'émancipation dans lesquels on va chercher à comprendre et à développer soi-même des produits, au lieu de les acheter » [171] [172].

Pour disposer de l'appellation « Fab-Lab », un atelier de fabrication doit respecter la charte des FabLab mise en place par le MIT, avec la nécessité de passer une certification et des formations (figure 9 représentant les missions des FabLab, extraite de GoTronic [174]), mais un FabLab n'est pas nécessairement affilié au MIT. Un réseau national des FabLab a été constitué [175] ; Fablabo [176] dans sa publication indique une répartition relativement homogène des 60 FabLab en France, et Piuze [177] fait état des FabLab en France en 2021 : leur nombre est en augmentation.

L'ouverture souhaitée est ainsi une condition de réussite, car pour construire des objets techniques complexes, il faut disposer d'un partage de connaissances pour aborder tous les aspects de la fabrication [178]. Il règne dans les FabLab une forme d'interdisciplinarité revendiquée qui utilise toutes les technologies numériques innovantes pour se mettre en œuvre. Le réseau internet est donc central malgré le regroupement dans des lieux physiques : « Il assure une communication permanente, l'accès à des informations utiles, voire leur production et leur diffusion au sein d'un réseau évolutif valorisant les trouvailles de tel ou tel groupe et la soumettant au regard des autres qui pourront la valider, la réutiliser à l'identique ou l'adapter. De ce point de vue, comme du point de vue historique, ces lieux collaboratifs sont souvent liés ou issus du monde du logiciel libre et de l'open source dont ils représentent la branche matérielle comme la thématique du bien commun en représente la branche culturelle et écologique. » [179]

Selon L'Hoste et Barbier [163], « les fondateurs des FabLab génériques situent assez nettement leurs activités dans le registre d'une intégration dans l'écosystème local d'innovation en proposant une sorte de service ouvert de prototypage. En favorisant la conception d'objets par les utilisateurs, ils viennent questionner un système national qui organise l'innovation au sein des sphères institutionnelles de l'université, de l'industrie et de la décision politique [180]. C'est à travers le mode d'organisation des activités tant individuelles que collectives qu'ils affirment un rapport frondeur à la conception, dans l'usage de capacités technologiques qui sont le fruit d'échanges [directs] et de partages d'expérimentations. La fonction des agents intermédiaires (fondateurs et Fab-managers) est affirmée comme nécessaire au maintien d'un dispositif d'expérimentation collective qui sait communiquer sur ses réalisations ». Il ne s'agit que d'une des activités impliquant des coopérations technologiques puisque dans la structure, les personnes présentes (acteurs intermédiaires) interviennent dans l'échange de savoirs et de savoir-faire pour les rendre accessibles à ceux qui en ont besoin (formation, utilisation des machines numériques, etc.). « Les fondateurs mobilisent leur trajectoire professionnelle et personnelle et leur capital social pour asseoir, légitimer et diffuser le concept des réseaux d'intéressement qu'ils constituent et animent. » [163]

Dans les faits, le développement des FabLab pose de nouvelles questions, en s'intéressant à la trajectoire sociale des fondateurs d'espaces comme les FabLab, et aux nouveaux comportements des jeunes générations de travailleurs du numérique qui conjuguent leurs aspirations de liberté et d'investissement épanouissant ou addictif dans les domaines professionnel et privé, ainsi qu'à leur nouveau rapport à la coopération, au travail, au territoire, à la

mobilité et aux questions écologiques... [181] Ces éléments dynamiques participent de la performance des structures [182].

Dans l'analyse historique des FabLab, menée par Poli [183], Lhoste et Barbier [184] et enfin par Schneider et Lösch [146], le processus d'innovation ne se déroulerait pas pour éclairer le futur, mais dans les faits, ce futur imaginé aurait déjà été réalisé dans le cadre d'un assemblage d'acteurs hétérogènes, d'objets techniques divers (dont des machines 3D), d'organisations variables (mais respectant les mêmes principes) et d'imagination, et ce futur se déroulerait lui-même et pourrait entremêler passé, présent et futur. Pour Schneider et Lösch [146], les quatre fonctions des visions en tant que pratiques socio-épistémiques qu'ils ont identifiées dans les FabLab peuvent autoriser de nouveaux points de départ d'innovations, c'est-à-dire d'imaginer et d'agir, de s'engager dans la construction du futur de la fabrication numérique. Ces capacités ont été rendues possibles et distribuées par le biais d'un assemblage singulier qui s'est mêlé aux dynamiques d'une manière inenvisagée par les acteurs individuels. Ces différents auteurs montrent également que les activités d'intermédiation et les processus d'institutionnalisation des FabLab étaient déjà portés par les fondateurs et les Fab-managers à travers des organisations situées et « la reprise d'un modèle qui tient plus d'une ressource stratégique dans l'institutionnalisation des FabLab que d'un véritable enjeu de mise en conformité à un format » [184]. Il faut noter, selon ces auteurs, le rôle prépondérant des acteurs intermédiaires dans l'organisation des activités dans la traduction/adaptation de ce format pour repenser les relations sciences/société.

2.2.2 Cohabitation makers/industriels

Alors que l'imaginaire des économies industrielles avait installé les fabrications matérielles dans le monde des usines selon des modèles fordien, l'effervescence autour des imprimantes 3D semble commencer à ouvrir d'autres horizons [185]. Derrière elles, il n'y aurait pas qu'une question de diversification des modes de production. Pour Lipovetsky [186], « le système fordien diffusant des produits standardisés a cédé le pas à une économie de la variété et de la réactivité dans laquelle non seulement la qualité, mais aussi le temps, l'innovation, le renouvellement des produits sont devenus des critères de compétitivité »...

Les technologies 3D ne répondraient-elles pas favorablement à la plupart de ces commentaires ? Ne les amplifieraient-elles pas ? Ce constat pourrait se retrouver dans le design vestimentaire avec la possibilité de réaliser dans de petites unités de production, à façon, des modèles personnalisés originaux [187]. Mais dans le même temps, on peut imaginer que le pouvoir économique centralisé pourrait laisser aux makers des marchés moins rentables, en premier lieu, celui des objets complexes réalisés en pièces uniques ou en très petites séries pour lesquels la valeur ajoutée financière peut être considérée comme peu profitable (réparations et résistance à l'obsolescence programmée par exemple), quitte à racheter les micro-entreprises, si des marchés se développent (ce qui n'est pas propre aux technologies 3D), en second lieu celui du non programmable, de l'opportunisme pour couvrir des situations où les modes opératoires sont flous, voire absents, renforçant alors une légitimité pour l'activité des makers.

Cependant, à l'intérieur d'un système informel de sensibilisation, les makers peuvent se reconnaître dans des valeurs spécifiques rassemblant des attentes, des manières de voir et de faire, de dire et d'être reliés aux autres [188]. En termes de créativité, les processus de développement itératif qui y sont adoptés favorisent la réalisation de démonstrateurs ou de prototypes en un temps record grâce à un accès facilité à toute la chaîne de fabrication d'un produit technologique, basé sur du hardware. Sans doute, pour rapprocher des points de vue entrepreneuriaux disjoints, l'un des défis des prochaines années pour les industriels consistera à trouver des ingénieurs imprégnés d'une culture rationnelle scientifique et technologique, mais également capables de coopérer avec des partenaires fonctionnant en mode davantage « agile », à faible inertie, voire chaotique chez certains makers, mais fertile [189].



Conçu par Geoffroy Chaix, réalisé par Romain Machado pour GoTronic
Licence libre CC-BY, merci de mentionner notre site en cas de réutilisation

Figure 9 – Charte des FabLab [174]

Se poserait aussi la question de la redistribution des capacités permettant de répondre à certains besoins matériels, donc celle des conditions d'existence dans une société où le quotidien dépend de multiples artefacts [190]. Dans le système taylorien actuel, avec ses tâches spécifiques, le travail global est en quelque sorte une « boîte noire », avec des normes de fonctionnement désormais classiques avec ses hiérarchies, ses normes et ses corporatismes. Mais, dans le même temps, les technologies 3D peuvent constituer une forme d'anti-grammaire du fonctionnement de l'économie en facilitant des transitions renforcées vers un monde en réseau permis par Internet, avec des décentralisations en bout de chaîne, des « archipels » délocalisés, rendant le système économique plus flexible et plus efficient, car plus mobile [191]. La mise en place de réseautages non structurés garantit l'efficacité du système ouvert qui est celui des pratiques des makers. Selon Alter [192], ces échanges (sans argent) relèvent du don, parce que non obligatoires. Il s'agit bien d'une « reconnaissance de la personne ou du groupe auquel elle est destinée, une confiance dans les relations extérieures, la participation à une conception commune du travail, un engagement hors règlement ». Le système informel permis par Internet est finalement structurant en termes culturels et de création d'une compétence collective.

D'après Lô, « le FabLab d'entreprise semble représenter un oxymore dans la mesure où les FabLab sont originellement des structures ouvertes à tous » [193]. Il s'est intéressé à un FabLab d'entreprise – ou FabLab interne – qu'il considère comme un espace de travail collaboratif impulsant une dynamique *bottom-up* au sein des entreprises. En étudiant une telle structure imaginée par le Groupe Renault, il y décrit quatre pratiques : bricolage, improvisation, prototypage et conception innovante, qui doivent servir au développement de l'ambidextrie des salariés. Le FabLab d'entreprise vise à stimuler les activités d'exploration et les initiatives autonomes en mettant à la disposition de tous un espace et des outils technologiques, numériques et méthodologiques habituellement réservés aux spécialistes. Cette structure ouverte sort donc des pratiques organisationnelles classiques où l'initiative est plus modestement recherchée. En effet, dans les FabLab offrant de la liberté grâce aux technologies numériques et aux outils technologiques les utilisant, les relations entre opérateurs se traduisent, selon cet auteur, par de nouvelles dynamiques organisationnelles plus ouvertes et plus inclusives, notamment au niveau de l'innovation. De plus, de nouvelles dynamiques organisationnelles à l'intérieur de la structure FabLab disposent d'une circulation plus fluide entre opérateurs (absence de verticalité) et des connaissances, notamment grâce à une meilleure perméabilité entre les unités organisationnelles, de façon transversale à l'entreprise.

Lô montre ainsi qu'en combinant des aspects formels (méthodes de conception innovante), la charte des FabLab à respecter et des aspects plus informels (contexte permissif), l'espace de travail ouvert aux opérateurs de l'entreprise crée alors le contexte et l'opportunité pour les salariés travaillant dans un contexte peu favorable de concilier leurs activités ordinaires aux activités d'exploration de leur choix... C'est une vraie liberté responsable qui est ainsi offerte.

L'auteur conclut que :

- « Le FabLab gagnerait à chercher à organiser et systématiser les pratiques semi-ordonnées (bricolage, improvisation, prototypage et conception innovante) au sein de l'entreprise et à inciter la transgression positive des salariés afin de favoriser l'ambidextrie des salariés.
- Le management du FabLab interne repose sur la capacité des responsables à concilier les caractéristiques flexibles de la quasi-structure à la nécessité de conserver une certaine stabilité pour l'intégration des connaissances et des projets innovants dans le processus d'innovation traditionnel de l'entreprise.
- [Le travail présenté] invite également les chercheurs à s'intéresser de plus près à ce sujet d'actualité. Le champ de l'ambidextrie organisationnelle [...] emprunté semble propice à l'approfondissement des connaissances à ce sujet, à travers une perspective centrée sur les salariés, notamment. »

D'autres exemples existent en France [194].

À retenir

- Les « hackers » croient en la liberté et en l'assistance mutuelle bénévole et investissent dans la maîtrise des systèmes numériques (hard et soft).
- Les « makers » sont proches des hackers et utilisent des moyens de production d'objets dont la fabrication additive.
- Ces derniers peuvent se trouver dans des structures ouvertes appelées « FabLab » qui permettent d'utiliser le numérique pour produire, avec assistance spécifique aux nouveaux. Ils rompent avec les modes organisationnels classiques.
- L'industrie peut être tentée de développer des activités libres mais responsables dans des FabLab internes.
- Ces lieux servent à produire et à innover (vers de l'innovation collective).

3. Les citoyens et les utilisateurs « 3D »

On pourrait penser que la technologie laisse intouchés les citoyens dans leur façon d'être, l'activité nouvelle étant « juste » médiatisée par les pouvoirs nouveaux, les opportunités nouvelles que les machines 3D peuvent proposer (« l'optimisme prométhéen » d'après Kundera [195]). En effet, nous sommes en train de vivre une accélération sans précédent des capacités de disruptions technologiques et de possibilités d'action à grande échelle, ce que cet auteur appelle la « surabondance d'opportunités ». Ce monde ultraconnecté, qui se dessine et se renforce au quotidien, appartient désormais aux ingénieurs, un peu aux scientifiques et surtout aux entrepreneurs qui vont pouvoir exploiter cette formidable base installée afin d'inventer de nouvelles applications et de les promouvoir, de nouveaux *business models* à partir d'un parc d'objets connectés presque infini, dans lequel on trouve les technologies de fabrication additive [196]. Mais, à l'intérieur de ce monde, on ne peut pas percevoir les innovations n'importe comment, car la communication crée des stimuli spécifiques chargés de symboles et de valeurs nouvelles [197] [198] [199] de façon que les effets se produisent naturellement, par création de manque, de promotion de désirabilité, d'échanges interculturels, de co-construction. Fresco [200] relève que les nouvelles formes de communication directe participent à des formes de désinhibition, d'absence de relations interpersonnelles et par suite permettent des formes de manipulation et de formatage de la perception sociale... Grâce en particulier aux FabLab [92] [171] [172], la diffusion de la technologie 3D s'élargit et se fait sans heurts, de proche en proche, « ou, tout comme la vibration d'une pierre jetée dans l'eau, les circonférences s'élargissent en même temps qu'elles perdent en intensité et précision » [201].

Le maintien d'une attractivité explicite pour la fabrication additive via la communication et l'information, associées à une image positive et hypermoderne, peut engager des attitudes stéréotypées, des besoins de ne pas paraître ignorant de la puissance d'une technologie nouvelle [202]. En ce sens, la création d'une mode peut forcer le public à suivre, par entraînement, sans qu'au fond il ait été amené à interioriser la technologie pour se l'approprier avec, comme le pensait Tocqueville, une attitude des citoyens à n'adopter qu'une pensée moyenne, celle du plus grand nombre... [203]

Pour se rapprocher du public averti, le projet RepRap.org a été initié en 2005 (ouverture du blog.reprap.org en mars) par Adrian Bowyer, professeur à l'université de Bath en Angleterre. L'objectif du projet RepRap est de développer une machine de prototypage rapide capable d'imprimer des objets en polymère, financièrement et techniquement accessible à tous (avec des logiciels libres). On

peut fabriquer soi-même cette machine grâce à une documentation Internet dédiée qui se déploie via de nombreux sites, wikis, blogs, forums (par exemple [23]).

Nombre des figures connues au départ du mouvement maker viennent du MIT, l'Institut qui a joué un rôle déterminant dans la création de machines à commande numérique, imposant sa vitesse au salarié [153]. La diffusion de la technologie dans le public implique l'existence d'un marché économique très profitable... associant à des problématiques écologiques [13] et des visions d'une société nouvelle, dite de 3^e révolution [134], des infrastructures de communication qui conditionnent notre attention et développent une certaine désirabilité [204] [205]. Peut-être que les espoirs initiaux que l'on retrouve chez certains makers et dans le livre de Jérémie Rifkin [134] mis dans les technologies 3D vont s'amenuiser avec la démocratisation de la technologie. Il est en effet possible que l'usage massifié de la fabrication additive par les citoyens exploitant internet n'aura pas que des effets positifs sur les liens sociaux espérés, ne serait-ce qu'en raison de la raréfaction actuellement observée des liens de proximité entre citoyens [206], amplifiée par la crise de la Covid-19 et par le télétravail. De plus, les questionnements liés au réchauffement climatique dans une idéologie de décroissance peuvent avoir un impact fort sur les technologies à haute valeur ajoutée, quelles qu'elles soient.

3.1 Soutien à la créativité

La technologie 3D encore récente (origine des premiers brevets en 1984, mais démarrage effectif vers 2012-2014) exploite le développement de l'informatique [207], dont elle constitue une forme d'accomplissement « matériel » en traduisant une pensée, un calcul, une modélisation en une réalisation physique ou artistique, mais qui suppose une créativité diffuse. Cependant, selon Laurence Allard [208] : « *Contrairement à l'idée reçue que le numérique est aujourd'hui une culture de l'image conversationnelle ou de l'image connectée, la palette expressive est plus métissée que jamais avec des services et applications qui demandent d'agencer de façon singulière, suivant la capacité créative de chacun – ce qui est très injonctif, prescriptif et normatif, car tout le monde n'est pas créatif et expressif par nature – des images, des dessins, des mots et parfois de jouer avec des temps de production/réception de ces messages comme avec Snapchat ou Vine. L'emoji comme mot-image est typique de cette écriture digitale créolisée.* » Il y a risque de rester dans les apparences, si les objets sont conçus par ailleurs et exploités par des « amateurs », comme cela se passe aujourd'hui pour les jeux électroniques. On n'aurait alors pas réussi à recréer de nouveaux savoir-faire.

L'économie libérale a développé une industrie de masse avec une standardisation très poussée ; elle cède le pas, pour différentes raisons, à une « économie de la variété et de la réactivité » [186]. Dans ce cadre, qu'apporte de nouveau le virtuel à la conception et à la réalisation des objets ? Au départ, un créateur a, au plus, une intention exprimant un désir, une vision. Pour faire progresser sa conception, il fait des esquisses ou des maquettes. Or, aujourd'hui, il a perdu pour une grande part ses compétences d'artisan ou de maquettiste, ce qui limite son action créatrice. Avec la fabrication additive (qui tient l'outil à sa place), il peut envisager sans contrainte la réalisation de son souhait. « *Après une lutte contre les difficultés techniques qu'elle comporte, il peut contempler l'œuvre achevée et la livrer au client. Peintres, sculpteurs, couturiers, architectes dessinent depuis toujours des esquisses pour préciser leur projet et dialoguer avec leur client ; ils font donc depuis toujours du virtuel et l'on peut donc dire, en restant étroitement logique, que l'ordinateur ne leur apporte rien de nouveau* » [209].

Mais, dans le même temps, l'impression 3D continue de se développer, comme l'attestent par exemple les publications récentes de l'auteur dans Techniques de l'Ingénieur (cf. À lire également dans nos bases). Deux articles en particulier sont à consulter à ce sujet : l'un concernant l'impression 4D [RE 285], l'autre le bio-printing [RE 268]. Ces deux technologies émergentes peuvent avoir un retentissement très important sur la société.

- L'impression 4D utilise des matériaux actifs (changeant de forme ou de fonctionnalité) qui doivent pouvoir être imprimés par une technologie 3D de fabrication additive. On ajoute ainsi aux trois paramètres d'espace une liberté complémentaire qui est le temps. Avec des promesses très attirantes, le monde académique s'est emparé de ce domaine qui subit une augmentation annuelle du nombre de publications scientifiques supérieur à 40 %, mais avec des accomplissements industriels très modestes.

- Le bio-printing, l'impression 4D du vivant, correspond à un domaine encore plus attractif puisqu'il envisage la possibilité de remplacement d'organes, voire « l'augmentation » des humains, ou encore de « simplement tuer la mort »... En utilisant ses propres cellules, le corps pourrait éviter les rejets, ce qui induit un marché économique de principe très élevé (qui pourrait se chiffrer en milliers de milliards €/an !). Toutefois, la nature n'est pas encore totalement maîtrisée par les ingénieurs et ce domaine, en dehors de niches potentielles, reste encore relativement vierge (indépendamment des promesses).

On imagine bien que, si elles deviennent opérationnelles, ces dernières technologies pourraient avoir des conséquences sociales et économiques considérables. La figure 10 présente un état de

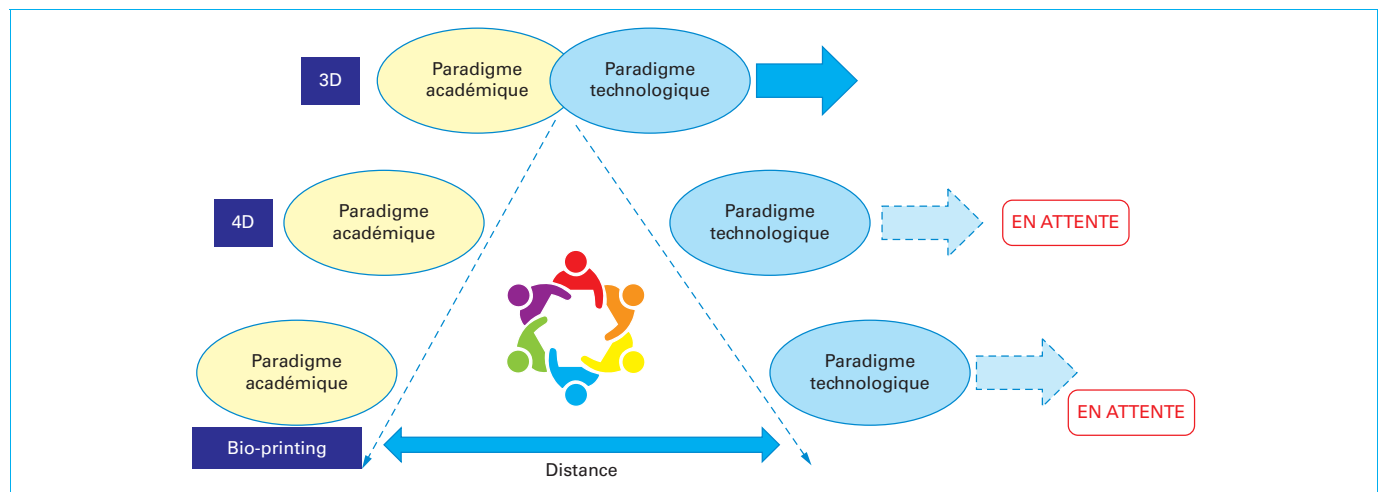


Figure 10 – Importance de la distance entre paradigmes académiques et technologiques – Cas des impressions 3D, 4D et Bio-printing

situation correspondant aux transferts entre 3D, 4D et bio-printing de la composante scientifique à la socio-économie.

Si la fabrication additive s'est développée rapidement (phasages cohérents entre publications, brevets et productions) après une phase de maturation d'environ 20 ans, on ne peut pas en dire autant des « enfants » de cette technologie qui, pour l'essentiel, restent à l'état de promesse. Ils ont moins de 10 ans et peuvent être considérés comme encore immatures. Cependant de nombreux questionnements existent qui constituent des verrous scientifiques, épistémologiques et techniques à faire sauter. En effet, les paradigmes technologiques canalisent des opportunités pour faire progresser/changer les productions des entreprises, leurs processus, leurs services et leurs formes organisationnelles, mais ils imposent des contraintes sociétales sévères sur les orientations futures du développement économique. Dans ce cadre, la recherche dite « appliquée », généralement interdisciplinaire et convergente, est rationnelle relativement à une fin (téléologie). Mais, cette rationalité n'a rien à voir avec celle de la recherche dite « fondamentale » ou même de la technoscience, même si la pensée technologique dans son régime de fonctionnement (qui s'intéresse à des aventures humaines) peut faire appel aux résultats scientifiques de « base », généralement fragmentaires parce que disciplinaires.

3.2 Vers un e-Artisanat

Si la main a disparu avec le savoir, quelques outils de base et l'expérience de l'artisan vertueux, la fabrication additive est un moyen de quitter les espaces virtuels occupés par de nombreux utilisateurs des technologies de l'information et de la communication pour revenir au réel, au palpable, à l'expérimentation physique. À partir de la fin des années 1990, toutes les informations ont été numérisées, c'est-à-dire transformées en suites ou en tableaux de nombres, ce qui a conduit à leur dématérialisation quasi-complète et à leur traitement par toutes sortes d'algorithmes. La numérisation a, selon Berry [210], induit ainsi des inversions mentales, autrement dit des retournements de perception quant à des actions élémentaires de la vie courante.

Les liens entre relation virtuelle et relation de type narcissique sont notables, forme de relation facilitant un repli sur soi et allant ainsi dans le sens d'une non-rencontre avec l'autre-sujet, déliaison qui elle-même semble favorisée par certaines forces d'individualisation de notre société actuelle. De ce point de vue, l'impression 3D offre une voie originale de ressourcement vers la matière et peut rompre avec un certain enfermement, lié à l'usage addictif, immodéré et finalement passif de l'informatique. Il permet de surcroît à des personnes malhabiles de leurs mains de prouver leurs capacités à la réalisation d'objets, pour autant qu'elles maîtrisent le savoir-faire nécessaire à l'utilisation d'une machine 3D, et de s'ouvrir aux autres, physiquement ou virtuellement, grâce à la possibilité de travaux collaboratifs à grande échelle. Il s'agit donc d'une opportunité très intéressante pour le public, d'autant que le prix des machines de base devient accessible, parfois équivalent à celui d'une imprimante classique. Et en même temps, l'aspect ludique permet de créer un espace favorable à l'opinion générale, sans qu'il soit nécessaire de produire un savoir « informé » [211].

De plus en plus de machines sont achetées à titre personnel – comme on dispose d'une imprimante couleurs associée à son ordinateur – par de bons « bricoleurs » éclairés, des créateurs indépendants, des enseignants ou des centres de formation (avec, comme pour le reste de la fabrication additive, des augmentations annuelles en chiffre d'affaires très supérieures à 2 chiffres en termes économiques). Depuis 5-6 ans, des kits open source sont disponibles à des coûts inférieurs à 1 000 €, des machines de base à moins de 500 €, ce qui permet en principe d'atteindre un marché de masse (à comparer avec le prix d'un iPhone lors de sa mise sur le marché...). Certaines de ces machines permettent même de fabriquer d'autres machines, avec l'exploitation d'un principe d'autoréplication [212].

Ces unités à bas coût sont donc à l'origine d'un nouveau type d'autoprodacteur recouvrant alors des fonctions de concepteur,

artiste, ingénieur, producteur et consommateur... bref s'approchant de l'artisan d'autrefois capable de créer un outil adapté à un besoin spécifique, sans pour autant prétendre à la pertinence du spécialiste [20] [102] [213]. Les machines de fabrication additive n'acquiescent de sens comme « besoin dérivé » [214] que dans le cadre social où elles s'intègrent.

Aujourd'hui enfin, l'impression 3D autorise la personnalisation, la possibilité de produire des objets pour un marché d'une seule personne sans payer le prix prohibitif d'un prototype industriel. Grâce aux imprimantes 3D, il y a possibilité d'acquiescer à bas coût des objets sur mesure et plus créatifs que ceux qu'on trouve dans le commerce de masse. Personnaliser un objet est presque gratuit : il suffit de changer le code d'instruction, de modifier quelques paramètres. Imprimer un modèle complexe ne coûte pas plus cher qu'imprimer un modèle simple [40]. C'est le consommateur qui peut désormais avoir le dernier mot pour autant qu'il franchisse le pas du retour à des formes de réalité qu'il n'a souvent plus dans ses pratiques quotidiennes.

3.3 Renforcement de l'attractivité : du désirable à l'instrumentalisation

Un exemple d'introduction du « citoyen » peut être évoqué : dans la société post-moderne dans laquelle nous nous trouvons, certains refusent la consommation dite « de masse », mais surtout ont une forte angoisse face à l'avenir (épuisement des réserves, réchauffement climatique, etc.), expliquant ainsi leur besoin de se réfugier dans des souvenirs plus insouciantes. En manque de repères, l'ancien ou le simple passé récent les rassurent. Même s'ils n'ont pas envie de vivre comme autrefois, ils souhaitent associer des éléments vintage à d'autres plus modernes, ce qui leur permet de ne pas basculer dans le passéisme [215]. L'impression 3D est un moyen de réparer des objets survivants, voire de recréer des objets dans une logique de « retro-marketing ».

Mais pour Christian Lavigne [216], le phénomène pourrait être intéressant à étudier du point de vue de la psychologie sociale quand il sert des intérêts différents, comme ceux visant la fabrication d'armes ou plus prosaïquement d'objets de plaisir, qui varie évidemment d'un pays à l'autre, d'un âge à l'autre, avec des risques d'amplitudes variées. Dans ce dernier cas, à l'exemple des applications du polaroid, le *made at home* (« fait maison ») permettrait aux heureux possesseurs dudit appareil de ne pas être repérés par la police ou de ne pas avoir à porter leurs photos coquines à développer à la boutique du coin. En l'absence de contrôle social autorisé par les technologies 3D personnelles, des formes de déviance de différents types peuvent émerger avec, sans que cela soit nécessairement perceptible, de possibles marginalisations. L'usage des procédés 3D, qui ne sont que des moyens de faire, permet ainsi de s'écarter de conventions parfois pesantes, d'affirmer sa singularité, en développant des goûts culturels personnels, non visibles pour les autres. Pour autant, on ne dispose pas d'informations sur l'amplitude du phénomène, probablement marginal relativement à d'autres formes de perversions douces ou non.

Les technologies de fabrication additive rentrent bien dans ces critères de nouveauté (en renouvelant grandement les façons de produire, en réduisant les étapes et en apportant de nouvelles promesses, parfois fortement ambitieuses avec le bio-printing), de développement de soi et d'appartenance à une sorte d'élite intellectuelle, si ce n'est simplement numérique, en tant qu'utilisateurs (alors que la plupart des machines 3D sont produites Outre-Atlantique ou dans d'autres pays européens...). Sans prétendre à une volonté supérieure qui souhaiterait évincer la main-d'œuvre qualifiée pour diluer les modes de production en proximité des citoyens, le développement de l'informatique se traduit déjà par des formes de soumission ou d'addiction pour nombre de personnes à la « fée » Internet, sans que leur créativité se manifeste particulièrement [217]. En effet, utiliser de manière professionnelle un logiciel ne peut être considéré comme un acte créatif !

Il existe cependant une attractivité évidente pour ce type de technologie, évidence amplifiée par le pouvoir (apparent) que l'on peut avoir sur la matière, quand se réalise rapidement sous nos yeux – presque malgré nous – une pièce que l'on a conçue ! De plus, à l'image des usages de l'informatique, on peut imaginer que les nouvelles générations seront capables d'utiliser avec habileté ces technologies 3D, sans avoir besoin de « lire le mode d'emploi » (pour autant qu'il en existe un jour). Les technologies du 3D-printing n'envisagent donc probablement pas les apprentissages approfondis, ni le ressourcement des acteurs, comme cela se pratique dans les entreprises avec les technologies d'usinage plus classiques (d'où l'intérêt des FabLab). Mais, dans le même contexte, en introduisant une dimension temporelle de plus en plus sensible dans notre monde pressé, Akrich [218] écrit : « *La technologie favorise toujours plus l'accélération du rythme de vie, elle façonne le rapport au temps, reconfigure les attentes sociales et le champ des possibles* ». Cet aspect n'échappera pas à la fabrication additive...

De manière générale, la modernité se caractérise par l'aspiration au dépassement de toutes les limites, par l'agrandissement incessant de l'espace des possibles, à travers l'appropriation croissante du monde par la technique, en créant de nouvelles sources de valeurs et, par suite, des compétences nouvelles [219]. En accédant aux technologies 3D pour des coûts d'achats modérés, est-on en train de changer la société ? La question de l'intégration d'une technologie dans le domaine social est souvent un défi majeur pouvant revêtir des dynamiques ambiguës avec soit des formes d'obscurantisme technologique, soit un rôle éclairé et responsable sur nos comportements [112]. Les propos suivants de Méda [220] entrent en résonance avec ce questionnement : « *En substituant le désir individuel subjectif au besoin – qui lui peut être objectif, collectif et dont on peut discuter – l'économie a, en même temps, rendu impossible la construction d'un bien commun. Et cela parce qu'elle a décidé souverainement que l'utilité ne pouvait être déterminée qu'à partir de la multiplication infinie des désirs, tellement spécifiques, incomparables et particuliers qu'il sera impossible de les agréger, voire de les comparer* »... Mais qu'en sera-t-il si les impressions 4D et le bio-printing se développent, l'une apportant des possibilités techniques nouvelles, l'autre des possibilités de réparation des organes et des tissus biologiques, voire des projets futuristes d'augmentation des performances humaines ?

3.4 Détournements : crypto-fabrication 3D

Selon Cyberland [221], le site Ghost Gunner (<https://ghostgunner.net/>) commercialise depuis août 2015, pour 1 500 US \$, une centrale de construction d'armes automatiques et semi-automatiques (!) ; et pendant qu'on y est, il est aussi possible d'imprimer en 3D ses propres munitions et de les customiser en fonction de l'usage que l'on souhaite en faire. Il existe plusieurs programmes accessibles et open source dédiés à l'impression 3D [222]. Comme pour les armes, les munitions imprimées ne sont pas référencées et demeurent donc non traçables. L'acquisition de machines personnelles autorise ce type de détournement, voire d'autres de domaine plus intime [223]. Le défi est de taille... [224] L'unique solution technique, comme pour les photocopieurs, serait de ne pas produire un objet tout à fait identique à la consigne numérique ; on comprend bien que cette proposition est illusoire. Alors, sans grand espoir, il est possible d'envisager de sensibiliser et de mobiliser l'ensemble des constructeurs d'imprimantes 3D pour éviter ce danger et trouver des solutions robustes. Ces derniers pourraient, par exemple, doter leurs machines d'un système de reconnaissance algorithmique des formes des pièces mécaniques entrant dans la composition d'une arme, et capable de bloquer automatiquement leur impression [222]. Malgré la réglementation et l'éthique [225], cet exemple illustre à l'évidence une difficulté pour la sécurité, parce que cette éventualité en est juste au stade des vœux pieux, sa faisabilité n'étant d'ailleurs pas démontrée. De plus, selon Koslow [226], pousser la technique à ses limites d'applications peut aller vers d'autres niches comme la réalisation de sex-toys [227].

Un autre risque réside dans le piratage des données. Il existe des projets pour la Défense, l'Espace, la R&D d'entreprises, etc. qui nécessitent un haut niveau de sécurité. Cet enjeu est primordial pour la fabrication additive qui s'appuie sur la numérisation de données de fabrication. Yosra [228] fait état de progrès déterminants dans cette quête de la sécurité numérique appliquée à l'impression 3D.

À retenir

- Le changement de paradigme organisationnel est un facteur d'innovation, de création de nouveaux métiers.
- Une certaine élite technologique se crée dans les FabLab.
- La liberté promise par l'impression 3D peut entraîner des détournements (crypto-criminalité, piratages, sex-toys, armes, etc.).

4. Les industriels

Pour Philippe Cadiou [229], « *il faut souligner une autre tendance du triomphe du capitalisme : l'alliance avec la Technique. À mesure que l'on sollicite la science pour réduire ou obtenir la suppression des coûts de l'Homme (pour faire baisser le prix de fabrication des marchandises), la science répond à la demande par le développement des machines et des systèmes d'automatisation. La concentration d'énormes moyens financiers dans la recherche et dans la robotisation des chaînes de production permet d'économiser le travail humain* ». Dans une activité de production de masse, plus le niveau de performance et de rentabilité des machines sont élevés, plus le travail disparaît et plus l'Homme se voit rejeté dans la sphère de l'obsolescence avec un haut niveau de chômage [49] [230] [231]. Le schéma de fonctionnement de FabLab, tel qu'invoqué par ITRE Committee [125], met en lumière le rôle important d'interface épaisse entre la société et la production.

Une technologie nouvelle, quelle qu'elle soit, ne détruit pas complètement le système de production précédent. Elle s'intègre et complète les modes plus classiques de production d'objets et de biens, voire de services. En particulier, elle permet de proposer, en principe, de très nombreuses solutions individuelles opportunistes fortement personnalisées (du moins en apparence), plutôt que des solutions standardisées (du moins en apparence). Il est donc attendu que les nouveaux procédés puissent se cumuler aux avantages des procédés existants dont la robustesse est avérée depuis de nombreuses années [232] [233].

4.1 Des lenteurs compréhensibles

Depuis des années, les fabricants d'imprimantes 3D mettent en avant l'intérêt de fabriquer ses composants en interne, au plus près des chaînes d'assemblage, pour une production plus économique, personnalisable et surtout plus flexible. Aujourd'hui, il n'est plus un grand groupe industriel qui ne dispose de machines de fabrication additive en interne, que ce soit pour familiariser ses membres à la technologie, pour faire du prototypage ou pour fabriquer des outils et accessoires d'aide à la production, voire produire des petites séries. Mais si les innovations, services et présences géographiques pourraient s'appliquer à n'importe quel domaine de la sous-traitance, la fabrication additive a une particularité : les industriels qui se lancent dans la production en série sont issus des secteurs les plus contraints, comme le spatial, l'aéronautique, l'automobile et le médical. Mais être sous-traitant d'impression 3D dans ces domaines coûte cher. « *Il s'agit de secteurs dans lesquels tout doit être qualifié : le procédé, la machine, la matière, voire même l'opérateur* » rappelle Hervé Michel cité dans Parisot [234]. « *Dans nos ateliers, une machine qui fabrique un appareil chirurgical doit être dédiée à cette production et il est interdit de l'utiliser* ».

avec une autre matière, au risque de contaminer la matière qualifiée. Du coup, dans nos usines, nous sommes obligés d'avoir d'un côté les machines de production et de l'autre les machines de développement. »

Aujourd'hui, en 2022, des experts considèrent que l'impression 3D pourrait remplacer l'ensemble du processus de production. Mais pour le moment, le plus grand potentiel tient à la fabrication de lots réduits de produits de petite taille [235]. Selon Sculpteo [236], le nombre d'applications industrielles se développe considérablement. La figure 11 issue de cette référence donne une idée de ces applications. McDermott et al. [237] (repris ultérieurement par Stevenson [238]) montrent que dans certaines situations de la chaîne d'approvisionnement, l'entreprise peut manquer de quantités modérées d'éléments fabriqués qui peuvent être produits par fabrication additive. Dans ce cas, elles peuvent coûter un peu plus cher que celles produites par des voies traditionnelles. Mais si l'alternative est de ne pas avoir de pièces, il peut alors être avantageux d'utiliser « en sécurité » la fabrication additive. Avec la pandémie de Covid-19, les chaînes d'approvisionnement déjà fragiles ont été profondément désordonnées, renforçant ainsi la dynamique de développement de l'impression 3D dans les industries mécaniques. D'un point de vue organisationnel, cela se traduit par des compromis entre des configurations centralisées et distribuées de fabrication, entre Taylor et l'artisan...

Un premier élément bloquant pour Chicheportiche [239] vient, selon Sculpteo [236] qu'il cite, de ce que pour 40,7 % des répondants à cette enquête, la formation et l'éducation sont des critères essentiels pour que l'industrie puisse se développer. « De fait, 14 % des répondants estiment que le manque de formation est un obstacle à l'utilisation accrue de l'impression 3D. D'ailleurs, 60 % ont appris sur le tas. »

Reste un autre problème : le processus de qualification dans un domaine comme le spatial dure plusieurs années, et les volumes de production sur une machine qualifiée sont modestes, de l'ordre de 20 pièces/an pour une pièce d'Ariane réalisée par « Volum-e », une entreprise de pièces par fabrication additive. Autant dire que le retour sur investissement est difficile à assurer. Au final, après avoir investi dans des capacités de R&D, des usines et des parcs de machines, les sous-traitants en fabrication additive se retrouvent avec des machines sur lesquelles les volumes de production sont généralement faibles (dans l'aéronautique et le spatial du moins [234]. Certes, il y a une demande forte car l'industrie est à

la recherche de compétences avancées en impression 3D. Il lui est nécessaire de tester différentes technologies pour choisir la plus adaptée à ses besoins. Mais quand la technologie 3D devient maîtrisée, les industriels internalisent généralement cette activité. Il appartiendra alors aux nombreux sous-traitants de chercher de nouvelles valeurs ajoutées (innovation, temps de réponse, prix, etc.), sous peine de disparaître ou d'ubériser le domaine. Cette situation doit donc être prise en compte pour tenter de comprendre le développement industriel des procédés de fabrication additive dans une dynamique à deux chiffres et avec l'apparition de nouveaux matériaux imprimables et de nouvelles machines (obsolescence rapide sans que le retour sur l'investissement soit évident).

L'idée de l'Industrie 4.0 [49], dans laquelle est intégrée la fabrication additive, dépasse le simple développement de l'industrie vers davantage d'automatisation. Il serait possible d'évoquer le sort futur de l'industrie à la manière de l'économiste Jean-Louis Levet [240] en soulignant qu'elle ne disparaît pas, mais qu'elle se transforme et que ses frontières s'élargissent. Les progrès des technologies digitales et leur disponibilité à des coûts raisonnables ont, en effet, le potentiel de rendre la production industrielle plus flexible, d'augmenter sa productivité et de développer de nouvelles offres à forte valeur ajoutée [241]. Le développement de nouveaux modèles d'affaires (marketing, vente, service, exploitation, entretien), et une innovation technologique forte [242] se traduit par des critères spécifiques qui sont, en principe, bien adaptés à l'impression 3D sont donc les suivants [243] :

- avantages sur le marché grâce à davantage de rapidité ;
- gain en efficacité et en efficacité ;
- augmentation de la capacité d'adaptation et de la flexibilité ;
- avantages en termes de coûts ;
- ouverture à de nouveaux champs ou modèles d'activité ;
- cohésion entre production de masse et fabrication (apparement) personnalisée.

4.2 Stratégies d'attente et ouvertures

Une stratégie définie comme celle des *Fast seconds*, des « suiveurs rapides » [244] peut être mise en place par rachat des auto-entreprises ou des PME issues des makers. Diversifiées, ces organisations légères peuvent assumer quelques turbulences et récupérer une maîtrise technologique. Mais le vrai défi pour les grandes entreprises est d'affronter un nouveau marché composé de jeunes entrepreneurs, quand les responsables des grandes entreprises sont des personnes de 45-65 ans. Cela peut constituer une réelle tension pour eux quand ils se trouvent face à des dirigeants de startups qui ont, par exemple, moins de 30 ans. Elles ne peuvent pas facilement réformer (reformer) leurs méthodes de travail pour travailler comme des startups, mais cela ne doit pas les empêcher d'être réactives vis-à-vis du marché [245]. Le mouvement des makers, qui prend de l'ampleur, réunit des personnes, au sein de maker-spaces ou de FabLab, qui considèrent souvent l'innovation libre comme un processus de développement communautaire, reposant sur le partage et la culture open source. Que faire ?

Selon Maddyne [246], Dassault Systèmes a ainsi apporté son aide à des startups développant des produits capables d'améliorer la vie quotidienne, l'environnement urbain ou les modes de vie. Les startups sélectionnées auraient bénéficié d'un programme d'une durée de 1 à 2 ans donnant accès à 3DEXperience, une plateforme de solutions logicielles, à des compétences techniques et à l'accompagnement de la part de cette entreprise sous forme de tutorat. L'écosystème mondial de Dassault Systèmes aide également ces jeunes pousses à accélérer le lancement de leurs produits et participera à leur essor international. Il y a donc par cette voie un vrai soutien des idées originales pour aider à leur promotion, mais aussi un début de mutualisation d'intérêt et de partage, voire de récupération bien comprise.

Offrir cette intégration c'est, de manière cynique, autoriser une prise d'information en termes de demande sociale et de marchés à développer en utilisant des savoir-faire, mais surtout utiliser les

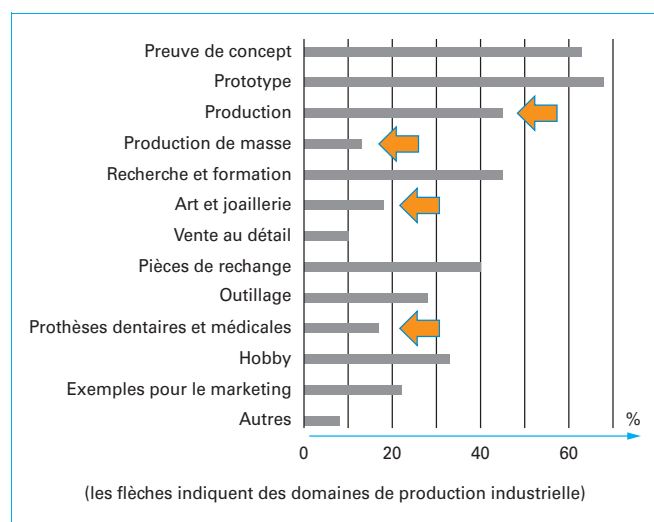


Figure 11 – Activités industrielles de l'impression 3D (enquête de Sculpteo [236] auprès d'industriels avec plusieurs réponses possibles)

relais comme système de prise d'information à faible coût (ce que d'aucuns appellent du gagnant-gagnant...). On sait que l'innovation ouverte permet, par le développement d'une perméabilité entre entreprises et utilisateurs, le passage d'une innovation libre à des produits commerciaux [247]. L'utilisateur, dans ce cadre, est alors considéré comme un agent déployant une activité mobilisant ses compétences spécifiques, en vue d'une fin applicative. Mais pour Maurin [248] : « Il est tout à fait illusoire d'imaginer pouvoir aider spécifiquement un individu ou l'inciter à adopter tel ou tel comportement, sans entraîner en même temps une vague de réactions et d'adaptations parmi les personnes dont la vie est liée à lui, qu'il s'agisse de la famille, de collègues ou de voisins. De proche en proche, ces réactions en chaîne finissent par dénaturer l'action initialement entreprise : elles lui font toucher d'autres cibles que celles qui étaient fixées au départ. Quant à la cible initiale, elle est atteinte, mais d'une façon très différente que prévu ». Soit il faut du temps pour propager une évolution sociale dans un cadre technologique nouveau, soit il est récupéré par le « système » en jouant sur le conformisme ambiant...

4.3 La fabrication (pièces uniques ou production de masse)

Selon Coulet [249], plus de 7 technologies 3D et plus de 250 matériaux (polymères, métaux, minéraux pulvérulents ou fluides, matériaux organiques dont des substances biocompatibles) sont disponibles pour permettre aux entreprises de bénéficier des avantages des systèmes de fabrication additive : rapidité de production et de mise sur le marché ; production d'objets et formes complexes qui dormaient dans les cartons des bureaux d'étude ; « mass-customisation » des produits ; optimisation des coûts et des stocks. Le virage est en fait double [40]. D'abord, il est lié à la démocratisation des technologies et la pénétration domestique des imprimantes, avec un marché en devenir. Sur ce sujet, Bojanova [250] estimait qu'il faudrait entre 5 et 10 ans pour définir un marché domestique stabilisé, contre quelques années pour les productions industrielles. Comme cela a déjà été rappelé, dans l'instationnarité du développement du domaine, ce chiffre ne peut être que qualitatif. Ensuite, il est lié à la capacité de production industrielle : les dernières avancées technologiques permettent de lever de nombreux obstacles à la production de grandes séries faisant sortir la technologie encore cantonnée au prototypage rapide de pièces (1 à 10 pièces prototypes) dans un nouvel espace économique, réintégrant du même coup le système économique ancien (figure 11). La volonté de certains constructeurs de machines est de pouvoir concurrencer l'injection plastique ou la fonderie métallique en termes de volume, de cadencement et de coût de production.

Encadré 3 – Produire plus vite (mais bien) avec l'impression 3D

Il s'agit d'utiliser la fabrication additive dans la phase de conception pour réduire les temps de fabrication et multiplier les itérations pour arriver à un niveau de détail extrêmement fin, à l'exemple de ce qu'a réalisé Ford aux USA [251]. Pour illustrer ce gain de temps, Raynal signale que Ford s'est appuyé sur un exemple concret, en faisant circuler un petit volant lourd et un autre modèle plus grand et beaucoup plus léger. Auparavant, un prototype de volant nécessitait deux semaines de travail. Avec l'impression 3D, seuls 2 jours et demi suffisent en n'utilisant que les matériaux nécessaires. « Grâce aux techniques de fabrication additive, le constructeur automobile a également été capable de présenter en 2013 le modèle Mondeo Vignale au salon automobile de Francfort. C'est grâce à l'impression 3D que nous avons pu ajouter les pare-chocs avant et arrière. Nos outillages pour la production en série n'étaient, eux, pas encore prêts », raconte Bruno Alves, cité par Raynal. Autre application de l'impression 3D chez Ford : la possibilité de réaliser des moules pour la production de pièces en série.

« Actuellement, nous sommes dans un entre-deux qui ne permet pas de produire 1 million de pièces avec une vraie rationalité économique, mais d'ores et déjà plusieurs milliers sont envisagés sans trop de risques. Lorsque l'impression 3D parviendra à allier le triptyque « rapidité, volume, prix », c'est un tout un pan de l'industrie qui s'en trouvera profondément bouleversé. Cet horizon n'est probablement pas si lointain, et comme tout changement technologique, il nécessite une prise de conscience et une anticipation en termes d'investissements financiers, humains et de formation, voire de modifications culturelles » [252]. Pour autant, de petites séries de systèmes high-tech ou de pièces complexes commencent à se développer [253] [254].

L'impression 3D peut remettre en cause le concept de chaîne logistique et ses conséquences pourraient être nombreuses : production en flux tendus, réduction du stockage (sauf celui des matières et des matériaux utilisés en impression 3D), diminution des coûts de transport et d'énergie (encore à démontrer, pour autant qu'on puisse réaliser des objets fonctionnels en bonne matière). Selon Branche [255], « la totalité de cette chaîne deviendrait même obsolète. Les possesseurs d'imprimantes 3D n'ont qu'à modéliser leur pièce ou à récupérer un fichier 3D pour fabriquer leur propre objet, court-circuitant ainsi tous les intermédiaires habituels. C'est ainsi que la philosophie basée sur le Do It Yourself, l'open source, c'est-à-dire le partage de l'information, alliée à la généralisation des technologies numériques auxquelles la fabrication additive se rattache, a donné naissance au mouvement des Makers et aux FabLab ou atelier de fabrication 3D ».

Sur cette base, certains pensent que ce ne seront plus les industriels qui fabriqueront les objets, mais les consommateurs eux-mêmes ou les makers, dans des FabLab de proximité grâce à des fichiers 3D téléchargeables, fournis par l'industriel lui-même ou issus d'open sources sur Internet. Alors, un produit pourrait devenir l'égal d'un fichier. Si la réalisation de pièces en bonne matière est possible, la production, ou une partie de celle-ci, pourrait être relocalisée sur le sol national, dans son garage (!), permettant de gagner en frais de transport (limité dans ce cas à la transmission informatique d'un fichier). Il est donc important de regarder de près l'évolution de la technologie 3D qui peut faire basculer en partie les modes de production (avec peut-être moins d'emploi) et le e-commerce. Toutefois, réaliser une pièce d'un dispositif (électroménager, machine, véhicule, etc.) est une chose, assembler des éléments en est une autre. D'où d'ailleurs l'idée attractive d'impression 4D qui aura peut-être un futur... Ceci est une autre histoire à fabriquer, avant de la raconter !

4.3.1 L'innovation technique

Bernard Stiegler [129] fait le lien entre l'innovation contributive et la figure montante de l'amateur éclairé. Il rapproche le producteur et le consommateur, pour créer un ensemble de « contributeurs actifs » qui échangent leurs savoirs sur le réseau. Si certains makers embrassent les idéaux d'une production solidaire, du logiciel libre, des entrepreneurs, investisseurs et avocats en propriété intellectuelle mettent tout leur poids dans la mise au point de machines correspondant à une vision diamétralement opposée. Ils développent pour leur part des machines réelles standardisées « prêtes à imprimer » qui doivent s'acheter comme des biens de consommation ; la machine elle-même ne pouvant fabriquer que des objets standardisés, avec de petites variantes. Cette évolution conduit donc à se demander si, sur un marché porteur caractérisé par des évolutions technologiques rapides, un challenger, devenu leader à la suite d'une petite rupture technologique (à l'exemple de Carbon 3D [256] [257]) a intérêt à perturber volontairement le marché ou au contraire à verrouiller sa position. Ce dilemme tient au fait que dans la période qui suit la rupture, l'innovation, le nouveau leader sur un des créneaux de la fabrication additive qui a mis en place de nouvelles normes se trouve face à un choix stratégique :

- soit verrouiller le marché et investir dans la norme dominante, avec le risque de se voir « agressé » par des challengers voulant l'imiter pour le supplanter, ainsi que par les leaders déstabilisés. Dans ce cas, il risque d'oublier ce qui a fait sa réussite et s'expose à sa propre stratégie de succès ;

- soit re-déverrouiller le marché pour maintenir sa position en anticipant des risques de déstabilisation. Il mise sur un avantage pionnier et s'estime doté d'une capacité technologique suffisante pour entretenir une perturbation permanente et contrôlée.

Cette problématique invite les dirigeants innovateurs, qui sont, pour beaucoup, de petites entreprises (en dehors des deux leaders principaux de machines 3D) à réfléchir sur les actions à mener lorsque l'entreprise évolue dans un environnement turbulent et mouvant, difficile à prévoir et à contrôler [252]. De son côté, Couto [258] montre que des startups peuvent émerger avec succès du monde académique à partir d'une demande externe sensibilisée par l'attrait du nouveau avec un pilotage par des entreprises (stimulation) et plus rarement par l'interne (spontanéité).

4.3.2 L'innovation organisationnelle

En introduction, le lecteur pourra consulter les travaux de Chatterjee et al. [259] ; Abbas et al. [260] à ce sujet.

En intégrant au plus près les boucles rétroactives des utilisateurs, des makers et la capacité à tirer profit des effets de réseaux de communication, il y a possibilité, pour les entreprises de grande taille, d'exploiter la redistribution des capacités d'innovations à tout l'écosystème, quitte à reprendre en interne les idées dans un contexte de re-concentration. La structuration organisationnelle intègre, à la fois, une veille active de la part des grandes entreprises, une vision et des processus non coordonnés apportant inconnu et sérendipité de la part de structures plus informelles. Elle constitue un intermédiaire entre la filière industrielle organisée et un marché totalement ouvert [261].

Cette association correspond bien à des rencontres entre intérêts des deux composantes, sans que la structure « souple » des hackers (pour autant qu'elle existe en tant que telle) ait été, en général, à l'origine de l'association. En effet, selon Forgeard [262], c'est bien à l'entreprise d'assurer la coordination de l'outil de recherche spécialisé. Mais il écrit : « Cette coordination n'est pas évidente, car lorsque de nouvelles technologies arrivent, comme par exemple la fibre de carbone, tout le monde veut s'en emparer pour en faire un vecteur de développement. Cela devient finalement un vecteur de désérialisation ». Juste retour des choses à un attentisme de prédateur !

Encadré 4 – Perturbations sur la conception

Malgré un impact économique actuel encore modeste, pour Notteau [263], l'impression 3D aura un effet perturbateur majeur sur l'industrie de la conception et la construction. À titre d'exemple, un premier fabricant de robinets commercialise un produit imprimé en 3D ; de même la FDA (*Food and Drug Administration*) aux USA a accepté la commercialisation d'un médicament contre l'épilepsie réalisé, pour sa mise en forme, par cette technologie [264]. C'est une première mondiale pour le laboratoire américain Aprelia Pharmaceuticals qui fabrique par impression 3D le médicament particulièrement poreux, qui se dissout en moins de 5 secondes, contre 40 pour un médicament classique [265].

Un nouveau modèle d'entreprise plus efficace pour la conception sur mesure a vu le jour (chaussures, habillement [266], bijoux [267] [268], habitat [269], nourriture [F 3 100], BTP [270]), vision prospective d'une installation de dépollution de la mer réalisée avec les matériaux plastiques présents [271], etc.). Les technologies 3D permettraient de réduire les stocks découlant de la production de masse tout en ouvrant un nouveau monde pour la conception et la fabrication. Un exemple de niche peut être cité : en introduisant un déterminisme dans la fabrication de mousses, il y a possibilité de créer des semelles de chaussures personnalisées, dédiées à une fonctionnalité particulière (à la différence des mousses dont la structure est liée de manière globale à l'énergie fournie, en particulier d'origine chimique) [272].

Indépendamment de ces aspects qu'il ne faudrait pas négliger par l'exploitation de niches applicatives originales, le processus démocratisé la conception par fabrication additive. La fabrication se décentralise, ce qui finira par bouleverser l'industrie du design et de la construction, et beaucoup d'autres secteurs, comme peut-être l'alimentation demain [273] [274] [F 3 100].

4.3.3 L'emploi salarié

Les divagations qui entourent la promotion commerciale des imprimantes 3D, selon lesquelles cette « révolution » permettra à des ouvriers licenciés de retrouver un emploi créatif et innovant en se reconvertissant en makers indépendants [75] [76], n'ont de sens que si l'on occulte l'histoire industrielle de ces outils [275]. Elles font l'hypothèse qu'il est possible de respecter ce commentaire de Dupuy [276] : « La technologie qui se profile à l'horizon [...] vise précisément à la non-maîtrise. L'ingénieur de demain ne sera pas un apprenti sorcier par négligence ou incompetence, mais par finalité ». Or, l'origine des innovations de rupture est plutôt issue de la science (figures 4 à 6), et ce n'est qu'après, dans le secteur aval, qu'on peut trouver comment disposer de « joueurs de l'électronique », de « pianistes du numérique », de « bidouilleurs ». Ils peuvent apporter une certaine créativité incrémentale qui, à la fin, entrera de manière rationnelle dans les contraintes de la connaissance du réel et du possible et qui seront intégrés dans les banques de données des logiciels libres... Ils mettent en cause le modèle linéaire de l'innovation.

La fabrication individuelle permettra peut-être à certains ouvriers de renouer sur le territoire national avec un certain savoir-faire et l'inventivité, mais c'est oublier que les emplois de base en usine n'ont pas toujours été aussi routiniers et générateurs de troubles au travail (d'ailleurs tous ne le sont pas), et que c'est cette même technologie – qui contribuerait, nous dit-on, à réintroduire des métiers à compétence dans l'économie – qui a rendu le travail de production en usine si terne. Citton [277] introduit le concept de média-sphère qui est le « pendant nécessaire de la chaîne de production industrielle : pour que les usines puissent écouler les biens matériels qu'elles fabriquent à grande échelle, il faut que les médias fabriquent les subjectivités désireuses de les acheter ». Les makers ne sont donc probablement pas les héritiers du mouvement ouvrier, comme ils ne sont pas des révolutionnaires technologiques : ils sont plutôt le résultat historique de la négation apparente de ce mouvement ouvrier s'impliquant dans une nouvelle mode ou sur un nouveau marché économique auquel on associerait des bases idéologiques nouvelles... C'est sans doute vers l'analyse des nouvelles méthodes de fourniture de services, via les nouvelles technologies de la communication, qu'il faudrait aller [278].

Mais, si l'on accorde un peu de crédibilité aux études de prévision des emplois effectuées par différentes sources [279] [280] [281] [282] [283], il est envisagé qu'environ 50 % des emplois non qualifiés disparaîtront au profit des robots dans les prochaines années, ce qui fait dire à Brynjolfsson et McAfee [282] : « La population des chevaux a accepté son inconvénient économique sans un murmure de protestation (pour autant qu'on puisse le dire). Si la même chose arrive aux travailleurs humains, ils risquent de ne pas être aussi humbles ! »... D'un point de vue cynique et provocateur, Anna Salomons [284] complète la réflexion et écrit : « Traiter les employés comme des robots érode leurs gains de productivité, ce qui conduit à introduire [dans l'économie] de vrais robots. » Avec le développement sans précédent du numérique [86], en retour partiel, les imprimantes 3D peuvent redonner un peu de souffle à des emplois dans certaines niches applicatives, sans doute sans être capables de combler le déficit envisagé, mais avec des critères de compétences nouveaux.

Pour son rapport consacré au « Futur des emplois », le Forum économique mondial [285] avait choisi un chiffre choc : plus de 5 millions d'emplois risquaient d'être supprimés dans les quinze principales puissances économiques mondiales d'ici à 2020. Le document détaillait, par secteurs et par pays, les créations et les destructions de postes anticipées par les dirigeants et les responsables des ressources humaines de 2 450 entreprises dans le monde. Selon eux, la « quatrième révolution industrielle » (terme de l'édition 2016 du

Forum) aurait dû entraîner la création de 2,1 millions d'emplois nouveaux en cinq ans, mais aussi la destruction de 7,1 millions de postes en raison des sureffectifs, de l'automatisation et de la désintermédiation des emplois... On ne connaît pas encore les effets à moyen et long terme de la pandémie de la Covid-19 sur les emplois. Selon Bohineust [286], la crise aurait détruit 114 millions d'emplois en 2020 dans le monde ; selon Ducoudré et Madec [287], la France aurait retrouvé pour le moment une situation positive d'emplois, avec réduction partielle du chômage.

Selon Rumpala [190], ce type d'outil de fabrication additive, dans ses configurations domestiques ou artisanales, est de nature à déstabiliser la valeur travail qui a accompagné le développement de la société industrielle depuis le XVII^e siècle. Si la consommation se reporte vers une autoproduction, cela peut inciter un certain nombre d'individus à réduire le niveau de revenu recherché, *a fortiori* dans un contexte économique où l'obtention d'un emploi stable et rémunérateur devient de plus en plus difficile. Cela pourrait même aller jusqu'à toucher le marché du travail dans son ensemble, comme l'ubérisation récente ayant entraîné quelques désordres dans les transports privés urbains, marché qui pourrait alors entrer dans une phase de transition, voire de rupture [278]. Ces dernières années, les entreprises ont pris conscience du rôle joué par la créativité dans la réindustrialisation et l'élaboration de nouveaux modèles d'affaires. L'entrepreneuriat et des innovations comme la fabrication additive font partie d'atouts potentiels contre la crise et les moteurs de la relance économique. De fait, avec le 3D printing, les besoins en main-d'œuvre ne seraient plus les mêmes, spécialement dans les industries manufacturières qui perdraient sur certains pans de la production leurs débouchés et donc leur raison d'être. Et au plan individuel, si chacun peut se fabriquer ses propres objets, même dans un supermarché [288], cela peut réduire la nécessité d'avoir un emploi salarié à temps plein. On pourrait alors assister à une désintensification des activités marchandes et à une redistribution des flux monétaires, voire au tarissement de certains. Ce processus est donc à suivre...

4.4 Propriété intellectuelle

En introduction, le lecteur pourra consulter les travaux de Vogel [289] et Ballardini [290] à ce sujet.

Toute technologie qui semble être de nature à déstabiliser l'ordre établi subit des critiques et des blocages, spécialement de la part de ceux qui pouvaient bénéficier de cet ordre ancien. S'agissant de l'impression 3D, un des fronts qui a commencé à s'ouvrir est celui qui touche au régime de la propriété intellectuelle. Ces questions sont importantes pour les entreprises et acteurs économiques qui espèrent naturellement un gain financier de leur production. Certaines industries peuvent, en effet, craindre de subir le même sort que les industries de la musique et du cinéma suite au développement des technologies de partage, voire de piratage de fichiers. D'autant que la technologie des scanners 3D a aussi connu un développement notable et qu'ainsi, il est devenu possible de numériser des objets sous forme de fichiers numériques (voire maintenant à partir d'un simple smartphone). Si la reproduction des objets devient plus facile, tirer un profit de la vente de ces mêmes objets risque en revanche de devenir plus difficile pour ceux qui en étaient les producteurs traditionnels. Les industriels ne vont probablement pas tarder à dénoncer de nouveaux types de piratages [190]. Mais ces outils décuplent nos capacités de création et de coopération, et ils interrogent, de fait, les notions de possession et de consommation.

Pour les makers et les utilisateurs des FabLab, en dehors de l'utilisation de données et de logiciels libres, l'exploitation par exemple de *Copyright* (autorisation donnée par un auteur d'utiliser, de modifier et de diffuser son travail, dans la mesure où cette autorisation reste préservée) ou de *Creative Commons* (organisation à but non lucratif qui a pour dessein de faciliter la diffusion et le partage des œuvres tout en accompagnant les nouvelles pratiques de création à l'ère numérique) peut permettre une intégration plus sereine dans l'économie (cf. par exemple, Imberman et Fiddler [291]).

« L'économie collaborative interroge et défie les frontières du droit, elle met au jour des brèches dans l'architecture juridique, elle se développe presque toujours dans des zones de flou juridique qui ne peuvent perdurer. Ainsi, le droit se retrouve comme un glaive à double tranchant pour l'économie collaborative. Le cadre juridique permet le développement de cette économie nouvelle mais il fait, en même temps, peser des risques que les nouveaux acteurs s'efforcent de contourner ou de résoudre. Il est normal que dans nos sociétés de mutation, l'innovation précède le droit. Encore faut-il que ce dernier s'y adapte, et que les modèles innovants anticipent eux aussi cette adaptation. » [292]

4.5 Normes et démarche qualité

Les normes sont conçues pour garantir la qualité des produits, des services et des systèmes. Elles ne sont pas un frein à l'esprit d'entreprendre, mais elles servent de garantie et, par suite, à crédibiliser les productions, dont celles issues des technologies 3D. Ce souhait de légitimation est un excellent stimulant à la recherche et à la définition de bonnes pratiques. En conséquence, les normes fixent des règles dans un secteur spécifique, en particulier elles sont utiles dans un domaine en pleine croissance qui nécessite de la confiance de la part des utilisateurs. Rappelons qu'elles sont définies par des experts (normalement majoritairement du domaine 3D) dont l'expertise impose un consensus entre les acteurs impliqués dans la normalisation.

Selon Magistrelli [293], la normalisation conduit à définir un standard permettant déjà de regrouper les technologies et les matériaux par familles et de différencier chaque acteur de ses concurrents. Avec des procédés par couche ou par addition, le procédé peut avoir un effet sur les propriétés des objets 3D (forme, performances mécaniques, anisotropie, etc.). Cet auteur considère que les pièces réalisées par fabrication additive ont des propriétés différentes des pièces conventionnelles issues de fabrication soustractive. « Cette caractéristique constitue un obstacle à la qualification de la technologie dans des applications critiques. » L'élaboration de normes aide ainsi à résoudre ce problème. Ce chantier important est en cours, prenant en considération à la fois la qualification des opérateurs, la performance des machines et des matériaux avec la conduite de la production.

De nombreux groupes de normalisation agissent pour atteindre les objectifs résumés ci-dessus [294] [295] [296] [297] [298] [299]. Selon Sprinkle [300], les cinq principales normes dans le domaine 3D sont :

- Terminologie standardisée pour les technologies de fabrication additive ([F 2 792]) ;
- ISO/ASTM 52900 – Terminologie pour la fabrication additive – Principes généraux – Terminologie ;
- Spécification standardisée pour la fabrication additive (lit de poudres fusionné thermiquement) utilisant des poudres de Titane-6 Aluminium-4 Vanadium ([F 2 924]) ;
- ISO/ASTM 52901 – Fabrication additive – Principes généraux – Exigences pour les pièces achetées en fabrication additive ;
- ISO/ASTM 52910 – Lignes directrices pour la conception par fabrication additive (ISO/ASTM 52910).

Il reste donc encore beaucoup à faire...

À retenir
<ul style="list-style-type: none"> • Lenteur des pouvoirs à engager de nouvelles formations technologiques centrées sur l'impression 3D ; réalisation de ces dernières par les industriels. • La bataille entre brevets, procédés, entreprises continue avec la demande forte d'emplois spécialisés 3D. • Destabilisation des modes de production avec une normalisation en cours. • Risques de piratage sensiblement identiques à ce qui se passe dans le numérique. • Existence de faiblesses juridiques.

5. Fabrication additive et Covid-19

« La crise met en lumière l'acuité des défis. Ajoutons la prise de conscience de la domination de géants industriels chinois et américains, révélant l'importance cruciale de la maîtrise de nos chaînes d'approvisionnement et des grands processus techniques qui conditionnent nos vies... » [301]. En dehors de ce cadre général, confinements, fermetures temporaires d'entreprises, licenciements, crises d'approvisionnement, déconfinements partiels, épuisement du personnel médical, absence de matériels de soins et de masques de protection contre le virus, pertes de repères et de confiance, etc. ont fait partie des problèmes à traiter durant la première phase de la pandémie. Pour une part, ce monde dérégulé et démuné a permis l'émergence de personnes libres, volontaires, engagées dans l'aide au corps médical, utilisant en particulier la fabrication additive et les réseaux internet pour produire des équipements d'utilité publique. Les mots-clés tels que « aide », « invention avec les produits disponibles », « débrouillardise » et « production d'équipements » ont circulé avec l'enthousiasme de ceux qui se sentent utiles. L'innovation nécessaire a été facilitée par des personnes hautement qualifiées, avec des formations précises, dont beaucoup participent au fonctionnement des FabLab.

Les humains sont par nature des êtres sociaux ; ils ont une tendance naturelle à communiquer « socialement » avec tout ce qui les entoure : personnes, animaux domestiques, mais aussi machines, en particulier numériques. L'enfermement associé à la crise de la Covid-19, en particulier lors de sa première vague, a perturbé cet état et a donné pour un temps une place éminente à la fabrication additive pour fabriquer dans l'urgence des éléments d'utilité sanitaire [302] [303] [304]. Grâce à une personnalisation poussée de la conception, à une fabrication rapide, à l'élimination des procédés industriels avec ses longues chaînes de montage et à des délais de fabrication réduits au minimum, la fabrication additive, avec de nouvelles alliances et des coopérations spontanées [305], a pu combler une partie du vide de la chaîne d'approvisionnement, avant que les chaînes de production de masse redémarrent. Le rapporteur de cet article rappelle avec justesse que les FabLabs peuvent participer à des relocalisations, permettent des livraisons plus rapides, des fabrications personnalisées. La communauté de la fabrication additive a rejoint la lutte contre la Covid-19 en produisant des composants pour des équipements médicaux tels que des ventilateurs, des écouvillons nasopharyngés et des EPI (équipements de protection individuelle) tels que des masques et des écrans faciaux [306].

La pénurie mondiale d'articles essentiels, transformant de nombreux pays en environnements à ressources limitées, a été partiellement compensée grâce à un nombre sans précédent de bricoleurs non profanes qui ont commencé à utiliser des outils de fabrication numérique pour produire des articles essentiels [307]. Pour Tempelhoff [308], la crise a pu être limitée par le biais d'e-réunions (dont l'emploi va très largement au-delà des makers et rendu plus facile par des hébergeurs), de flux croissants d'informations sur les médias sociaux en ligne, de nombreuses auto-évaluations et d'échanges informels. Pour autant, cette période a été marquée par une prise de conscience croissante de soi, qui ne manquera pas d'avoir un effet profond sur la façon dont nous allons évoluer à l'avenir. Dans cette période, la pénurie de matériels adaptés à la lutte contre le coronavirus a été une évidence, avec des demandes diffuses de la part du corps médical (traduit par un très grand nombre d'appels au secours parfaitement compréhensibles). [Pour avoir très modestement participé à cette aventure incluse dans une sorte d'économie de survie (ou du « gazogène »), il a déjà fallu y voir un peu plus clair dans les demandes des métiers de santé : nature des matériels à réaliser, compatibilité des matériaux vis-à-vis d'un usage sur les humains, performances techniques, conformités, et surtout quantité d'éléments à produire par jour,

etc.]. À partir de cette phase d'apprentissage et de clarification, également après recherche des stocks de matière accessible, il a été possible de fournir au corps médical différents types d'équipements de prévention contre les risques induits par le virus.

La nature de la demande a été précisée. Des FabLab qui disposent de leurs propres critères de liens avec la société, des unités de recherche académiques, des indépendants ont participé à des productions de manière volontaire, mais généralement autorisée par leur hiérarchie (car il fallait bien accéder aux machines des unités de recherche ou de l'industrie). Il s'agissait aussi de permettre à des agents, dont un certain nombre d'entre eux étaient confinés, de se déplacer dans des conditions acceptables et autorisées d'un point de vue sanitaire et réglementaire. Le réseautage extraordinaire a permis d'innover en termes organisationnels et de production, mais en nécessitant de travailler la matière disponible et d'avoir des contacts avec des utilisateurs dans l'urgence, cependant il a bien fallu sortir de l'enfermement réglementé [309]. Ainsi, dans la première phase de la pandémie, pour lutter contre des ruptures d'approvisionnement et des pénuries à l'échelle mondiale [310], on a pu observer le pouvoir de la fabrication localisée et la nature entrepreneuriale de personnes motivées à une échelle allant du maker individuel disposant d'une imprimante 3D « dans son garage », en passant par certains industriels et des réseaux de makers qui se sont organisés en tant que fabricants (FabLab), jusqu'aux universités utilisant les compétences de leur personnel volontaire, de leurs étudiants et de leurs ressources, et aux organisations plus classiques. De grands efforts ont été déployés et une coopération informelle et presque gratuite s'est instaurée pour faire face à la pandémie et au besoin aigu d'équipements de lutte contre la pandémie qui ne pouvait être satisfait par les voies de fabrication existantes, en raison de l'allongement des délais, de l'absence de planification, de la concurrence des autres pays et d'achat de ces équipements par le gouvernement... et d'autres facteurs associés [306].

Dans le même temps ou presque, vu l'ampleur de la crise, le Covid-19 High-Performance-Computing consortium a été mis en place aux USA (puissance de calcul de plus de 400 petaflop/s). Il s'agit d'utiliser la puissance disponible pour accélérer la recherche sur le virus. Dans le même temps, l'Europe a mis en place une filière d'urgence (initiative PRACE) pour soutenir des projets de recherche pour limiter les impacts de la maladie [311]. Il serait intéressant de disposer des coûts de ces opérations « lisibles » relativement aux actes plus diffus, moins inaugurations, réalisés dans les FabLab et par des volontaires à titre gracieux !

Mais le constat de l'auteur est que, dès la fin de la première phase, le retour dans les laboratoires de recherche (pour ce qui le concerne) s'est opéré avec des règles de protection indispensables, mais sans qu'existe une volonté de capitaliser sur les innovations induites par les ruptures créées par le désordre relationnel, une économie de la débrouille astucieuse, de l'échange généreux via les réseaux sociaux, etc. Bref, pour l'essentiel, cette non-valorisation s'est traduite par un retour à la vie d'avant 2019, juste avant la crise ! Or, avec la pandémie de la Covid-19 se pose le défi de planifier l'avenir dans un contexte d'incertitude extrême tout en disposant des technologies de la quatrième révolution industrielle. Celles-ci peuvent changer notre façon de vivre, d'apprendre et de produire à un rythme nouveau et révolutionnaire. Ces changements à opérer, dans un contexte d'incertitudes, de mutations politiques et de problèmes environnementaux devraient amener les dirigeants à sortir d'une navigation à courte vue. Pour atteindre cet objectif de survie de leurs entreprises, les industriels ont besoin d'outils pour les aider à comprendre l'avenir au-delà du court terme et à planifier leurs activités en conséquence [11]. Mais par où commencer ?

Pour WEF [312], il est important d'examiner l'existence de systèmes adaptatifs complexes, qu'ils soient naturels ou créés par l'Homme, systèmes pouvant avoir des comportements exponentiels. À l'exemple de la fabrication additive, les tendances exponentielles ont commencé lentement, voire de manière imperceptible,

mais se renforcent depuis 2012-2014 pour changer la donne (même si la crise a vu une baisse de la progression économique de la fabrication additive selon Metal-AM [65]). Par ailleurs, l'histoire du numérique est illustrée par des progrès dans les axes suivants : interaction, information et calcul (avec la possibilité d'utiliser des logiciels libres [313]). Le choix d'impliquer de plus en plus le numérique, s'il est envisageable dans les processus industriels, est donc potentiellement porteur.

Encadré 5 – Un témoignage

Selon Fally et Viseur [314], au plus fort de la crise, le manque d'équipements (masques FFP2, respirateurs, etc.) fut problématique (au moins) pour les soignants. Des dynamiques locales ont pu pallier en partie cette pénurie par la mobilisation de volontaires, toutes expertises et secteurs confondus, avec pour objectif de venir en aide au monde médical. En exploitant des communs informationnels (codes sources, plans...) partagés grâce à des plates-formes en ligne, des connaissances, en utilisant des outils de fabrication numérique de type impression 3D, des équipements de base ont pu être réalisés. La pénurie non anticipée est en particulier liée à la dépendance aux chaînes d'approvisionnement fragmentées mondialisées pour ces équipements. Pour satisfaire les besoins de matériels complexes comme les respirateurs [315], les makers ont développé (débrouille collective) des relations (numériques) avec des chercheurs, des entrepreneurs, des personnels soignants, des particuliers... pour fournir des équipements (les auteurs ont recensé 143 projets open source à travers le monde au premier pic de la pandémie).

« L'accès libre à des communs informationnels (codes sources, plans...) via des plates-formes en ligne a facilité les échanges et la structuration entre les différents profils impliqués ». Les FabLab ont pu disposer du rôle d'intermédiaire entre partenaires institutionnels et makers individuels. Cette situation d'exception a démontré la capacité des volontaires à innover avec les éléments et produits disponibles et produire en lien avec les utilisateurs. Ce mode d'innovation original, ouvert, a nécessité des modes de conception et de production spécifiques et agiles en minimisant l'usage des ressources accessibles. Il peut servir d'exemple en termes de conceptions et d'organisations originales qui sortent du système économique traditionnel pour produire des petites séries utilisant notamment la fabrication additive.

Les auteurs ne font pas état d'une suite favorable de développement des projets open source présentés dans leur article.

Dans un marché en forte progression, avec des brevets qui sont tombés dans le domaine public, des startups émergent un peu partout dans le monde pour accélérer la production et l'innovation dans l'industrie. Il va sans dire que la pandémie de Covid-19 semble avoir ralenti cette progression. De plus, selon Wellener et al. [316], la pandémie a anéanti les gains des entreprises et a aggravé le problème de pénurie de main-d'œuvre dans un secteur qui a souvent eu du mal à suivre le rythme des demandes changeantes de la technologie. En réduisant le nombre d'intermédiaires dans la fabrication [40], en s'engageant plus avant dans le numérique [9] [317] [318], il est donc envisageable de compenser en partie ce manque. Cependant, comme le souligne Gold [319] le système universitaire des pays développés – très normatif, disciplinaire et spécialisé – semble de moins en moins capable de répondre aux besoins des industriels, qui sont confrontés à une pénurie de talents et à un déficit de compétences qui menace le retour à une croissance durable... (voir également André [320]) ; pourtant, on a en trouvé durant la première phase de la pandémie dans les FabLab ! C'est en partie à cause de l'absence de formations officielles que les industriels participent directement ou indirectement à des formations spécialisées en fabrication additive.

Les jeunes pousses, membres du Group of Thirty (G30) [321], entreprises moyennes à faible endettement, risquent de manquer de capitaux privés suite à la crise en raison de l'incertitude entourant la durabilité de leur modèle d'entreprise. En d'autres termes, il s'agit d'entreprises nationales pour lesquelles les aspects de liquidité sont perçus comme des problèmes de solvabilité, alors qu'elles peuvent, comme les résultats de la recherche, être indispensables pour une reprise de masse. L'obligation de maintenir du lien social (avec les financements qui vont avec), la compréhension des problèmes, leur possible résolution risquée, inscrite dans le moyen terme, dans un cadre où la Nation soutient aujourd'hui (quoi qu'on en pense) pour ses citoyens un jeu complexe internationalisé, fait que les politiques apparemment se trouvent démunies et risquent, comme nombre d'entreprises, de privilégier le court terme, les apparences formelles, alors qu'il faudrait prendre des risques (comme ceux pris, sur un autre plan, par les volontaires engagés dans la lutte contre la pandémie), soutenir la créativité, l'engagement pour oser, le débat effectif entre décideurs et public profane, etc. Cette situation très plausible constitue donc un grave sujet d'inquiétudes.

Certains pays s'orientent déjà vers ce nécessaire dynamisme et cette résilience en redoublant d'efforts [322]. « *Le changement est particulièrement crucial, alors que les positions budgétaires sont mises à rude épreuve par les effets immédiats de la pandémie et que les autres moteurs de la croissance à long terme sont peu évoqués. La France risque alors, par manque de courage, de se contenter, avec des aigreurs et des inquiétudes, certes avec encore la réputation de sa grande cuisine et de ses parfums, d'un regard nostalgique sur le souvenir de son passé glorieux... Mais n'est pas Louis XIV qui veut !* » [323]. Peut-être, comme Lamard et Lequin [324] le proposent, devrait-on envisager une réflexion post-Covid-19 sur le développement de la démocratie technique dans notre pays ? Toutefois, le contexte économique nous rappelle que « *si on veut créer de l'innovation, il faut avoir de la concurrence, et pour créer de la concurrence, c'est l'échelle nationale et surtout européenne qui est pertinente pour faire émerger des champions européens qui soient issus des écosystèmes* » [325].

Les campagnes de vaccination ont permis un certain retour à la normalité. Mais, comme le rappelle le CAE [326], la pandémie dans son ampleur n'a pas été une simple crise sanitaire ; elle a montré des coopérations inattendues et des tensions entre citoyens, gouvernements et scientifiques. « *En ce sens, elle annonce les crises à venir du XXI^e siècle, de nature bien différente de celles du XX^e siècle, gérées essentiellement de façon technique.* » Ce futur laisse donc une place probable, mais complexe, à l'essor de la fabrication additive dans la société.

À retenir

- Aide efficace dans la fabrication de matériels médicaux par des makers dans une économie de pénurie et de désarroi psychologique durant la première phase de la crise liée à la Covid-19.
- « Anarchie » responsable forte pour produire dans l'urgence (débrouille) et excellence des liens sociaux horizontaux entre producteurs et utilisateurs.
- Belle illustration d'une activité positive de la « créativité de terrain » utilisant les matières accessibles, mais aussi efficacement les réseaux numériques (innovation collective).
- Inventivité durant l'action, mais non reprise en considération dès que le système de production industriel a repris la main sur les besoins matériels concernés.
- Sensibilité des entreprises à l'innovation, mais avec des contraintes budgétaires qui les limitent dans un futur incertain ; nouveaux compromis organisationnels.

6. Conclusion

Avec la crise induite par le coronavirus, le réchauffement climatique, on sait que le monde dans lequel on vit est en transformation profonde. Pour Wendling [327] il est volatile, incertain, complexe et ambigu. À l'expérience récente, on a appris qu'il était fragile (nouveaux variants de la Covid-19 par exemple), anxieux, non linéaire et de plus en plus incompréhensible. Pour autant, la notion de changement s'impose depuis une trentaine d'années comme une valeur positive et indépassable dans les pays développés. Bien que la notion de changement soit déjà ancienne, c'est comme idéologie qu'elle s'impose aujourd'hui, fortement liée au contexte d'immédiateté, de création, de réseau dans lequel se fonde l'économie du savoir. L'idée de changement permanent semble être devenue un nouveau paradigme, également synonyme d'immédiateté et d'instabilité. Elle ne manque pas non plus de susciter des inquiétudes, en même temps que de nombreux espoirs. Alexandre [328] écrit : « *En matière industrielle, l'illusion que les gestionnaires de diligences vont inventer les chemins de fer conduit à concentrer les aides technologiques sur les vieux groupes industriels forts en lobbying, à défaut de comprendre les tendances du futur.* » Comment être créatif dans ce décor cadré par les programmes de l'ANR ou H2020 de Bruxelles puisque les ruptures ne sont pas par essence programmables ? Même si depuis les premiers brevets sur la fabrication additive, la donne française a changé, comment, avec des financements d'aide à la création d'entreprise sur des opérations à risque, sortir son épingle du jeu ? C'est peut-être pour cette raison que les centres de décision des fabricants de machines 3D sont essentiellement étrangers... Le développement de méthodes de financement participatif et la création de filiales issues du monde académique peuvent, en partie, aider au soutien de telles opérations, mais ceci aurait dû en France se pratiquer au tout début de la technologie.

Indépendamment de cet aspect, une société ne peut se développer que par rapport à son histoire (longue pour l'Europe, plus courte pour les USA), car son savoir-faire est un élément de son patrimoine. Avoir des produits en phase avec une entreprise, son positionnement et sa culture, est une nécessité pour une stratégie cohérente, car les entreprises qui réussissent construisent leur histoire sans réel hasard et dans une continuité maîtrisée. Quand on développe une stratégie d'entreprise, il faut penser aux produits que celle-ci vend et aux marchés sur lesquels ils sont écoulés : c'est la cohérence d'ensemble qui est constitutive du succès, et la création qui se doit d'être un ciment entre le passé et le présent, l'histoire et le futur. C'est d'ailleurs la définition même de la modernité : savoir s'identifier à la pensée de son temps. C'est alors le terrain classique de l'innovation incrémentale, peu ou pas disruptive. Selon Marchesnay [329] : « *Herber Marcuse rappelait que la grande force des organisations c'est leur inertie. Celle-ci est d'autant plus prégnante qu'elle se fonde sur une vision large et hypermétrope, et qu'elle se heurte à des intérêts acquis...* ».

Cette vision partiellement réductrice se traduit cependant par la possible émergence d'innovations issues d'entités plus modestes, à l'exemple de BeAM (*Be Additive Manufacturing*), issue de travaux menés à l'IREPA-Laser (Industrialisation REcherche Procédés Application Laser) en Alsace [330]. BeAM fait aujourd'hui partie d'ADDUP (filiale de Fives et de Michelin). La place des makers éclairés dans le processus d'innovation n'est pas facile à repérer parce qu'ils ne font pas de publications ou ne prennent pas toujours de brevets, leur culture étant essentiellement open source et/ou « underground ». La dynamique visible est par suite essentiellement centrée sur l'utilisation de technologies de plus en plus matures avec des matériaux de plus en plus sophistiqués.

D'un point de vue plus éloigné de la technique de fabrication additive, plusieurs éléments présentés dans cet article méritent d'être soulignés :

- La possibilité (pour au moins des amateurs éclairés) de passer facilement de la conception d'un objet à sa réalisation, en une étape. Cette situation nouvelle permet une démocratisation de la technique, laissant une impression de grande liberté.
- Cette liberté peut se traduire par des détournements préjudiciables (copies, fabrication d'armes, etc.), sans qu'il soit aujourd'hui possible de limiter ces productions.
- Cette performance d'immédiateté peut se traduire par des processus de fabrication relocalisés dans des unités de production en proximité avec les groupes de compétence makers (FabLab, en particulier).
- Un retour à l'esprit de l'artisanat en quittant le virtuel pour retrouver la matière en créant soi-même de vrais objets.
- Une perturbation du contexte de l'emploi salarié.

7. Glossaire

Analyse de cycle de vie ; *Life cycle analysis*

Repose sur la notion de développement durable en fournissant un moyen efficace et systémique pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service, d'une entreprise ou d'un procédé.

Anonymous

Mouvement « hacktiviste » ou de hackers, se manifestant notamment via Internet.

Anthropologie ; *Anthropology*

Ensemble des sciences qui étudient l'Homme dans ses différentes dimensions.

Bottom-up

Approche ascendante.

Business model

Le modèle d'entreprise est un document de référence qui présente la manière dont une entreprise entend fonder et garantir sa rentabilité.

Contrôle social ; *Social control*

Désigne les pratiques sociales, formelles ou informelles, qui tendent à produire et à maintenir une certaine forme de conformité des individus à l'intérieur du corps social.

Conventionnalisme ; *Conventionalism*

Doctrine stipulant une séparation fondamentale entre les données de l'intuition et des sens d'une part, et les constructions intellectuelles permettant de fonder les théories scientifiques ou mathématiques d'autre part.

Copyleft

Autorisation donnée par un auteur d'utiliser, de modifier et de diffuser son travail, dans la mesure où cette autorisation reste préservée.

Creative Commons

Organisation à but non lucratif qui a pour dessein de faciliter la diffusion et le partage des œuvres tout en accompagnant les nouvelles pratiques de création à l'ère numérique.

Crowdfunding

Façon pour les entreprises ou les particuliers de récolter des fonds pour leurs projets. Dans la plupart des cas, c'est l'association d'un grand nombre de personnes investissant un petit montant qui permettent aux porteurs de projets de trouver les fonds demandés.

Crypto-fabrication ; *Crypto-machining*

Fabrication cachée de manière volontaire, plutôt hors la loi.

DIY ; *Do It Yourself*

Culture du « faites-le vous-même ».

Économie collaborative ; *Cooperative economy*

Activité humaine qui vise à produire de la valeur en commun et repose sur de nouvelles formes d'organisations plus horizontales que verticales, sur la mutualisation des biens, des espaces et des outils [l'usage plutôt que la possession], l'organisation des citoyens en réseaux ou en communautés.

Effet Saint-Mathieu

Un scientifique reconnu a plus de chances d'être soutenu par sa structure limitant l'activité originale des autres membres de celle-ci (« On ne prête qu'aux riches ! »).

Emoji

Dans le domaine numérique, petite image utilisée pour exprimer une émotion ou représenter une situation (émoticônes, smileys).

Fab-Lab ; *FabLab*

Lieu ouvert au public où sont mis à disposition toutes sortes d'outils, pilotés par ordinateur pour la conception et la réalisation d'objets.

Fab-Manager

Personne assurant principalement des missions de médiation et d'accompagnement dans un FabLab.

Fast-second

Les individus ou les entreprises qui créent de nouveaux marchés en innovant ne sont pas forcément les mieux placés pour les développer et gagner sur le terrain économique.

Hacker ; *Hacker*

Informaticien qui crée, analyse et modifie des programmes informatiques pour améliorer ou apporter de nouvelles fonctionnalités à l'utilisateur ou informaticien qui utilise ses connaissances de la sécurité informatique pour en rechercher et en exploiter les faiblesses.

Hacker-space

Tiers-lieu où des hackers avec un intérêt commun peuvent se rencontrer et coopérer.

Hardware

Ensemble d'éléments physiques qui constituent un système informatique.

Industrie 4.0 ; *4.0 Industry*

Nouvelle façon d'organiser les moyens de production : l'objectif est la mise en place d'usines dites « intelligentes » (*smart factories*) capables d'une plus grande adaptabilité dans la production et d'une allocation plus efficace des ressources, ouvrant ainsi la voie à une nouvelle révolution industrielle. Ses bases technologiques sont l'Internet des Objets et les systèmes cyber-physiques.

Innovation organisationnelle ; *Organizational innovation*

Correspond à l'apparition d'une nouvelle organisation du travail.

Innovation ouverte ; *Open innovation*

Approche fondée sur le partage, la coopération entre entreprises, à la fois compatible avec l'économie et avec l'intelligence économique. Elle permet aussi des démarches fondées sur des alternatives éthiques et solidaires de partage libre des savoirs et savoir-faire, avec notamment l'utilisation de licences libres.

Innovation radicale

Innovation technologique qui finit par remplacer une technologie dominante.

Intelligence collective ; *Collective intelligence*

Désigne les capacités cognitives d'une communauté résultant des interactions entre ses membres.

Internet des objets ; *Internet of Things (IoT)*

L'internet des objets connectés représente les échanges d'informations et de données provenant de dispositifs présents dans le monde réel vers le réseau Internet.

Knowledge management

Ensemble des initiatives, des méthodes et des techniques permettant de percevoir, d'identifier, d'analyser, d'organiser, de mémoriser et de partager des connaissances entre les membres des organisations.

Made at home

Littéralement, réalisé chez soi.

Maker ; *Maker*

Branche de la culture DIY (*Do It Yourself*) tournée vers la technologie informatisée.

Maker-space

Les projets menés dans un Maker-space sont collectifs voire collaboratifs. Le leitmotiv serait « apprendre en faisant ». Les FabLab en font partie.

Mass-customisation ou Personnalisation de masse ; *Mass customization*

Processus par lequel une entreprise ou une marque donne le moyen à ses clients de pouvoir personnaliser un produit ou un service, afin que celui-ci devienne le plus unique possible.

Médiasphère ; *Mediasphere*

Ensemble des médias.

Mentalité 2.0 ; *2.0 Mentality*

Embrasse d'une façon ou d'une autre, continuellement ou sporadiquement, la quasi-totalité des métiers et des postes au sein de l'organisation, induite par les nouvelles technologies de l'information et de la communication.

MOOC ; *Massive open online course*

Formation ouverte à distance.

Objet-frontière ; *Boundary-object*

Aux frontières de la connaissance, c'est un support de traductions hétérogènes, un dispositif d'intégration des savoirs, une médiation dans les processus de coordination d'experts et de non-experts, etc.

Obsolescence

Fait pour un produit ou un procédé d'être dépassé, et donc de perdre une partie de sa valeur en raison de la seule évolution scientifique ou technologique.

Open-Lab

Lieu et démarche portés par des acteurs, en vue de renouveler les modalités d'innovation et de création par la mise en œuvre de processus collaboratifs et itératifs.

Open source

Logiciels disposant de libre redistribution, d'accès au code source et de création de travaux dérivés. Mis à la disposition du grand public, ce code source est généralement le résultat d'une coopération entre programmeurs.

Repair Café

Atelier consacré à la réparation d'objets et organisé à un niveau local sous forme de tiers-lieu.

RepRap

Projet dont l'objectif est de développer des machines de prototypage rapide capables d'imprimer des objets en polymère, financièrement et techniquement accessibles à tous.

Retro-marketing

Déclinaison du marketing qui privilégie le passé dans sa démarche ou fait allusion directement ou indirectement à la notion de passé dans sa communication.

Robolution ; Robolution

Néologisme créé à partir des mots « robot » et « révolution », associé à l'arrivée de machines intelligentes qui bouleversent le monde de la production.

Sérendipité ; Serendipity

Fait, pour une découverte scientifique ou une invention technique, d'être ou d'avoir été obtenue de façon inattendue, car découverte accidentellement, suite à un concours de circonstances fortuit.

Smart factories

Aussi appelées **Usines 4.0**, le savoir-faire technologique qu'elles véhiculent constitue une voie de progrès vers des usines encore plus compétitives, sûres et responsables.

Système cyber-physique ; Cyber-physical systems

Système où des éléments informatiques coopèrent pour le contrôle et la commande d'entités physiques.

Technoscience

Terme mettant en évidence le caractère intriqué des liens entre sciences et technologies.

TechShop

Enseigne de maker-space, ouverte au public.

Tiers-lieux

Nouveaux lieux de lien social, d'émancipation et d'initiatives collectives (dont les FabLab).

Uberisation ; Uberization

Phénomène utilisant des services permettant aux professionnels et aux clients de se mettre en contact direct, de manière quasi instantanée, grâce à l'utilisation des nouvelles technologies.

Underground

Adjectif associé aux mouvements *underground* correspondant à une culture alternative expérimentale et d'avant-garde, en marge des circuits commerciaux officiels et traditionnels.



Fabrication additive : Révolution ou simple évolution sociétale ?

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

Sources bibliographiques

- [1] AFNOR. – NF E 67-001. *Fabrication additive – Vocabulaire* (2011).
- [2] VERZELEN (L.). – *Les métiers évoluent, il est temps que nos formations changent*. <https://www.usinenouvelle.com/article/avis-d-expert-les-metiers-evoluent-il-est-temps-que-nos-formations-changent.N1140347> (2021).
- [3] MAYO (L.), OSBORNE (C.), BUSSEY (M.) et BURNS (T.). – *Engaging Communities through Uncertainty : Exploring the Role of Local Governance as a Way of Facilitating Post-normal Polylogues*. *World futures*, 77, p. 245-265 (2021).
- [4] SARDAR (Z.). – *Welcome to post-normal times*. *Futures*, 42, p. 435-444 (2010).
- [5] MAYO (L.). – *The post-normal condition*. *Journal of Futures Studies*, 24, p. 61-72 (2020).
- [6] BUSSEY (M.), SONG (M.M.) et HSIEH (S.H.). – *Anticipatory imagination as a tool for re-thinking engineering education*. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, vol. 143, 02517004 (2017).
- [7] MONTUORI (A.). – *Beyond post-normal times : The future of creativity and the creativity of the future*. *Futures*, 43, p. 221-227 (2011).
- [8] MITCHELL (I.K.) et WALINGA (J.). – *The creative imperative : The role of creativity, creative problem solving and insight as key drivers for sustainability*. *Journal of Cleaner Production*, 140, p. 1872-1884 (2017).
- [9] MCKINSEY. – *Customer Experience in the Next Normal after COVID-19*. <https://www.mckinsey.com/about-us/covid-response-center/leadership-mindsets/webinars/customer-experience-in-the-next-normal-after-covid-19> (2020).
- [10] LI (S.). – *How Does COVID-19 Speed the Digital Transformation of Business Processes and Customer Experiences ?*. *Review of business*, 41, p. 1-14 (2021).
- [11] SOLTANIFAR (M.), HUGHES (M.) et GÖCKE (L.). – *Digital Entrepreneurship Impact on Business and Society*. Springer International Publishing Ed., Cham, USA (2021).
- [12] INGELAERE (R.). – *Innovation technologique et performance industrielle : l'exemple de l'impression 3D*. http://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2015/2015_07_innovations techno impression 3d_.pdf (2015).
- [13] GEBLER (M.), SCHOOT-UITERKAMP (A.J.M.) et VISSER (C.). – *A global sustainability perspective on 3D printing technologies*. *Energy Policy*, 74, p. 158-167 (2014).
- [14] WELLER (C.), KLEER (R.) et PILLER (F.). – *Economic implications of 3D printing : Market structure models in light of additive manufacturing revisited*. *Int. J. Production Economics*, 164, p. 43-56 (2015).
- [15] BLACKMAGIC3D. – *The 8 best 3D printing stories of 2014*. <http://blog.blackmagic3d.com/8-best-3d-printing-stories-2014/> (2014).
- [16] MERTZ (L.). – *A new world for 3D printing offer*. *IEEE Pulse*, 4, p. 12-14 (2013).
- [17] TECHNOLPOLIS. – *Regional Innovation Monitor Plus 2015 – Mapping advanced manufacturing networks and exploring new business opportunities*. https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/regional-innovation-monitor/sites/default/files/report/RIM%20Plus_Mapping%20Advanced%20Manufacturing%20Networks_Thematic%20Paper.pdf (2015).
- [18] MORA (A.). – *L'impression 3D : L'industrie du futur est en marche*. *Management*, 217, p. 64-71 (2014).
- [19] ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES. – *Les enjeux stratégiques de la fabrication additive : positionnement de l'Académie des Technologies*. http://academie-technologies-prod.s3.amazonaws.com/2015/06/18/08/31/49/22/Avis_de_l_AT_sur_Fabrication_additive_juin_2015_1_.pdf (2015).
- [20] BERCHON (M.) et LUYT (B.). – *L'impression 3D*. Eyrolles Ed., Paris (2014).
- [21] BARLIER (C.) et BERNARD (A.). – *Fabrication additive : du prototypage rapide à l'impression 3D*. Dunod Ed., Paris (2015).
- [22] CCI PARIS-IDF/CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ARMEMENT. – *L'impression 3D : porte d'entrée dans l'industrie du 21^{ème} siècle*. <http://www.adverbe.com/wp-content/uploads/2015/09/rapport-impression3d.pdf> (2015).
- [23] HAUSMAN (K.K.) et HORNE (R.). – *L'impression 3D pour les nuls*. First Ed., Paris (2014).
- [24] HOSKINS (S.). – *Le guide de l'impression 3D pour artisans et designers*. Marabout Ed., Paris (2014).
- [25] GIBSON (I.), ROSEN (D.) et STUCKER (B.). – *Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. Springer Ed., New-York, USA (2015).
- [26] SCULPTEO. – *Apprendre l'impression 3D*. Elephorm Ed. <http://www.elephorm.com> (2015).
- [27] HLAVIN (M.). – *3D printing : the next industrial revolution*. *Appliance Design*, 62, p. 22-23 (2014).
- [28] PANETTA (K.). – *Need something ? Print-it ; 3D printing in engineering*. *Electronic Component News*, 57, p. 16-19 (2013).
- [29] KAZIUMAS (A.). – *Pratique de l'impression 3D*. <https://books.google.fr/books?isbn=2212270631> (2014).
- [30] RATTI (M.) et REE (R.). – *Materializing information : 3D printing and social change*. First Monday, 17. <http://firstmonday.org/ojs/index.php/fm/article/view/3968/3273> (2012).
- [31] JIANG (J.), XU (X.) et STRINGER (J.). – *Optimization of multi-part production in additive manufacturing for reducing support waste*. *Virtual and Physical Prototyping*, 14, p. 219-228 (2019).
- [32] JIANG (J.), XU (X.), XIONG (Y.), TANG (Y.), DONG (G.) et KIM (S.). – *A novel strategy for multi-part production in additive manufacturing*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109, p. 1237-1248 (2020).
- [33] STAR (S.L.) et GRIESEMER (J.R.). – *Écologie institutionnelle, traductions et objets-frontières : des amateurs et des professionnels au*

- musée de zoologie vertébrée de Berkeley 1907-1939. In B. Lahire et C. Rosental Ed. « La cognition au prisme des sciences sociales », Éditions des Archives Contemporaines, Paris (2008).
- [34] ALEX. – *Gartner places 3D printing among the top 10 strategic technology trends for 2016*. <http://www.3ders.org/articles/20151224-gartner-places-3d-printing-among-the-top-ten-strategic-technology-trends-for-2016.html> (2015).
- [35] EU. – *Communication from the Commission to the European Parliament and the Council 2021 Strategic Foresight Report – The EU's capacity and freedom to act*. https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/foresight_report_com750_en.pdf – https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_21_4581 (2021).
- [36] GUILFORD (J.P.). – *Creativity*. American Psychologist, 5, p. 444-454 (1950).
- [37] GUILFORD (J.P.). – *Traits of creativity*. In H.H. Anderson Ed. « Creativity and its cultivation », Harper Ed., New-York, USA, p. 142-161 (1959).
- [38] CAPRON PUOZZO (I.). – *Créativité et apprentissage : dilemme et harmonie*. Revue française de pédagogie, 197, p. 5-12 (2016).
- [39] MATHIAS (D.R.F.). – *Investigating and Characterizing the Coupling of LEGO and 3D Printing*. PhD, University of Bristol, UK. https://research-information.bris.ac.uk/ws/portalfiles/portal/225056783/DM_Thesis_Corrected.pdf (2019).
- [40] 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).
- [41] WEF (WORLD ECONOMIC FORUM). – *Futurism is a means to see beyond COVID-19. Here's how to time travel*. <https://www.weforum.org/agenda/2021/04/how-futurism-can-help-you-navigate-a-post-covid-future-gtgs21/> (2021).
- [42] GROVES (C.). – *Emptying the future : On the environmental politics of anticipation*. Futures, 92, p. 29-38 (2017).
- [43] GARTNER (J.) et FINK (M.). – *The magic cube : towards a theoretical framework to explain the disruptive potential of additive manufacturing*. Translational Materials Research, 5, 024003 (2018).
- [44] WIKIPÉDIA. – *Industrie 4.0*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Industrie_4.0 (2015).
- [45] HINKS (J.). – *5 things you should know about industry 4.0*. <http://www.techradar.com/news/world-of-tech/future-tech/5-things-you-should-know-about-industry-4-0-1289534> (2015).
- [46] SCHWAB (K.). – *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum Ed., Cologny/Geneva, Switzerland (2016).
- [47] SCHWAB (K.). – *The Fourth Industrial Revolution*. Crown Publishing Group Ed., New-York, USA (2017).
- [48] HERNANDEZ KORNER (M.E.), LAMBAN (M.P.), ALBAJEZ (J.A.), SANTOLARIA (J.), DEL CARMEN NG CORRALES (L.) et ROYO (J.). – *Systematic Literature Review : Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0*. Metals, 10, p. 1061 (2020).
- [49] ANDRÉ (J.C.). – *Industry 4.0 – Paradoxes and Conflicts*. ISTE/Wiley Ed., Londres, UK (2019).
- [50] GAO. – *3D Printing : opportunities, challenges and policy ; implications of additive manufacturing*. <http://www.gao.gov/assets/680/670960.pdf> (2015).
- [51] CRAVEIRO (F.), DUARTE (J.P.), BARTOLO (H.) et BARTOLO (P.J.). – *Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction : A perspective on Construction 4.0*. Automation in Construction, 103, p. 251-267 (2019).
- [52] NIAKI (M.K.), TORABI (S.A.) et NONINO (F.). – *Why manufacturers adopt additive manufacturing technologies : The role of sustainability*. Journal of Cleaner Production, 222, p. 381-392 (2019).
- [53] GONÇALVES MACHADO (C.), DESPEISSE (M.), WINROTH (M.) et DENER RIBEIRO DA SILVA (E.H.). – *Additive manufacturing from the sustainability perspective : proposal for a self-assessment tool*. Procedia CIRP, 81, p. 482-487 (2019).
- [54] COLORADO (H.A.), GUTIERREZ VELASQUEZ (E.I.) et NEVES MONTEIRO (S.). – *Sustainability of additive manufacturing : the circular economy of materials and environmental perspectives*. Journal of Materials Research and Technology, 9, p. 8221-8234 (2020).
- [55] SANCHEZ-REXACH (E.), JOHNSTON (T.G.), JEHANNO (C.), SARDON (H.) et NELSON (A.). – *Sustainable Materials and Chemical Processes for Additive Manufacturing*. Chemistry of Materials, 32, p. 7105-7119 (2020).
- [56] MAJEED (A.), ZHANG (Y.), REN (S.), LV (J.), PENG (T.), WAQAR (S.) et YIN (E.). – *A big data-driven framework for sustainable and smart additive manufacturing*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 67, 102026 (2021).
- [57] FLIPO (F.), DOBRE (M.) et MICHOT (M.). – *La face cachée du numérique ; l'impact environnemental des nouvelles technologies*. Ed. de l'Echappée, Paris (2013).
- [58] BIHOUIX (P.). – *L'âge des low-tech ; vers une civilisation techniquement soutenable*. Anthropocène/Seuil Ed., Paris (2014).
- [59] KOHTALA (C.). – *Addressing sustainability in research on distributed production : an integrated literature review*. J. Cleaner Prod., 106, p. 654-668 (2015).
- [60] LE BOURHIS (F.). – *Modélisation de la performance environnementale des procédés de fabrication par ajout de matière ; application à la projection de poudres métalliques*. Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, Nantes (2014).
- [61] MORROW (W.R.), QI (H.), KIM (I.), MAZUMDER (J.) et SKERLOS (S.J.). – *Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing*. Journal of Cleaner Production 15, p. 932-943 (2007).
- [62] GILLE (B.). – *Histoire des techniques*. La Pléiade Ed., Paris (1978).
- [63] JIANG (J.), NEWMAN (S.T.) et ZHONG (R.Y.). – *A review of multiple degrees of freedom for additive manufacturing machines*. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 34, p. 195-211 (2021).
- [64] FLÉVET (C.). – *Demain, tout fabriquer à la demande instantanément ?*. <https://www.clubic.com/technologies-d-avenir/impression-3d/dossier-380372-demain-tout-fabriquer-a-la-demande-instantanement-.html> (2021).
- [65] METAL-AM. – *Wohlers Report 2021 finds 7.5 % growth in AM industry despite COVID-19 pandemic*. <https://www.metal-am.com/wohlers-report-2021-finds-7-5-growth-in-am-industry-despite-covid-19-pandemic/> (2021).
- [66] LECHNER (C.) et PERVAIZ (A.). – *From invention to industry from a social movement perspective : the emergence of the 3D printing industry*. Journal of Innovation and Entrepreneurship, 9, p. 22 (2020).
- [67] ESTEBAN-MUNIZ (G.). – *Additive manufacturing and 3D printing technologies in the EC*. Workshop « Fabrication additive pour l'électronique », CNRS, Paris (2016).
- [68] LES ECHOS (bourse). – *Graphique historique*. http://bourse.lesechos.fr/bourse/details/graphique_histo.jsp?code=US88554D2053&place=XNYS&codif=ISIN (2015).
- [69] FIM (FÉDÉRATION DES INDUSTRIES MÉCANIQUES). – *Chiffres clés*. <https://www.fim.net/fr/accueil/le-secteur/chiffres-clés-?text=Les%20industries%20m%C3%A9caniques%20enregistrent%20un,aux%20exportations%20%2D12%25> (2021).
- [70] LAMOUR (A.). – *Fabrication additive : nouvelle donne industrielle*. CETIM Info 233, p. 1-17 (2016).
- [71] SHAH (J.), SNIDER (B.), CLARKE (T.), KOZUTSKY (S.), LACKI (M.) et HOSSEINI (A.). – *Large-scale 3D printers for additive manufacturing : design considerations and challenges*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 104, p. 3679-3693 (2019).
- [72] XERFI. – *L'impression 3D, un marché de 5 milliards de dollars en 2015 et 15 milliards en 2020*. <https://www.lesimprimantes3d.fr/etude-marche-impression-3d-20160819/> (2020).
- [73] INDUSTRIE.MAG. – *Le marché de l'impression 3D/Fabrication Additive a le vent en poupe*. <http://www.industrie-mag.com/article11868.html> (2021).
- [74] JDN. – *Dette de la France : toujours dans le rouge*. <http://www.journaldunet.com/economie/magazine/1041647-dette-publique/> (2016).
- [75] ANDERSON (C.). – *L'imprimante 3D aura plus d'impact que le web*. <http://rue89.nouvelobs.com/2012/12/25/chris-anderson-limprimante-3d-aura-plus-dimpact-que-le-web-238098> (2012).
- [76] ANDERSON (C.). – *Makers : La nouvelle révolution industrielle*. Pearson-France, Paris (2012).

- [77] AHLUWALIA (S.) et MAHTO (R.V.). – *Additive manufacturing based innovation, small firms, customer involvement and crowd-funding : from co-creation to co-financing*. Translational Materials Research, 5, 026001 (2018).
- [78] KLEER (R.) et PILLER (F.). – *Local manufacturing and structural shifts in competition : Market dynamics of additive manufacturing*. International Journal of Production Economics, 216, p. 23-34 (2019).
- [79] RAYMOND (E.S.). – *Comment devenir un hacker*. In Blondeau O. Ed. « Libres enfants du savoir numérique – Une anthologie du « Libre », Éditions de l'Éclat, Paris, p. 255-277 (2000).
- [80] ROBERT (B.). – *Il faut déconstruire le mythe du hacker*. <https://www.ladepeche.fr/2021/10/01/interview-il-faut-deconstruire-le-mythe-du-hacker-explique-baptiste-robert-9825635.php> (2021).
- [81] COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE. – *Penser autrement les modes de vie en 2030 ; cahier des signaux faibles*. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Cahier_des_signaux_faibles_-_Tome_2.pdf (2016).
- [82] WILBER (K.). – *Le livre de la vision intégrale*. Dunod Ed., Paris (2008).
- [83] BERREBI-HOFFMANN (I.), BUREAU (M.C.) et LALLEMENT (M.). – *Makers*. Seuil Ed., Paris (2018).
- [84] GAINES (B.R.). – *From facilitating interactivity to managing hyper-connectivity : 50 years of human-computer studies*. International Journal of Human-Computer Studies, 131, p. 4-22 (2019).
- [85] DE GRAVE (A.). – *La fin des Léviathans*. In D. Fillipova Ed « Société collaboratrice ; la fin des hiérarchies », Rue de l'échiquier Ed., Paris, p. 12-27 (2015).
- [86] SADIN (E.). – *La silicolonisation du monde*. Éditions de l'échappée, Paris (2021).
- [87] HALDRUP (M.), HOBYE (M.) et PADFIELD (N.). – *The bizarre bazaar : FabLab as hybrid hubs*. Co-Design, 14, p. 329-344 (2018).
- [88] GALUPPO (L.), KAJAMAA (A.), IVALDI (S.) et SCARATTI (G.). – *Translating Sustainability into Action : A Management Challenge in FabLabs*. Sustainability (Basel, Switzerland), 11, 1676 (2019).
- [89] TURNER (F.). – *Aux sources de l'utopie numérique – De la contre-culture à la cyberculture*. C&F Ed., Paris (2012).
- [90] ARNSPERGER (C.). – *Éthique de l'existence post-capitaliste ; pour un militantisme existentiel*. Cerf Ed., Paris (2009).
- [91] SUNDARARAJAN (A.). – *The Twilight of Brand and Consumerism ? Digital Trust, Cultural Meaning, and the Quest for Connection in the Sharing Economy*. Journal of Marketing, 83, p. 32-35 (2019).
- [92] BOSQUÉ (C.), NOOR (O.) et RICARD (L.). – *Fablabs, etc. ; les nouveaux lieux de fabrication numérique*. Eyrolles Ed., Paris (2014).
- [93] GIORGINI (P.). – *La transition fulgurante ; vers un bouleversement systémique du monde*. Bayard Ed., Paris (2014).
- [94] HORNIK (J.) et ROSARIO (C.). – *Why the Memjet v. HP lawsuit will be a footnote in the 3D printing patent war*. http://3dprintingindustry.com/2015/08/25/why-the-memjet-v-hp-lawsuit-will-be-a-footnote-in-the-3d-printing-patent-war/?utm_source=3D+Printing+Industry+Update&utm_medium=email&utm_campaign=409c8ce214-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_term=0_695d5c73dc-409c8ce214-64557777 (2015).
- [95] VAN BOERDONK (P.J.M.), KRIKKE (H.R.) et LAMBRECHTS (W.). – *New business models in circular economy : A multiple case study into touch points creating customer values in health care*. Journal of Cleaner Production, 282, 125375 (2021).
- [96] BOTSMA (R.). – *The sharing economy lacks a shared definition*. Citée dans Demailly (D.), Novel (N.S.) in « Économie du partage : enjeux et opportunités pour la transition écologique », Institut du développement durable et des relations internationales, Étude « Nouvelle prospérité » n° 03/14, juillet 2014 (2012).
- [97] PETROPOULOS (G.). – *An economic review of the collaborative economy*. Bruegel Policy Contributions. <https://www.econstor.eu/handle/10419/173101> (2017).
- [98] TERRASSE (P.), BARBEZIEUX (P.) et HERODY (C.). – *Rapport au Premier Ministre sur l'économie collaborative*. <http://www.gouvernement.fr/sites/default/files/liseuse/6421/master/projet/Rapport-de-Pascal-Terrasse-sur-le-developpement-de-l-economie-collaborative.pdf> (2016).
- [99] STAHEL (W.R.). – *The Functional Economy : Cultural and Organizational Change*. Science & Public Policy Ed., 13(4), Londres, UK (1986/1987).
- [100] SADIN (E.). – *L'Humanité augmentée ; l'administration numérique du monde*. Éd. de l'Echappée, Montreuil (2013).
- [101] O'CONNOR (D.). – *Giving up the day job*. <http://advancedmanufacturinginsight.com/archived-articles/item/giving-up-the-day-job-3d-printing> (2014).
- [102] SONG (M.J.). – *Crafts-people's new identity : The impact of digital fabrication technologies on craft practices*. International Journal of Technology and Design Education. <https://doi.org/10.1007/s10798-021-09687-1> (2021).
- [103] MILARA (I.S.), GEORGIEV (G.V.), RIEKKI (J.), YLIOJA (J.) et PYYKKÖNEN (M.). – *Human and Technological Dimensions of Making in FabLab*. The Design journal, 20, S1080-S1092 (2017).
- [104] LIPOVETSKY (G.). – *Luxe éternel, luxe émotionnel*. In G. Lipovetsky et E. Roux « Le luxe éternel ; de l'âge du sacré au temps des marques », Gallimard Ed., Paris, p. 13-96 (2003).
- [105] BENASAYAG (M.). – *Organismes et artéfacts*. La Découverte Ed., Paris (2010).
- [106] SERVIER (J.). – *Histoire de l'utopie*. Folio-Essais Ed., Paris (1991).
- [107] BINA (O.), INCH (A.) et PEREIRA (L.). – *Beyond techno-utopia and its discontents : On the role of utopianism and speculative fiction in shaping alternatives to the smart city imaginary*. Futures, 115, 102475 (2020).
- [108] BHARADWAG (A.). – *Video : will 3D change everything ?*. <http://3dprintingindustry.com/2013/12/04/video-will-3d-printing-change-everything/> (2013).
- [109] PEELS (J.). – *Design for Disruption : 3D Printing Design for Humans*. <https://3dprintingindustry.com/285286/design-for-disruption-3d-printing-design-for-humans/> (2021).
- [110] DELPRAT (E.). – *Système DIY ; faire soi-même à l'ère du 2.0*. Gallimard/Alternatives Ed., Paris (2013).
- [111] SARPONG (D.), OFOSU (G.), BOTCHIE (D.) et CLEAR (F.). – *Do-it-yourself (DIY) science : The proliferation, relevance and concerns*. Technological Forecasting and Social Change, 158, 120127 (2020).
- [112] GALAM (S.). – *Les scientifiques ont perdu le Nord*. Plon Ed., Paris (2008).
- [113] DORAY (P.) et MILLERAND (F.). – *Déterminisme technologique*. In J. Prud'homme, P. Doray et F. Bouchard Ed. « Sciences, technologies et sociétés de A à Z », Presses de l'Université de Montréal, Canada, p. 66-69 (2015).
- [114] KEYNES (J.M.). – *Economic Possibilities for our Grandchildren II*. The Nation and Athenaeum 48.3 (October 18) : p. 96-98 cf. <http://socialdemocracy21stcentury.blogspot.fr/2014/04/keynes-economic-possibilities-for-our.html> (1930).
- [115] CAPDEVILA (I.). – *Les différentes approches entrepreneuriales dans les espaces ouverts d'innovation*. XXIV^e Conférence Internationale de Management Stratégique. http://www.newpic.fr/newpicopendoc/capdevila_aims2015_3392.pdf (2015).
- [116] LAVERGNE (B.&M.). – *L'imprimante 3D : une révolution en marche*. Favre Ed., Paris (2014).
- [117] LIPSON (H.). – *New world of 3D printing offers completely new ways of thinking*. IEEE J., 4, p. 12-14 (2013).
- [118] LIPSON (H.) et KURMAN (M.). – *Impression 3D : la prochaine révolution*. Wiley & First Interactive Ed., Paris (2014).
- [119] STENTOFT (J.), PHILIPSEN (K.), HAUG (A.) et WICKSTRØM (K.A.). – *Motivations and challenges with the diffusion of additive manufacturing through a non-profit association*. Journal of Manufacturing Technology Management, 32, p. 841-861 (2021).
- [120] FREUD (M.). – *Pourquoi la persévérance est la meilleure amie de la créativité*. <http://www.atlantico.fr/decryptage/pourquoi-persévérance-est-meilleure-alliée-creativité-michele-freud-2281923.html> (2015).
- [121] FORAY (D.). – *Ce que l'économie néglige ou ignore en matière d'analyse de l'innovation*. Les logiques de l'innovation, p. 241-274, N. Adler Ed. « Les logiques de l'innovation », La découverte Ed., Paris (2002).
- [122] BUYS (A.J.) et MULDER (H.L.). – *A Study of Creativity in Technology and Engineering*. Proceedings of PICMET '14 : Infrastructure and Service Integration, p. 879-894 (2014).
- [123] CORAZZA (G.). – *Potential originality and effectiveness : The dynamic definition of creativity*. Creativity Research Journal, 28, p. 258-267 (2015).

- [124] CLIFFORD (R.D.). – *Creativity revisited*. Idea, 59, p. 25-39 (2019).
- [125] ITRE COMMITTEE. – *Open innovation industry, including 3D printing*. [http://www.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/563445/IPOL_STU\(2015\)563445_EN.pdf](http://www.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2015/563445/IPOL_STU(2015)563445_EN.pdf) (2015).
- [126] LE POGAM (Y.). – *Corporéisme et individualisme hédoniste*. Corps et culture, 2. <http://corpsetculture.revues.org/388> (1997).
- [127] CHAURAND (N.) et BRAUER (M.). – *La déviance*. Revue électronique de Psychologie Sociale, 3, p. 9-23. <http://RePS.psychologie-sociale.org> (2008).
- [128] FOMBELLE (P.W.), VOORHEES (C.M.), JENKINS (M.R.), SIDAOU (K.), BENOIT (S.), GRUBER (T.), GUSTAFSSON (A.) et ABOSAG (I.). – *Customer deviance : A framework, prevention strategies, and opportunities for future research*. Journal of Business Research, 116, p. 387-400 (2020).
- [129] STIEGLER (B.). – *A propos du verbe faire, des makers, des FabLab et de l'automatisation intégrale*. <https://www.centrale-marseille.fr/fr/news/une-ecole-ephemere-imaginee-philosophe-bernard-stiegler#sthash.WNm4geFQ.vIKrOnh.dpuf> (2014).
- [130] STAUNE (J.). – *Les clés du futur ; réinventer ensemble la société, l'économie et la science*. Plon Ed., Paris (2015).
- [131] GIGET (M.). – *Nous vivons une période de poussée technologique considérable*. <http://www.01net.com/actualites/marc-giget-nous-vivons-une-periode-de-poussee-technologique-considerable-600167.html> (2013).
- [132] COHEN (D.). – *La prospérité du vice ; une introduction inouïe à l'économie*. Albin Michel Ed., Paris (2009).
- [133] ALEXIS. – *L'impression 3D, ce sera formidable... s'ils ne foutent pas tout en l'air*. <http://framablog.org/2011/05/25/impression-3d-attention-danger/> (2011).
- [134] RIFKIN (J.). – *La troisième révolution industrielle*. Les liens qui libèrent Ed., Paris (2012).
- [135] FRIEDMAN (Y.). – *Utopies réalisables*. Éd. De l'Éclat, Paris (2015).
- [136] HERACLEOUS (L.) et BARTUNEK (J.). – *Organization change failure, deep structures and temporality : Appreciating Wonderland*. Human Relations, 74, p. 208-233 (2020).
- [137] BALLARDINI (R.M.), NORRGARD (M.) et MINSEN (T.). – *Enforcing Patents in the Era of 3D Printing*. J. of Intellectual Property Law and Practice, 10, n° 11, Oxford University Press Ed., Oxford, UK (2015).
- [138] BALLARDINI (R.M.), NORRGARD (M.) et BRUUN (N.). – *Transitions in European Patent Law – Influences of the Unitary Patent Package*. Kluwer Law Int., ISBN 978-90-411-5605-1. <http://www.wklawbusiness.com/store/products/transitions-european-patent-law-influences-unitary-patent-package-prod-9041156054/hardcover-item-1-9041156054> (2015).
- [139] HOLLBROCK (T.) et OSBORN (L.). – *Digital Patent Infringement in an Era of 3D Printing*. 48, UC Davis Law Review (Forthcoming) ; Emory Legal Studies Research Paper n° 14-321 (2014).
- [140] MENDIS (D.). – *The Clone Wars' – Episode 1 : The Rise of 3D Printing and its Implications for Intellectual Property Law – Learning Lessons from the Past ?*. European Intellectual Property Review, 35, p. 155-169 (2015).
- [141] MENDIS (D.). – *Clone Wars : Episode II – The Next Generation : The Copyright Implications Relating to 3D Printing and Computer-Aided Design (CAD) Files*. Law, Innovation and Technology, 6, p. 265-281 (2015).
- [142] MENDIS (D.), SECCHI (D.) et REEVES (P.). – *A Legal and Empirical Study into the Intellectual Property Implications of 3D Printing*. Econolyst (UK). https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/421543/A_Legal_and_Empirical_Study_into_the_Intellectual_Property_Implications_of_3D_Printing_-_Exec_Summary_-_Web.pdf (2015).
- [143] MIMLER (M.). – *3D Printing, the Internet, and Patent Law – A History Repeating ?*. La Rivista di Diritto Industriale, 62, p. 352-370 (2013).
- [144] JEPPESEN (L.B.). – *Social movements and free innovation*. Research Policy, 50, 104238 (2021).
- [145] NOMADÉIS-TNS-SOFRES. – *Consommation collaborative : Nomadéis organise et anime 3 ateliers de réflexion multi-acteurs au Ministère de l'Économie*. <http://www.nomadeis.com/2015/03/consommation-collaborative-nomadeis-organise-et-anime-3-ateliers-de-reflexion-multi-acteurs-au-ministere-de-l-economie-2015-03-03> (2015).
- [146] SCHNEIDER (C.) et LÖSCH (A.). – *Visions in assemblages : Future-making and governance in FabLab*. Futures : the Journal of Policy, Planning and Futures Studies, 109, p. 203-212 (2019).
- [147] MAVRI (M.). – *Redesigning a production chain based on 3D printing technology*. Knowledge & Process Management, 22, p. 141-147 (2015).
- [148] FAB-LAB. – *Qu'est-ce qu'un Fab Lab ?*. <http://carrefour-numerique.cite-sciences.fr/fablab/wiki/doku.php?id=charte> (2016).
- [149] LATZKO-TOTH (G.) et PROULX (S.). – *Appropriation des technologies*. In J. Prud'homme, P. Doray et F. Bouchard « Sciences, technologies et sociétés de A à Z », Presses de l'Université de Montréal, Canada, p. 24-26 (2015).
- [150] JOHNSON (S.). – *Future perfect : the case for progress in a networked age*. Riverhead Book Ed., New-York, USA (2013).
- [151] GADREY (J.). – *Adieu à la croissance : bien vivre dans un monde solidaire*. Seuil Ed., Paris (2010).
- [152] DEW (C.). – *The Obsolescence of Capitalism and the Transition to a Resource Based Economy*. <https://medium.com/@cjedew/the-obsolescence-of-capitalism-340ad9f8df8f#y9yibz9n0> (2015).
- [153] SODERBERG (J.). – *Illusoire émancipation par la technologie*. <http://www.monde-diplomatique.fr/2013/01/SODERBERG/48629> (2013).
- [154] COULET (A.). – *Pour une impression 3D « made in France »*. <http://www.industrie-techno.com/pour-une-impression-3d-made-in-france.39255> (2015).
- [155] LOY (J.) et NOVAK (J.I.). – *Additive manufacturing for a dematerialized economy*. Sustainable Manufacturing and Design – Woodhead Publishing Reviews : Mechanical Engineering Series, 2021, p. 19-45 (2021).
- [156] BRIENS (F.). – *La Décroissance au prisme de la modélisation prospective – Exploration macro-économique d'une alternative paradigmatique*. Thèse de l'ENSM, Paris. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01305956/document> (2015).
- [157] CHAN-KIM (W.) et MAUBORGNE (R.). – *Stratégie océan bleu : comment créer de nouveaux espaces stratégiques*. Pearson Ed., Paris (2010).
- [158] GERSHENFELD (N.). – *How to make almost anything ; the digital fabrication revolution*. Foreign Affairs, 91, p. 43-57 (2012).
- [159] MAZERANT (K.), WILLEMSSEN (L.M.), NEIJENS (P.C.) et NOORT (G.). – *Spot-On Creativity : Creativity Biases and Their Differential Effects on Consumer Responses in (Non-) Real-Time Marketing*. Journal of Interactive Marketing, 53, p. 15-31 (2021).
- [160] STORER (N.W.). – *The social system of science*. Holt, Rinehart & Winston Ed., New-York, USA (1966).
- [161] RUMPALA (Y.). – *Fab labs, « makerspaces » : entre innovation et émancipation ?*. Revue Internationale de l'Economie Sociale, 334, p. 85-97 (2014).
- [162] LALLEMENT (M.). – *L'âge du faire – Travail, hacking, anarchie*. Seuil Ed., Paris (2015).
- [163] LHOSTE (E.) et BARBIER (M.). – *FabLab*. Revue d'anthropologie des connaissances (2020).
- [164] BARLEY (S.R.) et TOLBERT (P.S.). – *Institutionalization and Structuration : Studying the Links between Action and Institution*. <https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/75704> (1997).
- [165] FING. – *Faire émerger et connecter des FabLabs en France*. <http://fing.org/?Le-Fab-Lab-lieu-d-artisanat> (2016).
- [166] PFOTENHAUER (S.) et JASANOFF (S.). – *Panacea or diagnosis ? Imaginaries of innovation and the « MIT model » in three political cultures*. Social Studies of Science, 47, p. 783-810 (2017).
- [167] CADON (D.). – *La démocratie Internet – Promesses et limites*. Seuil Ed, Paris (2010).
- [168] AURAY (N.). – *Communautés en ligne et nouvelles formes de solidarité*. In C. Licoppe Ed. « L'évolution des usages et des pratiques numériques », FYP Ed., Paris, p. 58-66 (2009).
- [169] KOSTAKIS (V.), NIAROS (V.) et GIOTITSAS (C.). – *Production and governance in hackerspaces : A manifestation of Commons-based peer production in the physical realm ?*. International Journal of Cultural Studies, 18, p. 555-573 (2014).
- [170] SARRASIN (R.), KRZYNSKI (A.), JEPPESEN (S.) et BRETON (E.). – *Radicaliser l'action collective : portrait de l'option libertaire au Québec*. Lien social et politiques, 68, p. 141-166 (2012).

- [171] EYCHENNE (F.). – *FabLab ; l'avant-garde de la nouvelle révolution industrielle*. FYP Ed., Paris (2012).
- [172] EYCHENNE (F.). – *FabLab : tour d'horizon*. <http://doc.openfing.org/ADEO/Benchmark-Fablab.pdf> (2012).
- [173] OLDENBURG (R.). – *The great good place : cafés, coffee shops, community centers, beauty parlors, general stores, bars, hangouts, and how they get you through the day*. Marlowe & Company Ed., New-York, USA (1997).
- [174] GOTRONIC. – *Carte des Fab Labs*. <http://www.gotronic.fr/ins-carte-des-fablabs-50.htm> (2016).
- [175] Réseau français des Fab Labs. <http://www.fablab.fr/> (2016).
- [176] FABLABO. – *Cartographie des Fab Labs français*. http://fablabo.net/wiki/Cartographie_des_fablabs_fran%C3%A7ais (2016).
- [177] PIUZZI (F.). – *Les FabLab et « ateliers numériques » en France*. Reflets de la Physique, 68, p. 32-36 (2021).
- [178] BOTTOLIER-DEPOIS (F.). – *FabLabs, Hackerspaces : nouvelles formes d'innovation et militantisme libertaire*. Observatoire du Management Alternatif, HEC Ed., Paris (2012).
- [179] FLOSSMANUAL. – *Fablab, Hackerspace, les lieux de fabrication numérique collaboratif*. <http://fr.flossmanuals.net/fablab-hackerspace-les-lieux-de-fabrication-numerique-collaboratif/introduction/> (2016).
- [180] LEYDESDORFF (L.) et ETZKOWITZ (H.). – *Le « Mode 2 » et la globalisation des systèmes d'innovation « nationaux » : le modèle à triple hélice des relations entre université, industrie et gouvernement*. Sociologie et sociétés, 32, p. 135-156 (2000).
- [181] TREMBLAY (D.G.) et KRAUSS (G.). – *Tiers-lieux – Travailler et entreprendre sur les territoires : espaces de co-working, FabLabs, HackLabs...*. Presses de l'Université du Québec, Québec, Canada (2019).
- [182] PAUCEANU (A.M.) et DEMPÈRE (J.M.). – *External factors influencing FabLab's performance*. Journal of international studies (Kyiv), 11, p. 341-351 (2018).
- [183] POLI (R.). – *Anticipation : What about turning the human and social sciences upside down ?*. Futures, 64, p. 15-18 (2014).
- [184] LHOSTE (E.) et BARBIER (M.). – *FabLab*. Revue d'anthropologie des connaissances. <http://journals.openedition.org/rac/2878> (2016).
- [185] VEGA-GOMEZ (F.I.) et MIRANDA-GONZALEZ (F.J.). – *Choosing between Formal and Informal Technology Transfer Channels : Determining Factors among Spanish Academicians*. Sustainability, 13, 2476 (2021).
- [186] LIPOVETSKY (G.). – *Le bonheur paradoxal ; essai sur la société d'hyper-consommation*. Gallimard Ed., Paris (2006).
- [187] PALEG (D.). – *How I 3D-printed a 5-piece fashion collection at home*. <http://danitpeleg.com/3d-printing-fashion-process/> (2015).
- [188] GROJEAN (O.). – *Sensibilisation et coercion : à propos de quelques questions relatives au façonnage institutionnel des individus*. In C. Traini Ed. « Emotions et expertises : les modes de coordination des actions collectives », Presses Universitaires de Rennes Ed., Rennes, p. 73-92 (2015).
- [189] RAND CORPORATION. – *Additive manufacturing and obsolescence management in the defence context*. http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/perspectives/PE100/PE171/RAND_PE171.pdf (2015).
- [190] RUMPALA (Y.). – *Techno-politique des imprimantes 3D*. <https://yannickrumpala.wordpress.com/tag/imprimantes-3d/> (2015).
- [191] SALMON (J.M.). – *Un monde à grande vitesse*. Seuil Ed., Paris (2000).
- [192] ALTER (N.). – *L'innovation ordinaire*. PUF Ed., Paris (2010).
- [193] LÔ (A.). – *Un FabLab d'entreprise pour favoriser l'ambidextrie des salariés – Étude de cas chez Renault*. Revue française de gestion, 264, p. 81-99 (2017).
- [194] RUIZ (E.). – *Entre différenciation et intégration : favoriser l'innovation d'exploration grâce au FabLab interne, le cas de l'i-Lab (Air Liquide)*. Innovations, 65, p. 219-245 (2021).
- [195] KUNDERA (M.). – *L'identité*. Folio Ed., Paris (2005).
- [196] FERRÉOL (V.) et BRETONES (L.). – *Bienvenue dans l'ère de l'imprévu*. <http://www.lesechos.fr/idees-debats/editions-analyses/021287519685-bienvenue-dans-lere-de-limprevu-1149082.php> (2015).
- [197] VINSONNEAU (G.). – *Culture et comportement*. A. Colin Ed., Paris (2000).
- [198] JULIEN (F.). – *Traité de l'efficacité*. Grasset Ed., Paris (1996).
- [199] COZZONI (E.), PASSAVANTI (C.), PONSIGLIONE (C.), PRIMARIO (S.) et RIPPA (P.). – *Inter-organizational Collaboration in Innovation Networks : An Agent Based Model for Responsible Research and Innovation in Additive Manufacturing*. Sustainability, 13, 7460 (2021).
- [200] FRESSOZ (J.B.). – *L'apocalypse joyeuse : une histoire du risque technologique*. Seuil Ed., Paris (2012).
- [201] CLAESSENS (M.). – *Allo la science ? Analyse critique de la média-science*. Herrmann Ed., Paris (2011).
- [202] HETET (B.), MOUTOT (J.M.) et MATHIEU (J.P.). – *Le risque de l'implicite dans un cas d'innovation en faveur de l'écologie*. Innovation, 40, p. 65-81 (2013).
- [203] TENZER (N.). – *La fin du malheur français ; un nouveau devoir politique*. Stock Ed., Paris (2011).
- [204] LECOINTRE (G.). – *Les sciences face aux créationnistes*. Quae Ed., Paris (2012).
- [205] BRONNER (G.). – *Coïncidences, nos représentations du hasard*. Vuibert Ed., Paris (2007).
- [206] LASFARGUE (Y.). – *Halte aux absurdités technologiques*. Ed. D'Organisation, Toulouse (2003).
- [207] BIRCHNELL (T.) et URRY (J.). – *3D, SF and the future*. Future, 50, p. 25-34 (2013).
- [208] ALLARD (L.). – *Internet tue-t-il la créativité ou l'améliore-t-il ?*. <http://www.atlantico.fr/decryptage/internet-tue-t-creativite-ou-amelior-t-laurence-allard-2324526.html> (2015).
- [209] VOLLE (M.). – *Du virtuel au réel et vice versa*. <http://www.volles.com/opinion/dedale.htm> (2015).
- [210] BERRY (G.). – *L'informatique modifie-t-elle notre manière de penser ?*. <http://www.lefigaro.fr/sciences/2012/04/20/01008-20120420ARTFIG00572-l-informatique-modifie-t-elle-notre-maniere-de-penser.php> (2015).
- [211] NEUMAN (W.R.). – *Paradox of mass politics – Knowledge and opinion in the American electorate*. Harvard Univ. Press Ed., Cambridge, USA (1986).
- [212] CAHN (J.G.). – *Impression 3D : Perspectives industrielles et/ou utopie sociétale*. Lettre de prospective (CCI Ile-de-France), 43, p. 1-5. <http://www.cci-paris-idf.fr/sites/default/files/etudes/pdf/documents/friedlandpapers-201402-43.pdf> (2014).
- [213] RAUTRAY (P.) et EISENBART (B.). – *Additive Manufacturing – Enabling Digital Artisans*. Proceedings of the Design Society : International Conference on Engineering Design (2019-2019) – Proceedings of the Design Society : DESIGN Conference (2020-2020). <https://www.cambridge.org/core/journals/proceedings-of-the-design-society> (2021).
- [214] BAUDRILLARD (J.). – *Pour une critique de l'économie politique du signe*. Gallimard Ed., Paris (1972).
- [215] GARDET (C.). – *Les enjeux sociaux et communicationnels du phénomène rétro*. Sciences de l'information et de la communication. <http://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00870550/document> (2013).
- [216] LAVIGNE (C.). – *Communication privée du 07-02-2016* (2016).
- [217] JARRIGE (F.). – *Techno-critiques : du refus des machines à la contestation des technosciences*. La Découverte Ed., Paris (2014).
- [218] AKRICH (M.). – *Comment sortir de la dichotomie technique/société ; présentation de diverses sociologies de la technique*. In B. Latour et P. Lemonnier Ed. « De la préhistoire aux missiles balistiques ; l'intelligence sociale des techniques », La Découverte Ed., Paris, p. 105-131 (1994).
- [219] LEE (R.L.M.). – *Time, space, and power in digital modernity : From liquid to solid control*. Time & Society. <https://doi.org/10.1177/0961463X211016781> (2021).
- [220] MÉDA (D.). – *Qu'est-ce que la richesse ?*. Aubier Ed., Paris (1999).
- [221] CYBERLAND. – *L'impossible contrôle des armes imprimées 3D*. <http://cyberland.centerblog.net/265-impossible-contrôle-des-armes-imprimees-3d> (2015).
- [222] BENEDICT. – *West Virginia carpenter on target with (mostly) 3D printed semi-automatic gun*. <http://www.3ders.org/articles/20160203-west-virginia-carpenter-on-target-with-3d-printed-semi-automatic-gun.html> (2016).
- [223] LUPTON (D.). – *3D Printing Technologies : A Third Wave Perspective*. In Filimowicz M., Tzankova V. Ed. « New Directions in Third Wave Human-Computer Interaction : Vo-

- lume 1 – Technologies – Human-Computer Interaction Series », book series – Springer Ed., Zürich, Suisse, p. 89-104 (2018).
- [224] KOBLENTZ (G.D.). – *Emerging Technologies and the Future of CBRN Terrorism*. The Washington Quarterly, 43, p. 177-196 (2020).
- [225] OGOH (G.). – *The ethical issues of additive manufacturing*. PhD, University of Leicester, UK. https://dora.dmu.ac.uk/bitstream/handle/2086/20571/PhD_Thesis_George_Ogoh_October_2020_Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y (2020).
- [226] KOSLOW (T.). – *Sexshop3D bring safety to at-home sex toy 3D printing*. <http://3dprintingindustry.com/2015/10/12/sexshop3d-brings-safety-to-at-home-sex-toy-3d-printing/> (2015).
- [227] SEXSHOP3D. – *Printable sex toys*. <http://sexshop3d.com/store/> (2016).
- [228] YOSRA (K.). – *Une nouvelle solution de sécurité des données vise à renforcer la cyber-sécurité de la fabrication additive*. <https://3ddept.com/une-nouvelle-solution-de-securite-des-donnees-vise-a-renforcer-la-cybersecurite-de-la-fabrication-additive/> (2021).
- [229] CADIOU (P.). – *La crise du capitalisme*. <http://blogs.mediapart.fr/blog/philippe-cadiou/091015/la-crise-du-capitalisme-2> (2015).
- [230] LA FABRIQUE DE L'INDUSTRIE. – *Automatisation, emploi et travail*. http://www.la-fabrique.fr/uploads/telechargement/Le_robot_tue_til_emploi.pdf (2015).
- [231] LEVY (F) et MURNANE (R.J.). – *The New Division of Labor – How Computers are Creating the Next Job Market*. Princeton University Press Ed., Princeton, USA (2004).
- [232] GUÉRIN-TALPIN (G.). – *Communication de crise*. Ed. Préventique, Bordeaux (2003).
- [233] CAMPBELL (T.), WILLIAM (C.), IVANOVA (O.) et GARRETT (B.). – *Could 3D printing change the world ?*. Technologies, potential and implications of additive manufacturing. https://info.aiaa.org/SC/ETC/MS%20SubCommittee/Alice%20Chow_3D%20Printing%20Change%20the%20World_April%202012.pdf (2011).
- [234] PARISOT (F.). – *Sous-traitant en impression 3D, une position délicate*. <http://www.usine-nouvelle.com/article/sous-traitant-en-impression-3d-une-position-delicate.N350845> (2015).
- [235] HENKEL. – *Une technologie de rupture – Pourquoi l'impression 3D va-t-elle transformer l'industrie manufacturière ?*. <https://www.henkel.fr/espace-actualites/2018-09-12-pourquoi-l-impression-3d-va-t-elle-transformer-l-industrie-manufacturiere-874910> (2018).
- [236] SCULPTEO. – *The State of 3D Printing*. https://cdn2.hubspot.net/hubfs/5154612/Sculpteo_The%20State%20of%203D%20Printing_2019.pdf?_hstc=&_hssc=&hsCtaTracking=b87d8fd6-d12a-4dd5-ac21-8b43c50ceb51%7Cc1bcd689-0f61-4014-9ebb-3e4e2be58788 (2019).
- [237] McDERMOTT (K.C.), WINZ (R.D.), HODGSON (T.J.), KAY (M.G.), KING (R.E.) et McCONNELL (B.M.). – *Performance tradeoffs for spare parts supply chains with additive manufacturing capability servicing intermittent demand*. Journal of Defense Analytics and Logistics, sous presse. <https://doi.org/10.1108/JDAL-08-2020-0016> ou <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/JDAL-08-2020-0016/full/html> (2021).
- [238] STEVENSON (K.). – *Incorporating Additive Manufacturing Into Supply Chains*. https://www.fabbaloo.com/news/incorporating-additive-manufacturing-into-supply-chains?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=fabbaloo_daily_3d_printing_news&utm_term=2021-10-06 (2021).
- [239] CHICHEPORTICHE (O.). – *L'impression 3D entre dans l'ère de la fabrication industrielle*. https://www.bfmtv.com/economie/entreprises/services/l-impression-3d-entre-dans-l-ere-de-la-fabrication-industrielle_AV-201905280220.html (2019).
- [240] LEVET (J.L.). – *L'industrie ne disparaît pas, elle se transforme et ses frontières s'élargissent*. Interview sur le site des Industries technologiques françaises. <http://www.les-industries-technologiques.fr/actualite/regards-croises/jean-louis-levet-lindustrie-ne-disparait-pas-elle-se-transforme-et-ses-frontieres-slargissent/> (2012).
- [241] KOLLER (R.). – *L'industrie veut aussi sa transformation digitale*. <http://www.ictjournal.ch/fr-CH/News/2015/12/04/Lindustrie-veut-aussi-sa-transformation-digitale.aspx?pa=1> (2015).
- [242] STRATASYS. – *Le champ d'application de nos imprimantes 3D dans l'industrie*. <https://www.stratasys.com/fr/3d-printing-industries> (2021).
- [243] ROSENBERG (J.), MORAND (P.) et TURCO (D.). – *L'impression 3D : porte d'entrée dans l'industrie du 21^{ème} siècle*. <http://www.adverbe.com/wp-content/uploads/2015/09/rapport-impression3d.pdf> (2015).
- [244] COYLE (D.). – *First movers and fast second*. <http://www.enlightenmenteconomics.com/blog/index.php/2012/10/first-movers-and-fast-second/> (2012).
- [245] ROLLOT (O.). – *Devenir créatif, ça s'apprend*. <http://orientation.blog.lemonde.fr/2015/08/31/devenir-creatif-ca-sapprend/> (2015).
- [246] MADDYNESS. – *OpenInno : Dassault Systems se rapproche de startups avec son 3D Experience Lab*. http://www.maddynews.com/startup/2015/11/10/dassault-systemes-3dexperience-lab/?utm_source=MaddyNews&utm_campaign=6b2553c2fa-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_medium=email&utm_term=0_0800d260f2-6b2553c2fa-70445445 (2015).
- [247] HEATON (L.). – *Innovation ouverte*. In J. Prud'homme, P. Doray et F. Bouchard « Sciences, technologies et sociétés de A à Z », Presses de l'Université de Montréal, Canada, p. 129-132 (2015).
- [248] MAURIN (E.). – *La fabrique du conformisme*. La république des idées, Seuil Ed., Paris (2015).
- [249] COULET (A.). – *Le marché de l'impression 3D, secteur médical et santé*. <http://www.fabulous.com.co/blog/2015/11/impression-3d-medecine-medical-sante-quel-marche/> (2015).
- [250] BOJANOVA (I.). – *The digital revolution : what's on the horizon*. IT Professionnel, 16, p. 8-12 (2014).
- [251] RAYNAL (J.). – *Prototypage rapide : Ford a imprimé 500 000 pièces en 3D dans ses studios de design*. <http://www.industrie-techno.com/prototypage-rapide-ford-a-imprime-500-000-pieces-en-3d-dans-ses-studios-de-design.41514> (2015).
- [252] ROCHER (S.) et MATHÉ (J.C.). – *Contrôler la rupture technologique pour rester leader : une stratégie gagnante ?*. Une illustration au travers du marché des consoles de jeux vidéo. Management & Avenir, 4, p. 9-24 (2006).
- [253] GHOBADIAN (A.), TALAVERA (I.), BHATTA CHARYA (A.), KUMAR (V.), GARZA-REYES (J.A.) et O'REGAN (N.). – *Examining legitimization of additive manufacturing in the interplay between innovation, lean manufacturing and sustainability*. International Journal of Production Economics, 219, p. 457-468 (2020).
- [254] BI (Z.), WANG (G.), THOMPSON (J.), RUIZ (D.), ROSSWURM (J.), ROOF (S.) et GUANDIQUE (C.). – *System framework of adopting additive manufacturing in mass production line*. Enterprise Information Systems, DOI : 10.1080/17517575.2021.1931461 (2021).
- [255] BRANCHE (P.M.). – *Impression 3D ; la fin annoncée des transports*. http://www.voxlog.fr/dossier/13_2/logistique-et-transport-impression-3d-remet-en-cause-la-supply-chain (2015).
- [256] TUMBLESTON (J.R.), SHIRVANYANTS (D.), ERMOSHKIN (N.), JANUSZIEWICZ (R.), JOHNSON (A.R.), KELLY (D.), CHEN (K.), PINSCHMIDT (R.), ROLLAND (J.), ERMOSHKIN (A.), SAMULSKI (E.T.) et DESIMONE (J.M.). – *Continuous liquid interface production of 3D objects*. Science – Research Reports, 347, p. 1349-1352 (2015).
- [257] WHEELER (A.). – *Legacy effects uses Carbon 3D printer for progressive Ad&Terminator : Genisys*. <http://3dprintingindustry.com/2015/06/22/legacy-effects-using-carbon-3d-printer-for-progressive-commercial-and-new-terminator-movie/> (2015).
- [258] COUTO (A.). – *Labos de recherche, tremplin pour start-up : 4 pépites techno de la fabrication d'échantillons et prototypes*. <https://www.industrie-techno.com/article/labos-de-recherche-tremplin-pour-start-up-4-pepites-techno-de-la-fabrication-d-echantillons-et-prototypes.66278> (2021).
- [259] CHATTERJEE (S.), MOODY (G.), LOWRY (P.B.), CHAKRABORTY (S.) et HARDIN (A.). – *Information Technology and organizational innovation : Harmonious information technology affordance and courage-based actualization*. The Journal of Strategic Information Systems, 29, 101596 (2020).
- [260] ABBAS (J.), ZHANG (Q.), HUSSAIN (I.), AKRAM (S.), AFAQ (A.) et SHAD (M.A.). – *Sustainable Innovation in Small Medium Enterprises : The Impact of Knowledge Management on Organizational Innovation through a Mediation Analysis by Using SEM Approach*. Sustainability, 12, 2407 (2020).

- [261] MEEDABYTE. – *Introducing the platform design toolkit 2.0*. <http://meedabyte.com/2015/11/06/platform-design-toolkit-2-0-open-for-comments/> (2015).
- [262] FORGEARD (N.). – *L'aéronautique et l'aéronautique civile*. In J. Attali, C. de Boissieu Ed. « Un monde en mouvement ; enjeux et défis », ESKA Ed., Paris, p. 173-176 (2007).
- [263] NOTTEAU (Y.). – *Histoire de l'impression 3D*. <http://www.additive.com/actualites/2014-09-29/histoire-de-l-impression-3d> (2014).
- [264] MOLITCH-HOU (M.). – *FDA approves the first 3D printed drug*. http://3dprintingindustry.com/2015/08/03/fda-approves-the-first-3d-printed-drug/?utm_source=3D+Printing+Industry+Update&utm_medium=email&utm_campaign=bda4f56508-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_term=0_695d5c73dc-bda4f56508-64557777 (2015).
- [265] INDUSTRIE ET TECHNOLOGIE. – *Médicaments imprimés, famille robot, Google Science Fair : les innovations qui (re)donnent le sourire*. <http://www.industrie-techno.com/medicaments-imprimes-famille-robot-google-science-fair-les-innovations-qui-re-donnent-le-sourire.39303> (2015).
- [266] MEKKAOU (A.). – *Impression 3D : Les créations les plus insolites*. <http://www.welovebuzz.com/impression-3d-les-creations-les-plus-insolites/> (2014).
- [267] COLLECTIF TEXTILE. – *Impression 3D*. <http://collectiftextile.com/impression-3d/> (2013).
- [268] GRAHAM (S.). – *Sarah Graham metalsmithing*. <http://sarahgraham.com/product-category/jewelry/shop-by-categories/rings/> (2015).
- [269] DDD NEWS. – *L'impression 3D et l'architecture*. <http://dddfactory.fr/ddd-news/> (2015).
- [270] HYNEK (E.). – *L'impression 3D, une révolution pour le secteur du BTP ?*. <https://imtech.wp.imt.fr/2021/09/20/l'impression-3d-une-revolution-pour-le-secteur-du-btp/> (2021).
- [271] BATACTU. – *Des villages imprimés en 3D pour dépolluer les océans*. <http://www.batactu.com/edito/villages-subaquatiques-imprimes-3d-depolluer-océans-43181.php> (2016).
- [272] TUCKER (E.). – *New balance partners with nervous systems to design personalized 3D printer trainer soles*. <http://www.dezeen.com/2015/12/06/new-balance-nervous-system-3d-printed-personalised-soles-trainers-footwear/> (2015).
- [273] COUNCIL (A.) et PETCH (M.). – *Future food*. E. Lang Ed., New-York, USA (2015).
- [274] KOSLOW (T.). – *A fully 3D printed meal to satisfy every elder's appetite*. http://3dprintingindustry.com/2015/10/20/the-performance-concept-a-full-3d-printed-meal-to-satisfy-every-elderly-persons-appetite/?utm_source=3D+Printing+Industry+Update&utm_medium=email&utm_campaign=55e99ef15d-RSS_EMAIL_CAMPAIGN&utm_term=0_695d5c73dc-55e99ef15d-64557777 (2015).
- [275] NEDJAR (S.). – *La révolution des makers : du Fab-Lab à l'agilité*. <http://labaixbidouille.github.io/PrezATM/presentation.html> (2015).
- [276] DUPUY (J.P.). – *Pour un catastrophisme éclairé. Quand l'impossible est certain*. Sciences humaines Ed., Paris (2008).
- [277] CITTON (Y.). – *Pour une écologie de l'attention*. Seuil Ed., Paris (2014).
- [278] EUROFOUND. – *Additive manufacturing : A layered revolution*. <https://euagenda.eu/upload/publications/untitled-150334-ea.pdf> (2017).
- [279] WENT (R.), KREMER (M.) et KNOTTNERUS (A.). – *Netherlands Scientific Council for Government Policy – Mastering the Robot – The Future of Work in the Second Machine Age*. http://test6.wrr.nl/fileadmin/en/publicaties/PDF/Verkenningen/Mastering_the_Robot_Web.pdf (2015).
- [280] FREY (C.) et OSBORNE (M.). – *The future of employment : how susceptible are jobs to computerisation ?*. Oxford Martin School Ed., Oxford, UK (2013).
- [281] BRUEGEL. – *Chart of the week : 54 % of EU jobs at risk of computerisation*. <http://bruegel.org/2014/07/chart-of-the-week-54-of-eu-jobs-at-risk-of-computerisation/> (2014).
- [282] BRYNJOFSSON (E.) et McAfee (A.). – *Will humans go the way of horses ?*. Labor in the second machine age. Foreign Affairs, 94, p. 8-14 (2015).
- [283] BOSTON CONSULTING GROUP. – *Public sector, people strategy, organization design – How Governments and the Private Sector Can Transform Employment Services* (2015).
- [284] SALOMONS (A.). – *Explaining Job Polarization : Routine-Biased Technological Change and Offshoring*. American Economic Review, 104, p. 2509-2526 (2015).
- [285] WEF (WORLD ECONOMIC FORUM). – *Futurism is a means to see beyond COVID-19. Here's how to time travel*. <https://www.weforum.org/agenda/2021/04/how-futurism-can-help-you-navigate-a-post-covid-future-gtgs21/> (2021).
- [286] BOHNIEUST (A.). – *La crise a détruit 114 millions d'emplois en 2020 dans le monde*. <https://www.lefigaro.fr/conjoncture/covid-19-la-crise-a-detruit-114-millions-d-emplois-en-2020-dans-le-monde-20210707> (2021).
- [287] DUCOUDRÉ (B.) et MADEC (P.). – *Emploi et chômage avant et après Covid-19*. L'économie française, p. 48-63 (2022).
- [288] BLANC (S.). – *Chéri, achète de la lessive et imprime un porte-clé*. Slate, <http://www.slate.fr/story/79484/imprimante-3d-super-marche-auchan> (2013).
- [289] VOGEL (B.J.). – *Intellectual Property and Additive Manufacturing/3D Printing : Strategies and Challenges of Applying Traditional IP Laws to a Transformative Technology*. Minnesota Journal of Law, Science & Technology, 17, p. 881-905 (2016).
- [290] BALLARDINI (R.M.). – *Intellectual Property Rights and Additive Manufacturing*. In Pei E., Monzon M., Bernard A. « Additive Manufacturing – Developments in Training and Education », Springer Ed., Zürich, Suisse, p. 85-97 (2019).
- [291] IMBERMAN (S.) et FIDDLER (A.). – *Using Creative Commons licenses to create OER*. ACM Inroads, 10, p. 16-21 (2019).
- [292] MARION (F.). – *L'économie collaborative peut-elle faire bon ménage avec le droit ?*. http://www.up-magazine.info/index.php?option=com_content&view=article&id=5550:l-economie-collaborative-peut-elle-faire-bon-menage-avec-le-droit&catid=128:economie-de-l-innovation&Itemid=586&utm_source=newsletter_226&utm_medium=email&utm_campaign=up-nl-vnew-quotsthsh.F6ilp1yT.dpuf (2016).
- [293] MAGISTRELLI (G.). – *Le développement constant des normes en fabrication additive*. <https://www.a3dm-magazine.fr/magazine/toutes-industries/developpement-normes-fabrication-additive> (2020).
- [294] CORDIS. – *Support Action for Standardization in Additive Manufacturing*. <https://cordis.europa.eu/project/id/319167/reporting/es> (2014).
- [295] CORDIS. – *Support Action for Standardization in Additive Manufacturing*. <https://cordis.europa.eu/project/id/319167> (2019).
- [296] AM-MOTION. – *Standardization report : gaps and procedures*. https://www.rm-platform.com/images/DOCUMENTS/D3.4_AM_standardisation_report.pdf (2016).
- [297] DUVENAGE (B.J.L.). – *Towards a conceptual framework for the identification & implementation of additive manufacturing standards*. PhD thesis, Stellenbosch University, South-African Union. <https://scholar.sun.ac.za/handle/10019.1/106104> (2019).
- [298] ISO/TC 261. – *Additive manufacturing*. <https://www.iso.org/committee/629086.html> (2020).
- [299] BANGERT (M.). – *Additive Manufacturing Standards – Manufacturers should be aware of the many standards for this technology*. <https://www.qualitymag.com/articles/96498-additive-manufacturing-standards> (2021).
- [300] SPRINKLE (T.). – *The 5 Most Important Standards in Additive Manufacturing*. <https://sn.astm.org/?q=features/5-most-important-standards-additive-manufacturing-.html> (2021).
- [301] JACO (F.). – *CEA-CNRS : l'accord fait la force*. <https://www.cea.fr/presse/Pages/actualites-communiques/institutionnel/cea-cnrs-ac-cord-fait-la-force.aspx> (2021).
- [302] BISHOP (E.G.) et LEIGH (S.J.). – *Using Large-Scale Additive Manufacturing as a Bridge Manufacturing Process in Response to Shortages in Personal Protective Equipment during the COVID-19 Outbreak*. International Journal of Bioprinting, 6, p. 281 (2020).
- [303] WIPO (WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION). – *WIPO – Technology Trends 2021 – Assistive Technology*. https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_1055_2021.pdf (2021).
- [304] MBUNGE (E.), AKINNUWESI (B.), FASHOTO (S.), METFULA (A.) et MASHWAMA (P.). – *A critical review of emerging technologies for tackling COVID-19 pandemic*. Human behavior and emerging technologies, 3, p. 25-39 (2021).
- [305] PUSLECKI (L.), DABROWSKI (M.) et PUSLECKI (M.). – *Development of Innovation Cooperation in the Time of COVID-19 Pandemic*. European Research Studies, 24, 1049 (2021).

- [306] TAREQ (S.), RAHMAN (T.), HOSSAIN (M.) et DORRINGTON (P.). – *Additive manufacturing and the COVID-19 challenges : An in-depth study*. Journal of Manufacturing Systems, 60, p. 787-798 (2021).
- [307] CORSINI (L.), DAMMICCO (V.) et MOULTRIE (J.). – *Frugal innovation in a crisis : the digital fabrication maker response to COVID-19*. R & D management, 51, p. 195-210 (2021).
- [308] TEMPELHOFF (J.). – *A remarkable year with new opportunities for transdisciplinarity*. The Journal for Transdisciplinary Research in Southern Africa, 16, p. 1-2 (2020).
- [309] ANDRÉ (J.C.). – *Entre générosité, éthique, coronavirus et impression 3D*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/entre-generosite-et-hyque-coronavirus-et-impression-3d-77171/> (2020).
- [310] KUNOVJANEK (M.) et WANKMÜLLER (C.). – *An analysis of the global additive manufacturing response to the COVID-19 pandemic*. Journal of manufacturing technology management, 32, p. 75-100 (2020).
- [311] ACADÉMIE DES TECHNOLOGIES. – *Calcul et données : nouvelles perspectives pour la simulation numérique à haute performance*. <https://www.academie-technologies.fr/blog/categories/publications-de-l-academie/posts/calcul-et-donnees-nouvelles-perspectives-pour-la-simulation-a-haute-performance-rapport> (2021).
- [312] WEF (WORLD ECONOMIC FORUM). – *The future of jobs*. <http://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs> (2016).
- [313] ENGLER (A.). – *How open-source software shapes AI policy*. https://www.brookings.edu/research/how-open-source-software-shapes-ai-policy/?utm_campaign=Brookings%20Brief&utm_medium=email&utm_content=148348317&utm_source=hs_email (2021).
- [314] FALLY (B.) et VISEUR (R.). – *Mobilisation collective autour des makers pour la production locale de respirateurs open source : nouvelles pratiques à exploiter ?*. <https://www.makery.info/2021/09/27/mobilisation-collective-autour-des-makers-pour-la-production-locale-de-respirateurs-open-source-nouvelles-pratiques-a-exploiter/> (2021).
- [315] MAKERY. – *Mobilisation collective autour des makers pour la production locale de respirateurs open source : nouvelles pratiques à exploiter ?*. <https://www.makery.info/2021/09/27/mobilisation-collective-autour-des-makers-pour-la-production-locale-de-respirateurs-open-source-nouvelles-pratiques-a-exploiter/> (2021).
- [316] WELLENER (P.), REYES (V.), ASHTON (H.) et CHAD (M.). – *Creating pathways for tomorrow's workforce today – Beyond reskilling in manufacturing*. <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/manufacturing/manufacturing-industry-diversity.html> (2021).
- [317] EY (ERNST & YOUNG). – *Beyond COVID-19 What Will Define the « New Normal »*. <https://assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/fi-fi/pdf/beyond-covid-19-what-will-define-the-new-normal.pdf> (2020).
- [318] UNIDO (UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION). – *COVID-19 Implications and Response – Digital Transformation and Industrial Recovery*. https://www.unido.org/sites/default/files/files/2020-07/UNIDO_COVID_Digital_Transformation_0.pdf (2020).
- [319] GOLD (S.). – *Let's Prepare Graduates for Jobs that Don't Exist (Yet)*. <https://www.industryweek.com/talent/education-training/article/21164020/lets-prepare-graduates-for-jobs-that-dont-exist-yet> (2021).
- [320] ANDRÉ (J.C.). – *Les nouveaux défis de la fabrication additive*. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-nouveaux-defis-de-la-fabrication-additive-71380/> (2020).
- [321] G30 (GROUP OF THIRTY). – *Reviving and restructuring the corporate sector post-Covid – Designing public policy interventions*. https://iatranshumanisme.com/wp-content/uploads/2021/01/G30_Reviving_and_Restructuring_the_Corporate_Sector_Post_Covid.pdf (2020).
- [322] WB (WORLD BANK). – *Global economic prospects*. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/34710/9781464816123.pdf> (2021).
- [323] ANDRÉ (J.C.). – *Post-Covid-19 : entre retour au passé et créativité*. Environnement, Risques et Santé, 20, p. 233-237 (2021).
- [324] LAMARD (P.) et LEQUIN (Y.C.). – *Elements of Technical Democracy*. Journal of Innovation Economics & Management, 22, p. 171-181 (2017).
- [325] LE VERT (A.). – *L'État doit continuer à investir pour créer un écosystème des innovateurs et favoriser les transferts de compétences entre public et privé*. <https://www.societal.fr/alexandre-le-vert-letat-doit-continuer-a-investir-pour-creer-un-ecosysteme-des-innovateurs-et> (2021).
- [326] CAE (CONSEIL D'ANALYSE ÉCONOMIQUE). – *Les Français au temps du Covid-19 : économie et société face au risque sanitaire et La gestion de la crise sanitaire en France au miroir de la défiance politique et d'une société peu cohésive*. <https://www.cae-eco.fr/les-francais-au-temps-du-covid-19-economie-et-societe-face-au-risque-sanitaire-en-france-au-miroir-de-la-defiance-politique-et-dune-societe-peu-cohesive> (2021).
- [327] WENDLING (C.). – *Building Beyond – Construire à partir de nos vulnérabilités*. <https://leonard.vinci.com/building-beyond-jour-3-construire-a-partir-de-nos-vulnerabilites/> (2021).
- [328] ALEXANDRE (L.). – *La mort de la mort ; comment la techno-médecine va bouleverser l'humanité ?*. Latès J.C. Ed., Paris (2011).
- [329] MARCHESNAY (M.). – *Le système 1 « Parva sed apta » : l'innovation dans les PME*. In S. Bouteiller, F. Djellal et D. Uzunidis Ed. « L'innovation : analyser, anticiper, agir », P. Lang Ed., Bruxelles, Belgique, p. 29-62 (2013).
- [330] IREPA-LASER. – *Le procédé CLAD*. <http://www.beam-machines.fr/innovation/la-technologie.html> (2015).

Autres pistes de lecture

ALLARD (L.). – *Numérique : les « nouveaux » usages sont-ils si nouveaux ?*. <http://www.inaglobal.fr/numerique/article/numeriques-nouveaux-usages-sont-ils-si-nouveaux-8442> (2015).

BRYNJOLFSSON (E.) et McAfee (A.). – *Le deuxième âge de la machine ; travail et prospérité à l'heure de la révolution technologique*. O. Jacob Ed., Paris (2014).

FU (P.). – *From bottom-up to top-down : governance, institutionalisation, and innovation in Chinese maker-spaces*. Technology Analysis & Strategic Management, 33, p. 1226-1241 (2021).

KOHLER (J.Ed.). – *Concurrent design foresight*. EU Commission, Brussel. http://ec.europa.eu/research/swafs/pdf/pub_governance/concurrent_design_foresight_report.pdf (2015).

LE BOURHIS (F.), KERBRAT (O.), HASCOËT (J.Y.) et MOGNOL (P.). – *Évaluation et modélisation des impacts environnementaux en fabrication directe, application à la projection de poudre*. Proceedings of AEPR'12, 17th European Forum on Rapid Prototyping and Manufacturing, Paris. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00844885/document> (2012).

LE BOURHIS (F.), KERBRAT (O.), HASCOËT (J.Y.) et MOGNOL (P.). – *Sustainable manufacturing : evaluation and modeling of environmental impacts in additive manufacturing*. International Journal of Advanced Manufacturing Technologies, 69, p. 1927-1939 (2013).

LEVI (P.), MEISTER (E.) et SCHLACHTER (F.). – *Reconfigurable swarm robots produce self-assembling and self-repairing organisms*. Robotics and Autonomous Systems, 62, p. 1371-1376 (2014).

SARDAR (Z.). – *Post-normal times revisited*. Futures, 67, p. 26-39 (2015).

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

À lire également dans nos bases

DEMOLY (F.) et ANDRÉ (J.C.). – *Impression 4D : Promesses ou futur opérationnel ?*. [RE 285].

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

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

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

Principes et enjeux

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

Créativité et fabrication additive – Infographie. [BM 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. [AG 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 prototype rapide – Exemples d'industrialisations de produits. [AG 3 404].

Stéréolithographie par photopolymérisation. [BM 7 910].

Procédés par familles de matériaux

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

Microstéréolithographie de pièces céramique 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 poudre métalliques par la méthode PREP. [IN 221].

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

Frittage : aspect 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

- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique



TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

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



AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE

- Automatique et ingénierie système
- Robotique



INGÉNIERIE DES TRANSPORTS

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



MESURES – ANALYSES

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



PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO

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



SCIENCES FONDAMENTALES

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



BIOMÉDICAL – PHARMA

- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques



CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS

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