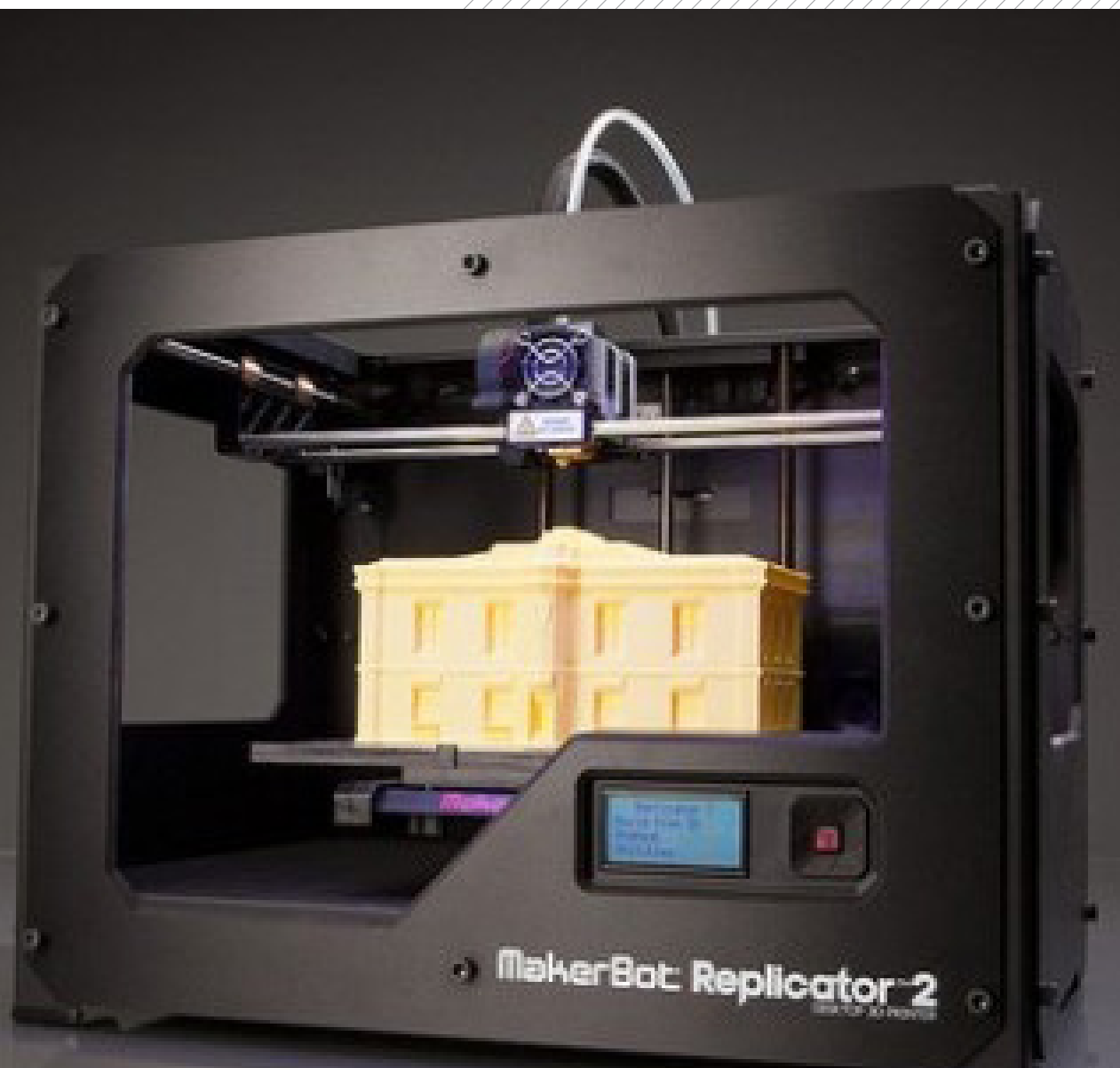


LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



L'IMPRESSION 3D DANS UNE PERSPECTIVE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

Réf. : **AG6753 V1**

Date de publication :
10 janvier 2015

L'impression 3D dans une perspective de développement durable

Cet article est issu de : **Mécanique | Travail des matériaux - Assemblage**

par **Laurent MOLINARI**

Mots-clés

Analyse de cycle de vie | FabLab | écoconception | fabrication additive | impression 3D | dépôt de fil

Résumé Cet article s'intéresse au positionnement de l'impression 3D vis-à-vis du développement durable. Y seront exposés les bénéfices liés à cette nouvelle technologie, mais aussi ses limites et sa capacité à être à l'origine d'une nouvelle révolution industrielle.

Keywords

Life Cycle Analysis | FabLab | eco-design | additive manufacturing | 3D printing | fused deposition modeling

Abstract This article wants to describe the potential of this new-way-to-make-products in a sustainability approach. Then, this article tries to explain the sustainable promises/benefits of the 3D printing and in counterpart the limits of these impacts.

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 : **23/03/2017**

Pour le compte : **7209031701 - editions ti // charlotte PALMA // 195.25.183.157**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

L'impression 3D dans une perspective de développement durable

par **Laurent MOLINARI**

Cofondateur & COO – Zen'to Technologie, France

1. Qu'est-ce que l'impression 3D	AG 6 753 - 2
2. État des lieux	— 2
2.1 Technologies en présence	— 2
2.2 Enjeux économiques et domaines impactés.....	— 3
2.3 Écosystème, acteurs	— 4
3. bouleversements possibles	— 5
3.1 Autre approche de la consommation.....	— 5
3.2 Vers un rallongement de la durée de vie des produits.....	— 5
3.3 Partage du savoir	— 6
3.4 Transformation des modèles de vente	— 6
3.5 Relocalisation de l'économie	— 6
4. Apports techniques	— 6
5. Limites et freins.....	— 8
5.1 Gadget ou réelle utilité	— 8
5.2 Problématique des matières : le plastique	— 8
5.3 Gestion des droits de propriétés	— 8
6. Conclusion et perspectives	— 9
7. Glossaire – Définitions.....	— 9
Pour en savoir plus	Doc. AG 6 753

L'impression 3D constitue un sujet qui suscite beaucoup d'interrogations : l'aspect quelque peu magique de voir sous nos yeux se créer des objets à partir d'un ordinateur pourrait ouvrir la voie à une modification profonde du modèle de développement économique de notre société.

Cet article souhaite aborder le positionnement de cette nouvelle technologie vis-à-vis du développement durable, plus précisément du respect de l'environnement.

Il s'agit donc ici de comprendre les promesses liées à cette nouvelle technologie afin d'identifier sa possible contribution à un mode de développement écoresponsable. Mais, au-delà de ces promesses, il s'agira aussi de dresser les limites de cette révolution technologique et de sa capacité à être à l'origine d'une nouvelle révolution industrielle.

1. Qu'est-ce que l'impression 3D

Le terme « impression 3D » se définit par opposition aux traditionnelles techniques d'impression 2D permettant la production/reproduction de textes ou d'images. La « promesse » de cette nouvelle technologie consiste ainsi à permettre de fabriquer de véritables objets en trois dimensions à partir d'une source numérique.

L'apport de la technologie numérique n'est pas forcément nouveau. En effet, la conception assistée par ordinateur (CAO) et la fabrication assistée par ordinateur (FAO) existent dans le monde industriel depuis plusieurs décennies. La FAO est notamment associée aux machines à commandes numériques, qui sont largement utilisées dans le domaine de l'usinage de pièces pour le secteur industriel.

Par contre, les principes de la « fabrication additive », qui permet le déploiement de la technologie et donc la capacité à fabriquer soi-même des objets au sein de la société, et son impact potentiel sur nos modes de consommation et donc nos modes de vie, sont sans précédent.

2. État des lieux

2.1 Technologies en présence

L'une des principales caractéristiques de l'impression 3D ou tridimensionnelle est le principe même de la technique. Là où l'usinage à commande numérique se base sur un procédé par enlèvement de matière, les technologies d'impression reposent sur des approches « additives ». Il s'agit de créer un objet par dépôts successifs (donc par addition) de matière en suivant un format, un modèle prédéfini.

Cette caractéristique se retrouve d'ailleurs dans la terminologie puisque la notion de « *Additive Manufacturing* » (AM) est souvent utilisée en lieu et place de la notion d'« impression 3D ». La notion d'AM est plus large que les seuls systèmes d'impression puisqu'elle englobe l'ensemble de l'écosystème attaché à ce procédé de fabrication.

Le principe général repose ainsi sur la modélisation de matières préexistantes sous forme de poudre, liquide ou solide (fil) afin d'en constituer, par agglomération de couches, des formes et donc des objets.

Afin d'illustrer ces différentes technologies, citons les procédés suivants :

- le *Fuse Deposition Modeling* (FDM) est basé sur un principe de modelage par dépôt de matière en fusion, la matière étant chauffée par une buse. Le principe se rapproche du « fer à souder », puisqu'un fil de plastique très fin (environ un dixième de millimètre) est alors déposé et vient se coller aux autres pour constituer, par accumulation, une forme ;
- la stéréolithographie (SLA) est une technologie où une lumière UV solidifie une couche de plastique liquide qui, par accumulation de couches 2D, permet de créer des formes en 3D ;
- le frittage sélectif par laser est une technologie qui reprend le principe de la stéréolithographie, mais elle utilise un laser qui solidifie une couche de matière (résine ou poudre) et permet, là encore, par accumulation de couches 2D de construire des formes.

Les principaux matériaux utilisés sont les suivants, par ordre de fréquence d'utilisation :

- le plastique, selon différents coloris ;
- la céramique ;
- les thermoplastiques (polycarbonate, polyamides, le chlorure de polyvinyle) ;
- les élastomères ;
- certains métaux notamment l'argent, le cuivre, l'acier ;
- la cire ;
- les résines.

Mais, le principe de l'impression 3D étant la transformation de matières, l'adaptation ou l'utilisation de cette technique peut concerner tous les types de matières, par exemple :

- l'imprimante Choc Creator de la société Choc Edge (<http://www.chocedge.com/index.php>) permet désormais de créer des formes 3D en chocolat. Au-delà du côté anecdotique, l'utilisation de l'impression pour des besoins alimentaires constitue déjà une réalité, d'un point de vue technique même si elle est encore loin de passer dans le domaine courant, notamment pour des raisons de contrôle sanitaire ;
- la société Organovo (<http://www.organovo.com/company/about-organovo>) produit, à partir d'impression 3D, des tissus biologiques destinés à la recherche médicale ;
- la diversité des matériaux utilisés et la finesse d'impression permet de réaliser des circuits imprimés et ouvre donc la voie à la réalisation d'objets intégrant de l'électronique ;
- la société ODD Guitars a produit des guitares dont le corps est réalisé en impression 3D. Ces guitares sont aujourd'hui commercialisées et parfaitement utilisables dans un contexte professionnel. La tension et la force exercée par les cordes sur le corps, comme sur toute guitare, démontrent la solidité et la capacité de résistance du principe de fabrication. La société commercialise via son site Internet (<http://www.odd.org.nz>) différents modèles à partir de 3 000 \$ à l'instar du modèle ATOM (<http://www.odd.org.nz/atom.html>) présenté dans la figure 1 ;
- le projet monologue (<http://www.lefashionpost.com/actus/2014/06/le-monologue-du-soulier.html>), soutenu notamment par Dassault Systèmes, propose la réalisation sur mesure d'escarpins : une machine permet de scanner les pieds de la cliente afin de dimensionner la chaussure. La cliente peut ensuite personnaliser le style de la chaussure et les matières à utiliser ;
- la mode n'est pas épargnée par le phénomène de l'impression 3D : des lignes de vêtements sont désormais entièrement réalisées à partir d'impression 3D. Citons, par exemple, le cas de la créatrice Madeline Gannon qui réalise des colliers dont les modèles sont accessibles à l'adresse suivante : <http://www.madlab.cc> et dont une illustration est présentée dans la figure 2.

Nous ne détaillerons pas ici l'ensemble des technologies possibles : il est indéniable que les procédés de fabrication évolueront de manière très rapide au fur et à mesure des années, poussés aussi bien par les capacités d'innovation des nombreuses *start-up* et laboratoires de recherche qui investissent ce sujet, que par la communauté *OpenSource* qui œuvre dans la mise en œuvre régulière de technologies plus faciles à mettre en œuvre et moins coûteuses.



Figure 1 – Exemple de guitare (modèle ATOM) réalisée en impression 3D (<http://www.odd.org.nz/atom.html>)



Figure 2 – Exemple de réalisation de colliers par la créatrice Madeline Gannon (<http://www.madlab.cc>)

2.2 Enjeux économiques et domaines impactés

Le cabinet d'analyse Wohlers Associates publie chaque année un rapport sur l'état du marché du domaine de la fabrication additive et de l'impression 3D. L'étude donne quelques chiffres très intéressants pour comprendre l'ampleur du phénomène.

La croissance du marché des produits (machines, logiciels et matériaux associés à la fabrication 3D) et des services (prestations d'impression, de conseil et de diffusion de modèles) a suivi une croissance moyenne de 27 % sur la période 2010-2012 pour atteindre 2,2 milliards de dollars de chiffre d'affaires.

Les domaines d'activités impactés aujourd'hui par l'impression 3D sont divers, comme le montre les travaux du cabinet Wohlers sur l'étude des activités de 27 fournisseurs d'équipements et 71 prestataires de services. Ces travaux ont été repris dans une étude sur l'impression 3D du Sierra College Center for Applied Competitive Technologies qui présente en pages 7 et 8 les utilisations de l'impression 3D. La figure 3 présente notamment en proportion du chiffre d'affaires (CA) les secteurs d'activités concernés par l'impression 3D.

Les principaux secteurs d'activités de destination de l'impression 3D sont les produits de grande consommation et électronique, l'équipement et le design automobile et le secteur médical et dentaire.

En regard de cette diffusion dans le monde industriel, il convient cependant de prendre un peu de recul dans le déploiement actuel de la technologie : le déploiement généralisé de « biens » produits directement à partir d'impression 3D ne constitue pas encore une réalité mais bien une perspective.

Ainsi et toujours dans la même étude de Wohler, les types d'utilisation de la technologie dans les différents secteurs montrent que celle-ci n'est utilisée actuellement qu'à hauteur de 20 % pour produire des biens directement intégrés dans la production donc susceptibles d'être vendus ou intégrés en tant que composant d'un produit fini. Cette part n'est donc pas négligeable à l'heure actuelle et va tendre à s'accroître dans les prochaines années... La figure 4, graphique issu de l'étude du Sierra College, présente l'utilisation de la technologie 3D Printing dans le cycle de production.

Schématiquement les quatre grands axes d'utilisation de l'impression 3D sont les suivants.

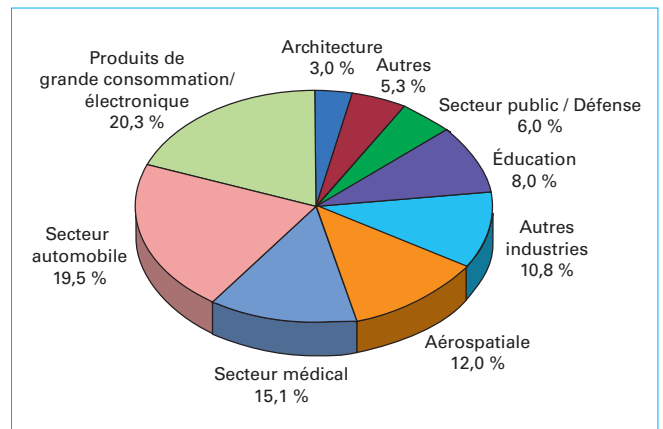


Figure 3 – Pourcentage en chiffre d'affaires des secteurs d'activités « utilisateurs » de l'impression 3D (Sierra College Center for Applied Competitive Technologies – p. 7)

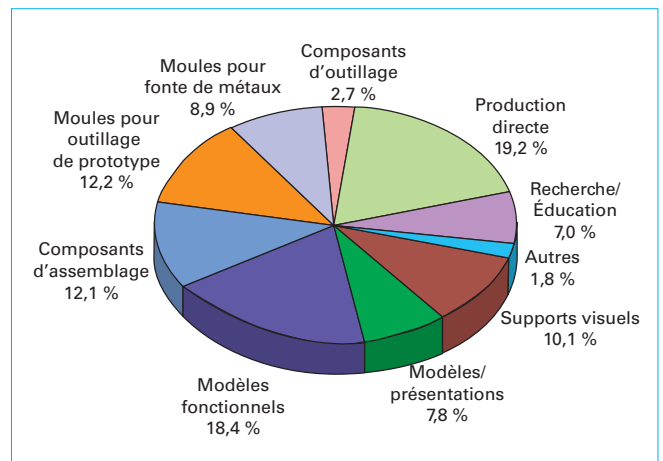


Figure 4 – Utilisation de la technologie 3D Printing dans le cycle de production (Sierra College Center for Applied Competitive Technologies – p. 8)

■ **Le prototypage rapide** : les techniques d'impression 3D permettent de passer très rapidement de la phase de conception à la réalisation de prototype ; d'une part, les opérations de conception et de réalisation peuvent être centralisées au sein d'une même équipe et, d'autre part, l'absence d'opérations intermédiaires pour la réalisation du prototype (absence de réalisation de moules) permet de gagner un temps considérable sur le temps total de cette phase. Il est ainsi possible de mettre en place un cycle de conception de type itératif, basé sur des cycles très courts, tel que l'on peut le connaître dans le développement informatique.

■ **La production de petites séries** : l'impression 3D permet d'envisager la production de petites séries qui sont aujourd'hui économiquement difficiles à envisager sur des chaînes de production classique : là-encore la relation directe entre la phase de conception et la réalisation est un élément qui rend économiquement viable la production de produits en quantité limitée.

■ **La recherche de nouvelles formes et l'écoconception** : comme nous le montrerons plus loin dans cet article, certains secteurs comme l'aéronautique utilisent l'impression 3D pour optimiser le poids de leurs composants et rechercher de nouvelles formes.

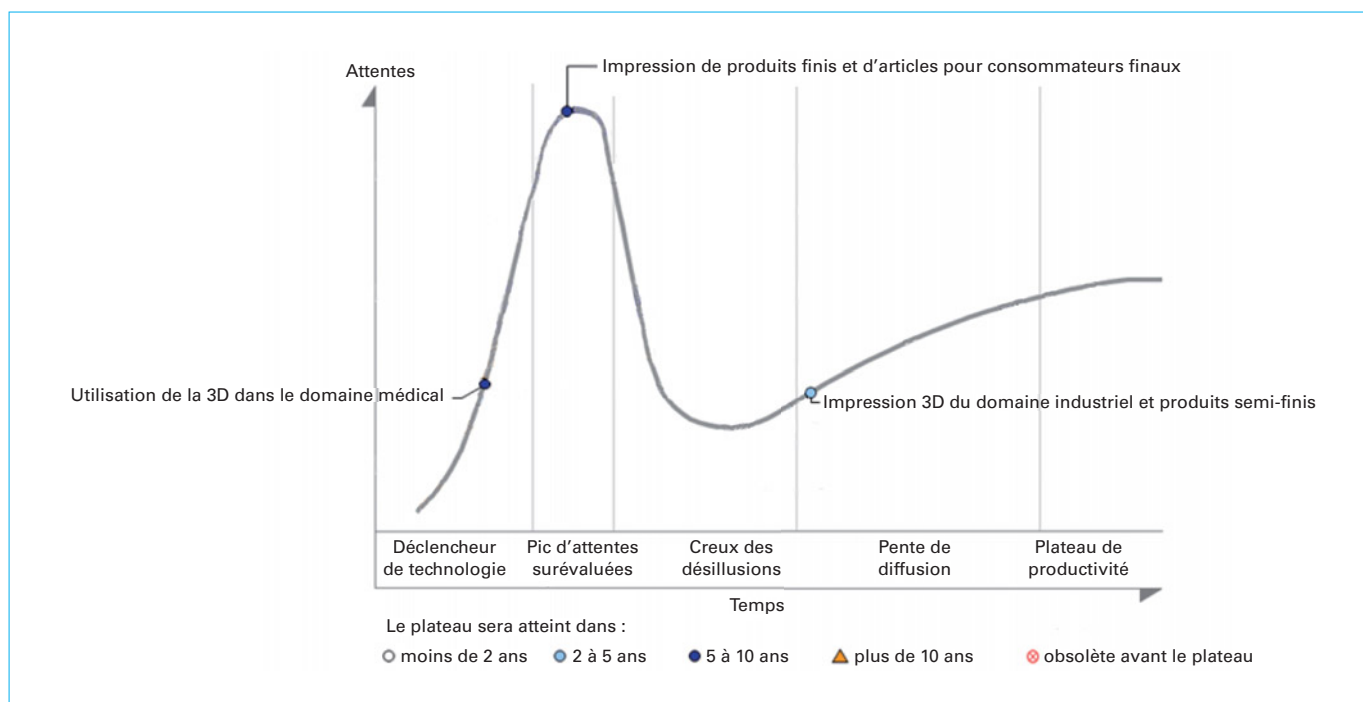


Figure 5 – Gartner, Inc 2013. Hype Cycle for Emerging Technologies <http://www.gartner.com/newsroom/id/2575515> – (cf. glossaire en fin d'article)

■ **La personnalisation des objets** : la production rapide et à la demande de produits permet de rapprocher la création des objets des désirs des consommateurs en proposant la personnalisation de ceux-ci. L'exemple le plus classique est aujourd'hui la coque de téléphone mobile qui peut être imprimée à la demande et en intégrant des motifs et des couleurs décidés par le client.

Ces nouvelles capacités de production cassent la dichotomie habituelle entre les activités de conception et de production et permettent à l'ensemble des parties prenantes d'une entreprise d'interagir autour d'un prototype concret.

L'analyse du Hype Cycle de Gartner pour les technologies émergentes, dont une illustration est présentée figure 5, est intéressante car elle montre l'éclatement du sujet dans ses différentes utilisations possibles :

- l'*entreprise 3D Printing* qui constitue l'utilisation la plus traditionnelle de la technologie (prototypage rapide, design...) ;
- le *Consumer 3D Printing* dont la période de maturité est plutôt prévue d'ici 10 ans ;
- le *3D Bioprinting* qui constitue un sujet à plus longue échéance.

2.3 Écosystème, acteurs

Le cabinet d'analyse prévoit une progression rapide sur les prochaines années, avec un taux de croissance à deux chiffres et un objectif à 6 milliards de dollars en 2017.

Un phénomène intéressant est la croissance importante et surtout constante du marché lié aux machines « low-cost », c'est-à-dire dont le coût est inférieur à 5 000 \$, une grande partie de ces équipements venant équiper les bricoleurs, les étudiants, ainsi que les *start-up* de designers indépendants... Ainsi des sociétés leaders du secteur, comme MakerBot (<http://www.makerbot.com/>), lancent des produits comme la MakerBot Replicator au prix de 2 500 €. Et il est possible de trouver encore moins cher,

Printbot (<http://www.printbot.com/>) proposant des gammes de produits allant de 350 à 950 € !

À ce tarif-là, l'impression 3D a vocation à se généraliser auprès des particuliers.

Dans la chaîne de valeur, nous trouvons donc :

- des fabricants d'imprimantes : il peut s'agir d'acteurs déjà très présents dans les systèmes 2D ou de sociétés qui sont uniquement positionnées sur le créneau de cette nouvelle technologie. Nous avons cité plus haut quelques marques ;
- des « imprimeurs » : ce sont des acteurs qui mettent à disposition des infrastructures permettant, à la demande, de créer des objets. Ils mettent à disposition des capacités de production avec des services associés. Des acteurs comme Sculpteo (<http://www.sculpteo.com/fr/>) en France et Shapeways (<http://www.shapeways.com/>) aux États-Unis font partie du panel d'imprimeurs ;
- des créateurs d'objets – designers : imprimer un objet n'est qu'une partie du sujet. Le design de l'objet (au sens créatif) ainsi que sa modélisation en 3D font partie des services indispensables au processus de développement. Leurs activités peuvent se diviser en deux catégories :

- les activités de designer, qui pour la plupart restent des activités d'indépendant ou en tout cas non structurées,
- la fourniture de logiciels web ou mobiles permettant de modéliser et de constituer les plans 3D des différents objets à produire.

Des sites comme Thingiverse (<http://www.thingiverse.com>) constituent des lieux d'échanges et de ventes de design et de plans d'objets en tout genre.

Mais à côté des acteurs traditionnels de l'économie que sont les producteurs d'équipements et les prestataires de services, l'écosystème se compose aussi d'une véritable communauté de partage libre, dans la mouvance de l'esprit de l'*OpenSource* du monde logiciel.

À titre d'illustration, les FabLabs (**Fabrication Laboratory**), créés à l'initiative du MIT, sont des lieux de mise à disposition et de partage de systèmes de production numériques, dont font entièrement partie les impressions 3D.

Ainsi, au-delà d'être une simple évolution impliquant les entreprises industrielles dans leurs phases de conception et de prototypage, l'impression 3D ouvre des possibilités nouvelles directement aux individus en leur permettant soit de réaliser des objets pour leur propre compte, soit de développer une activité, commerciale, artistique ou communautaire, basée sur la production d'objets originaux.

3. Bouleversements possibles

Derrière les enjeux purement économiques, l'objet de cet article est de s'interroger sur les impacts possibles de cette « révolution » dans le domaine du développement durable et notamment de l'environnement.

Tentons d'analyser les potentiels apports de l'AM dans ce domaine, avant d'aborder les limites potentielles des promesses de cette nouvelle technologie.

3.1 Autre approche de la consommation

Imprimer chez soi ses propres objets à la demande : voilà la promesse à la fois pour les particuliers qui pourraient créer eux-mêmes les objets nécessaires à leur propre consommation et pour les entreprises qui pourraient réaliser rapidement les objets souhaités par leurs clients. Nous nous plaçons ici dans une perspective à moyen terme, car il est bien entendu que les comportements actuels n'en sont pas encore là. Cela étant, en suivant l'évolution de l'histoire de l'informatique et notamment la révolution associée à la micro-informatique, du PC personnel jusqu'à la tablette tactile et au smartphone, les capacités technologiques mises entre les mains des utilisateurs ont fait l'objet d'un développement qui était inimaginable il y a 30 ans.

La généralisation de technologies permettant aux individus de créer eux-mêmes leurs produits pourraient transformer radicalement le paysage économique :

- le modèle de la grande entreprise, lieu de concentration du capital, ne constituerait plus le seul modèle économique viable pour produire des biens, puisque la capacité de produire des objets n'exigerait plus, pour être viable, la construction de grandes chaînes de production ;
- l'individu, en tant que consommateur, pourrait jouer un autre rôle, plus actif, vis-à-vis de la production industrielle et produire une partie des biens dont il a besoin.

Ainsi, l'une des promesses de cette nouvelle technologie est de permettre l'émergence d'un consommateur plus autonome, car pouvant produire une partie de ses propres biens, et des modèles d'entreprises plus petites, souples, agiles et viables même dans des tailles réduites.

Mais quel est l'impact sur l'environnement ?

Ces deux « promesses » sont en opposition avec la consommation de masse qui constitue l'un des éléments structurants des modèles économiques des pays développés.

Pour une entreprise, produire moins mais mieux (des produits plus solides, plus fiables, plus respectueux de l'environnement) est possible dans un contexte où la capacité d'adaptation est rapide et où les contraintes de rentabilité ne nécessitent pas une production en masse.

Des modèles comme la production à la demande sont possibles et rentables, limitant ainsi le gaspillage (produits invendus, surstocks) lié à la production de masse.

Pour un consommateur, produire une partie de ses propres biens permet de prendre conscience de l'ensemble du cycle de vie d'un produit, de se poser des questions sur les matières qui le composent, et d'évaluer le coût de l'énergie associée à sa production.

L'impression 3D peut donc être un élément du « produire moins mais mieux » et ainsi être un moyen pour contenir la pression environnementale liée à la consommation de matière et d'énergie.

Ainsi l'utilisation de matières recyclées dans l'impression 3D commence à se développer via de nombreux projets. Citons par exemple les projets Filabot et Filastruder qui proposent des machines permettant d'extruder et de fondre le plastique composant un produit existant (bouteille de lait, jouet...). La machine sait ainsi reconstituer, à partir de ce procédé, les filaments de plastique utilisables par des imprimantes 3D.

3.2 Vers un rallongement de la durée de vie des produits

Le sujet est bien connu aujourd'hui et a déjà été observé dans de nombreux secteurs industriels : le raccourcissement de la durée de vie des biens de grande consommation, nommé « obsolescence programmée » lorsqu'il correspond à une démarche volontaire de l'entreprise qui fabrique le bien afin d'accélérer le taux de remplacement de ces produits.

Ce phénomène se matérialise sous plusieurs formes :

- d'une part, une quasi-impossibilité de pouvoir réparer les objets ou les biens qui sont diffusés. Cette impossibilité repose sur l'absence de compétences et/ou des pièces nécessaires à la réparation ;
- d'autre part, une absence de rentabilité économique au maintien en vie des équipements, le coût de fabrication et de disponibilité de pièces détachées constituant un coût trop important pour les entreprises productrices.

Les conséquences environnementales de ce gaspillage sont alors connues :

- un effet sur la consommation d'énergie et de ressources puisque des biens sont substitués dans leur intégralité alors qu'ils pourraient être réparés, ce qui accroît la quantité de biens nécessaires à produire, pour un niveau d'utilisation donné ;
- un impact sur la quantité de déchets qui doivent être alors gérés, ces quantités étant alors exagérées et faisant, à leur tour, peser une pression sur les filières de démantèlement, de recyclage et/ou de valorisation des produits, filières qui sont, elles aussi, génératrices de CO₂.

Les apports de l'impression 3D pourraient être alors de rendre possible la production de petites séries de pièces, grâce à l'agilité et à la souplesse des systèmes de production. La production de pièces de remplacement (mécaniques, électroniques...) pourrait être rentable et donc permettre soit aux entreprises productrices, soit à des tiers (consommateurs autonomes ou entreprises spécialisées) de produire les pièces nécessaires à la réparation d'objets courants.

Même s'ils sont encore balbutiants, et pour l'instant encore l'œuvre d'acteurs plutôt engagés dans le combat pour la défense de l'environnement, des exemples existent : qu'il s'agisse de la réparation d'une bonde d'évier, d'une petite pièce en plastique permettant de faire fonctionner une imprimante, d'un verrou de baie vitrée... le train de la réparation des objets semble bien parti.

Signalons qu'au-delà de l'aspect environnemental, le maintien en condition de vie des objets peut aussi répondre à une contrainte financière, ce qui en fait un levier de développement très important.

3.3 Partage du savoir

L'un des éléments importants de ce développement est l'approche communautaire de la diffusion de cette technologie. Contrairement aux technologies qui ont fait les précédentes révolutions industrielles, la diffusion de cette technologie repose sur une communauté virtuelle, reliée par Internet, associant aussi bien des entreprises *start-up* que des étudiants, des associations... et une logique *OpenSource* privilégiant ainsi une transmission, au moins en partie gratuite, du savoir.

Cette diffusion se manifeste sous plusieurs aspects :

- la diffusion en mode *OpenSource* de modèles de construction de machines d'impression permettant à tout un chacun de construire ses propres machines. À titre d'illustration, signalons le modèle de certaines imprimantes 3D, notamment la RepRap, diffusées aujourd'hui en mode *OpenSource*, et qui sont conçues pour pouvoir fabriquer d'autres machines identiques. Le coût d'acquisition d'une telle machine devient donc extrêmement bas et sa commercialisation est d'ailleurs difficile puisque la technologie est accessible gratuitement ;
- la diffusion, soit en mode collaboratif ou payant, de modèles ou de plans d'objets à imprimer aboutissant à un véritable marché du design d'objet.

Le partage et la diffusion du savoir ne constituent pas, en soi, une réduction de l'impact environnemental des activités mais est une condition du développement de l'impression 3D.

3.4 Transformation des modèles de vente

Avec la promesse de capacités de production décentralisées ainsi que l'autonomie des individus-consommateurs, vient celle d'une refonte de certains modes de consommation, et notamment celui de la grande surface et de la vente en magasin.

Les modèles de vente au consommateur ont des impacts environnementaux différents.

Rappelons à ce stade que, dans le bilan carbone des magasins ou des lieux de vente, près de 50 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) sont générées par ce que l'on appelle les visiteurs, c'est-à-dire les déplacements des individus consommateurs sur le lieu de vente, qui le plus souvent sont effectués en véhicule personnel.

Ainsi, des modèles où l'individu-consommateur produit ses propres biens peuvent engendrer une baisse des émissions de GES pour l'acquisition de ce bien par le simple fait d'éviter, plus concrètement, de réduire la fréquence de déplacements en magasin.

3.5 Relocalisation de l'économie

L'économie actuelle est construite sur un modèle globalisé où les processus de production des biens sont éclatés tout autour de la planète. Cette « mondialisation » repose pour une part sur une recherche constante des plus bas coûts de production, ce qui amène des industries à délocaliser leur production dans les pays correspondants.

Cette délocalisation pose plusieurs questions environnementales fortes :

- en se limitant par exemple aux émissions de GES, les énergies qui sont utilisées dans les systèmes de production des pays à bas coûts ont, en général, une intensité carbone plus élevée que dans les pays développés. Au-delà du particularisme français basé sur le nucléaire, les pays à bas coût ont tendance à privilégier les énergies fossiles (charbons, pétroles...) dans leurs systèmes de production d'électricité. Ainsi, l'intensité carbone des biens produits dans ces pays est généralement plus forte que celle des pays développés ;

– par ailleurs, les réglementations relatives à l'environnement, et notamment les contraintes relatives à la gestion des déchets, sont moins évoluées dans ces pays que dans les nôtres ;

– enfin, la mondialisation de l'économie s'est construite autour d'une réalité d'un transport de marchandises performant et peu cher. Les émissions de CO₂ de la *supply chain* des produits (transports et logistiques) constituent ainsi un élément important de son impact global.

Là encore, la diffusion de capacités de production de produits à un niveau individuel ou communautaire peut permettre de réduire une pression existante sur l'environnement :

– la production de biens s'effectue principalement dans le contexte local de l'utilisateur, celui-ci sera plus enclin à suivre et à développer les réglementations environnementales que dans un contexte où l'industriel pollue en grande partie « en dehors de chez lui » ;

– la relocalisation de la *supply chain* permet de réduire les grands flux d'échange de produits finis ou semi-finis. Ce phénomène est clairement un facteur de réduction de l'impact environnemental : même si des échanges de matières premières (les intrants des systèmes d'impression) devront tout de même s'effectuer entre les pays, ceux-ci n'auront pas la même intensité CO₂ que le transport, à plusieurs étapes de la production de produits semi-finis ;

– enfin, les transports liés à la distribution dans un même pays peuvent être simplifiés, et donc économisés, puisque des produits peuvent être imprimés au plus près du lieu de vente/mise à disposition.

4. Apports techniques

Une approche rationnelle permettant de se faire une opinion de l'impact environnemental réel de l'impression 3D peut impliquer de se reposer sur l'analyse de cycle de vie d'un produit manufacturé (ACV) pour mener une étude d'impact de ce mode de production (figure 6). Pour plus de détails sur l'ACV, le lecteur pourra se reporter à l'article [G 5 500] dans la collection TI.

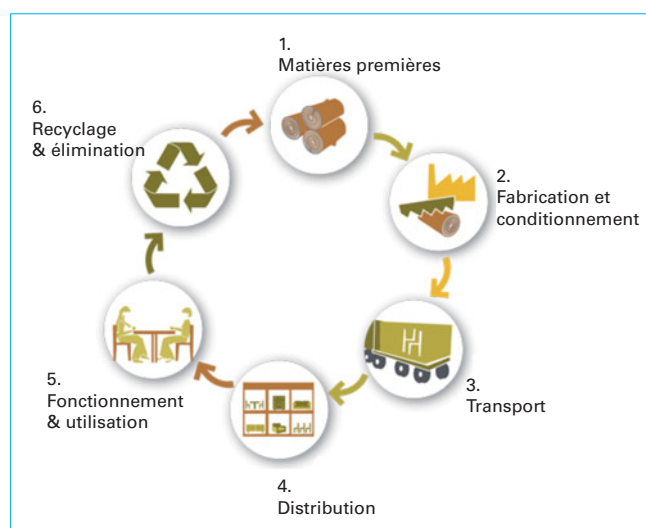


Figure 6 – Étapes de l'analyse de cycle de vie des produits (source Avnir – Plate-forme pour l'analyse de cycle de vie)

L'ACV d'un produit est une méthode permettant d'évaluer les impacts environnementaux associés ou liés à l'ensemble de la vie du produit. Les impacts environnementaux sont ainsi associés aux processus de production, de distribution, d'utilisation et de fin de vie (impact du produit en tant que déchet).

La méthode repose sur un inventaire précis des flux de matières et d'énergie consommés et rejetés dans le cadre du cycle de vie du produit et sur une valorisation de ces différents flux en les traduisant en impact sur l'environnement. Les principaux impacts suivis et valorisés dans le cadre des ACV sont généralement les suivants :

- épuisement des ressources naturelles ;
- effet de serre exprimé en rejet de CO₂ ;
- dégradation de la couche d'ozone ;
- toxicité et écotoxicité de certains rejets (eutrophisation, acidification) ;
- altération physique des écosystèmes.

Les éléments variant dans l'ACV d'un produit sont alors les suivants :

- le **type de matière(s) incorporée(s) dans le produit** : les matières ont un impact environnemental lié à l'énergie nécessaire pour extraire les matières premières, les transformer et les mettre à disposition du producteur. À titre d'exemple, le plastique a un impact environnemental lié à l'importance des émissions d'hydrocarbures lors de son processus de production ;
- la **quantité de matière(s) incorporée(s) dans le produit** : cette quantité est principalement liée aux procédés de fabrication (chutes...) ;
- la **quantité d'énergie utilisée pour les activités de fabrication et de transformation du produit ainsi que la nature de cette énergie (renouvelable, carbonée...)** ;
- les **activités de design et de conception**, mobilisant des ressources humaines et des activités de services ;
- les **opérations de transport-logistique** en distinguant les opérations d'approvisionnement de matières qui sont généralement intégrées dans l'impact environnemental des matières et les opérations de distribution des produits finis sur les lieux de distribution et de vente ;
- les **opérations liées à la distribution/vente du produit**, intégrant donc l'impact environnemental du produit dans son environnement de vente : le magasin. Cet impact intègre (comme le rappelle la méthode bilan carbone d'un point de vente) aussi bien les activités propres du magasin que celles liées aux clients et notamment les déplacements, qui participent pour une très grande part aux émissions de GES ;
- l'impact du produit **en tant que déchet** dépend de deux facteurs : sa capacité à être collecté et à rentrer dans une filière de recyclage/valorisation et sa capacité de valorisation en tant que telle ;
- l'**emballage** constitue un produit à part entière et dispose lui aussi d'un impact environnemental propre.

Parmi ces impacts, certains ne sont pas impactés par les méthodes de fabrication AM. Il s'agit notamment de l'emballage des produits, l'impact de l'utilisation du produit, de la mise en déchet et/ou des opérations de distribution.

Mais alors quels sont les apports de cette nouvelle technique ?

■ Optimiser la quantité de matière utilisée

Les impacts potentiels des méthodes de fabrication sont à rechercher dans la spécificité du principe de l'AM. En effet, dans les techniques d'usinage classique, la pièce est « fabriquée » à partir d'une matière existante dont le volume ou la surface doit forcément être supérieur à celui qui est à fabriquer. Cette méthode implique donc inévitablement des chutes de matières dans le processus de fabrication. Même si ces chutes peuvent éventuellement être valorisées dans d'autres processus de production, cette valorisation nécessite un minimum d'énergie.

Dans le cas de l'AM, la quantité de matière nécessaire pour fabriquer une pièce correspond exactement à ce qui est nécessaire puisque chaque unité de matière consommée est utile pour la création de la pièce. Le niveau de chute peut donc être réduit à 0 sur la production courante. Cette économie de matière constitue indéniablement un apport concret de cette technologie même si le niveau d'apport dépend de la complexité des pièces à produire. Il ne peut donc exister de ratio standard en la matière.

Mais l'optimisation de la quantité de matière pour fabriquer un produit peut aller encore plus loin : en effet, les techniques d'usinage classique nécessitent le plus souvent de fabriquer des pièces « pleines » puisqu'elles sont sculptées, dans un ensemble de matière. L'impression 3D permet de construire des pièces dont le niveau de solidité peut atteindre celui des pièces classiques sans pour autant constituer des pièces pleines. La conception assistée par ordinateur permet dans ce cas de définir cet optimum. En combinant les techniques de l'optimisation de la topologie et l'impression 3D, il est alors possible de constituer une pièce structurée sous forme de grille, aussi solide que l'original mais composée de moins de matières.

Des exemples concrets ont été réalisés, notamment dans le secteur aérien où la minimisation du poids est essentielle (figure 7).

L'autre intérêt de cette nouvelle approche de fabrication réside dans le gain de poids concernant les pièces qui sont réalisées. Pour reprendre l'exemple des pièces aéronautiques mentionnées plus haut, le gain de poids s'établit à 50 % du poids d'origine. L'exemple est spécifique, il doit donc être pris avec précaution, le gain potentiel de poids sera différent en fonction de chaque type de pièces fabriquées.

En complément de l'économie de matière, le gain de poids peut apporter aussi d'autres bénéfices environnementaux :

- le gain de poids peut occasionner des économies d'énergie ou apporter une durabilité accrue du produit fini. Dans le domaine de l'aéronautique, le lien entre économie de poids et consommation de carburant, et donc émissions de CO₂, est assez évident ;
- ce gain peut par ailleurs avoir des conséquences, moindres il est vrai, sur les émissions de la *supply chain* d'approvisionnement car le poids gagné peut permettre d'économiser de l'énergie (le plus souvent du carburant) dans les activités de transports associées à cette *supply chain*.

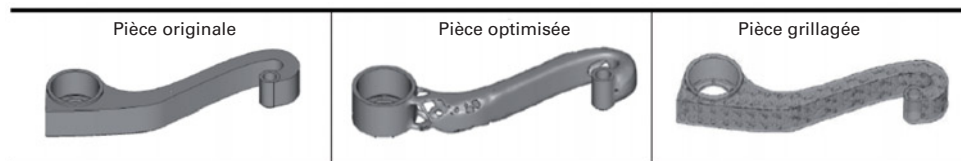


Figure 7 – Exemple de pièce aéronautique réalisée pour Virgin Atlantic par Atkins et analysée par le cabinet d'étude Econolyst
(http://www.enlighten-toolkit.com/App_Themes/Enlighten/Documents/MonitorArm-processing.pdf)

Tableau 1 – Comparaison des émissions CO₂ sur le cycle de vie de la pièce Monitor Arm – Econolyst pour Atkins
(http://www.enlighten-toolkit.com/App_Themes/Enlighten/Documents/MonitorArm-processing.pdf)

	Pièce originale	Pièce optimisée	Pièce grillagée
CO ₂ total (kg CO ₂)	47,222	18,528	21,312
Énergie totale consommée.....(MJ)	690,852	271,380	312,715
Distance totale <i>Supply Chain</i>(km)	23,967	24,010	24,010
Processus de fabrication principal	Usinage commande numérique	Fusion sélective par laser (3D)	Fusion sélective par laser (3D)
Matières premières	Aluminium, S380.0 : LM24-M correspond à l'alliage utilisé (Al/8Si/3Cu/Fe)	Aluminium, S380.0 : LM24-M correspond à l'alliage utilisé (Al/8Si/3Cu/Fe)	Aluminium, S380.0 : LM24-M correspond à l'alliage utilisé (Al/8Si/3Cu/Fe)

Dans le cadre du projet Monitor Arm de la société Atkins pour Virgin Atlantic par Econolyst, les résultats comparés pour les différents cas de réalisation de pièces sont présentés dans le tableau 1.

Les résultats qui sont présentés ici devront être confirmés par d'autres analyses ACV sur des fabrications de produits ou de pièces afin de valider les tendances, sachant que les ACV ne sont pas comparables entre elles.

5. Limites et freins

5.1 Gadget ou réelle utilité

Nous avons évoqué au chapitre précédent les différents apports potentiels et leviers de transformation possibles vers une consommation plus durable. Moins centralisé, moins standardisé, moins « jetable », un nouveau mode de production doit permettre de diminuer la pression environnementale.

Mais cet argument repose sur le principe que les produits qui pourraient être fabriqués par les systèmes d'impression 3D seraient forcément utiles ou nécessaires aux individus.

La réalité, et il suffit pour s'en convaincre d'aller sur les sites Internet de partages d'objets à imprimer, est aujourd'hui en décalage avec cette vision : figurines, miniatures, objets de décoration, bijoux... constituent le gros des éléments imprimables et achatables *via* ce nouveau système.

Même s'il s'agit d'une limitation actuelle de la technologie – il est en effet plus facile d'imprimer une figurine que de fabriquer une pièce de moteur nécessitant des contraintes de solidité ou d'utilisation en condition extrême. Il peut être facilement anticipé que les technologies d'impression 3D, parce qu'elles vont permettre de fabriquer à peu près n'importe quoi assez facilement, peuvent créer une tendance à formaliser les moindres désirs ou envies des individus et donc d'augmenter globalement la quantité de produits.

Nous pourrions qualifier cette tendance d'**effet rebond** pour cette technologie puisque, dans ce cas, la facilité de création d'objets en tous genres et le faible coût de production peuvent facilement engendrer une surproduction inconsidérée.

Cette surproduction viendrait, dans ce cas, en augmentation de la pression environnementale, puisque consommatrice d'énergie et de matières. Le **comportement des individus** a donc une importance cruciale dans la valeur environnementale de cette technologie.

5.2 Problématique des matières : le plastique

Dans le prolongement du point précédent relatif aux objets qui sont fabriqués aujourd'hui, surtout dans les processus de fabrication de prototypes, les matières utilisées sont le plus souvent des plastiques qui constituent, rappelons-le, un dérivé du pétrole. Même si des bioplastiques commencent à être utilisés (issus notamment du maïs), ils ne constituent pas encore une réalité, notamment dans l'utilisation de la technologie qui est faite par les utilisateurs de machines à bas coût.

En ce sens, l'impression 3D ne règle en rien les impacts environnementaux liés à l'utilisation massive de matières dépendant des hydrocarbures et dérivés du pétrole comme le plastique.

La « qualité environnementale » de l'impression 3D repose alors sur l'utilisation de matériaux de substitution dans les processus de fabrication mais n'est pas alors liée à la technologie mais plutôt à la sensibilité environnementale des producteurs ou au respect d'une réglementation particulière.

5.3 Gestion des droits de propriétés

Le développement de ces technologies et sa promesse de permettre à un maximum d'entre nous des capacités de production autonomes et à moindre coût repose sur l'approche communautaire et *OpenSource* des technologies et des méthodes.

Nous avons signalé précédemment la diffusion de la connaissance *via* la mise à disposition de kits/schémas de construction de systèmes d'impression permettant à un nombre croissant d'individus de construire leurs propres équipements, certaines imprimantes 3D étant même capables de produire elles-mêmes les pièces nécessaires pour se répliquer.

Mais ce partage de la connaissance au niveau des systèmes de fabrication existe-t-il sur les objets qui sont imprimés ? En d'autres termes, le système d'impression 3D, qui permet de reproduire des objets, est-il compatible avec nos notions juridiques de brevets, droits de propriété industrielle ?

Là, le sujet semble plus complexe : reproduire partiellement (cas de la réparation d'un objet cassé) ou totalement un objet existant, celui-ci bénéficiant d'un droit de propriété industrielle, s'apparente à une violation de ce droit et donc à du piratage.

L'analogie avec le piratage informatique des supports culturels est ici assez évidente.

Des actions en justice ont d'ailleurs déjà été intentées contre la mise en vente de produits issus de l'impression 3D par copie ou reproduction de produits existants sous le motif qu'elles violent le droit de propriété.

Par ailleurs, la capacité de créer des pièces permettant la réparation d'objets afin d'en prolonger la durée de vie, présentée plus haut comme un élément favorable à l'environnement, dépendra en partie du bon vouloir des industriels afin de donner la capacité aux individus :

- de pouvoir démonter les équipements concernés, certains fabricants (exemple : Apple) n'hésitant pas à rendre propriétaire les formats et les modes de montage pour empêcher tout un chacun de réparer les équipements ;
- la fourniture des plans et schémas nécessaires aux opérations de réparation lourde d'équipements.

6. Conclusion et perspectives

L'impression 3D est une technologie qui, à ce stade de développement et d'utilisation, représente un potentiel supplémentaire dans les démarches de développement durable. Elle ne constitue pas à coup sûr une réponse au sujet car cela dépend de sa mise en œuvre et de son développement, notamment par la nature des matières utilisées (utilisation de bioplastiques PLA issus du maïs), la relocalisation des activités, le développement du qualitatif en lieu et place du quantitatif...

Il est classique que les technologies ne constituent pas, à elles seules, une réponse à un problème sociétal ou politique. Elles peuvent en constituer un instrument d'amélioration à partir du moment où elles sont utilisées dans un contexte et avec une volonté d'adresser ces sujets.

Dans le domaine de l'impression 3D, certains points semblent structurants pour l'intérêt de cette technologie : les enjeux autour du droit de la propriété industrielle et notamment le droit de copie d'un objet ou d'une pièce sont cruciaux dans la notion de prolongement de la durée de vie des biens.

L'impression 3D peut donc être un outil, au service d'une population responsabilisée et impliquée dans la préservation environnementale, pour un autre mode de croissance.

7. Glossaire – Définitions

Hype Cycle ; Hype Cycle :

Il s'agit d'un outil d'analyse développé par le cabinet d'études Gartner qui met en avant le cycle de vie d'adoption d'innovations technologiques qui sont classiquement rencontrées. Cet outil est généralement utilisé comme un élément de prise de décision d'investissement car il permet d'identifier la maturité d'une technologie qui passe d'abord par un stade d'espérance-désillusions, avant de se généraliser dans la société.

Les différentes phases sont les suivantes :

- *technology trigger* (déclencheur de technologie) ;
- *peak of inflated expectations* (pic d'attentes surévaluées) ;
- *trough disillusionment* (creux des désillusions) ;
- *slope of enlightenment* (pente de diffusion) ;
- *plateau of productivity* (plateau de productivité).

Chaque thème est représenté par un pictogramme représentant la durée approximative pour que celui-ci devienne un sujet mature (atteigne le plateau) :

- moins de 2 ans ;
- de 2 à 5 ans ;
- de 5 à 10 ans ;
- plus de 10 ans ;
- n'arrivera jamais à maturité.

Gaz à effet de serre ; Greenhouse gas :

Les gaz à effet de serre sont les composants gazeux qui, par leur absorption du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, contribuent à l'effet de serre. L'augmentation de leur concentration dans l'atmosphère terrestre est l'un des facteurs d'impact à l'origine du récent réchauffement climatique. Les principaux GES, objets de la lutte contre le changement climatique, sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O).

Les GES sont valorisés sous la forme de CO₂e (équivalent CO₂) en prenant en compte le pouvoir de réchauffement de chaque gaz relativement à celui du CO₂.

De cette valorisation en « équivalent CO₂ » est dérivé le terme d'émissions carbone pour parler des émissions GES. Même si l'appellation est quelque peu impropre, elle est cependant assez généralisée.

L'impression 3D dans une perspective de développement durable

par **Laurent MOLINARI**

Cofondateur & COO – Zen'to Technologie, France

Sources bibliographiques

Commissariat général au développement durable et CDC climat recherche. – *Chiffres clés du climat, France et Monde* (2011)
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Repclimat.pdf>

Étude du cabinet Wohlers Associates sur l'état du marché du domaine de la fabrication additive

et de l'impression 3D. Accessible via
<http://www.wohlersassociates.com/2013report.htm>

NEAL DE BEER (PhD). – *Additive manufacturing – Turning mind into matter*. College Center for Applied Competitive Technologies. Sierra, mai 2013

<http://www.sierracollegelearning.com/uploads/201307/sierra-college-cact-additive-manufacturing-report-and-recommendations-may2013.pdf>

BERCHON (M.) et LUVT (B.). – *L'impression 3D*. Édition Eyrolles, Collection Serial Makers (2013).

À lire également dans nos bases

ROUSSEAU (P.). – *Analyse du cycle de vie*. [G 5 500] Environnement (2005).

QUERINI (F.) et ROUSSEAU (P.). – *Analyse du cycle de vie – Évaluation des impacts*. [G 5 610] Environnement (2012).

BENETTO (E.). – *Analyse du cycle de vie – Réalisation de l'inventaire*. [G 5 510] Environnement (2005).

VENTERE (J.-P.). – *Écoconception des produits*. [G 6 000] Environnement (2012).

BELLINI (B.) et JANIN (M.). – *Écoconception : état de l'art des outils disponibles*. [G 6 010] Génie industriel (2011).

SWIDERSKI (B.) et REBERT (N.). – *Développement durable : introduction*. [G 8 000] Génie industriel (2012).

FIORINA (C.). – *Mettre en œuvre une démarche écoresponsable : objectifs, méthodes et exemples*. [G 8 510] Environnement (2011).

GENDRON (C.). – *Développement durable et responsabilité sociale de l'entreprise*. [G 8 405] Environnement (2014).

Sites Internet

ODD Guitars. Site de distribution de guitares électriques réalisées à l'aide de l'impression 3D
<http://www.odd.org.nz/atom.html>

Additive Manufacturing
<http://www.additivemanufacturing.com/basics/>

Méthodes de fabrication additive
http://fr.wikipedia.org/wiki/Fabrication_additive

Exemples de réalisations de pièces de rechange
<http://www.laforgedespossibles.org/2013/07/impression-3d-reparer-les-pieces-du-quotidien/>
<http://www.impression-3d.com/impression-d-au-service-de-la-reparation-dimprimante/>
<http://www.01net.com/edito-rial/586873/j-ai-repare-ma-baie-vitree-grace-a-une-imprimante-3d/>

Projet RepRap
<http://www.reprap.org/wiki/RepRap/fr>

Création de chaussures par impression 3D
<http://www.monologue-paris.com/>

Hype Cycle de Gartner
<http://www.gartner.com/technology/research/methodologies/hype-cycle.jsp>

Prestataire d'impression en ligne
<http://www.sculpteo.com/fr>

Additive Manufacturing, sustainable production for the 21st Century, oct. 2012
<http://www.econolyst.co.uk>
<http://www.econolyst.co.uk/index.php/home/resources/documents>

Informations générales sur l'impression 3D
<http://www.serialmakers.com/category/livre/impression3d/>

Impressions de tissus biologiques
<http://www.organovo.com/company/about-organovo>

A sustainability Scorecard for 3D printing » – Mara Grunbaum, avr. 2012
<http://www.yannickrumpala.wordpress.com/2012/09/27/points-de-friction-autour-des-imprimantes-3d/>

Pour plus d'informations sur les projets d'extrusion et de reconstitution de filaments plastiques à partir de produits recyclés
<http://www.3d-makers.fr/filabot-recycler-plastique-imprimante-3d/>
<http://www.filastruder.com/products/filastruder-kit>

Concernant les droits de propriété : voir pour cela l'exemple de figurines concernant un jeu vidéo
<http://www.gameblog.fr/news/37526-square-enix-fait-interdire-les-figurines-ffvii-a-l-imprimant>

Projet Monitor Arm
http://www.enlighten-toolkit.com/App_Themes/Enlighten/Documents/MonitorArm-processing.pdf

Événements

Salon 3D Print Show – Salon international d'état de l'art des technologies d'impression 3D, oct. 2014
<http://fr.3dprintshow.com.systranlinks.net/paris2013/show-timetable/>

Données statistiques et économiques

Le graphique Hype Cycle (Gartner) présenté dans cet article est accessible
via
<http://www.gartner.com/newsroom/id/2575515>
