

La révolution industrielle de l'impression 3D aura-t-elle lieu ?

Thierry Rayna
i3-CRG, École polytechnique, CNRS, Université Paris-Saclay

LE 25 SEPTEMBRE
2017, DANS UN
SÉMINAIRE DU
CENTRE DE
RECHERCHE
EN GESTION
DE L'ÉCOLE
POLYTECHNIQUE,
THIERRY RAYNA
A PRÉSENTÉ SES
TRAVAUX SUR
L'IMPRESSION 3D

Mes recherches partent toujours de technologies numériques, hier celles ayant permis la numérisation et la diffusion en ligne de musique, de films, etc., aujourd'hui l'impression 3D, l'Internet of Things (IoT) et la blockchain. Cela fait maintenant sept ans que je travaille sur l'impression 3D. Sous cette dénomination générique se regroupent des technologies permettant de numériser un objet physique et de le reproduire (en le modifiant éventuellement). Ces techniques sont par exemple utilisées en aéronautique, dans le domaine médical (prothèses), l'agroalimentaire, la bijouterie, les jouets. L'impression 3D de bâtiments est en cours de développement, de même que l'impression de médicaments (on peut produire en une gélule un cocktail personnalisé de médicaments) et le « bioprinting » qui permettra d'imprimer des tissus vivants et, potentiellement, dans un futur plus lointain, des organes entiers.

La raison principale du succès de l'impression 3D est que cette méthode de production ne requiert aucun outillage (par exemple, moule ou guide) ce qui conduit à un coût unitaire de production constant. Ceci signifie notamment que, contrairement à d'autres méthodes de production, il n'y a pas de volume minimum économique de production (alors qu'il est typiquement de plusieurs milliers d'unités pour du moulage-injection) et que cette technologie permet de construire de toutes petites séries. Les autres avantages de l'impression 3D sont que l'absence d'outillage (qui prend du temps) permet d'obtenir les objets produits bien plus rapidement¹ et de réaliser des objets avec une forme complexe qu'il ne serait tout simplement pas possible de produire avec d'autres technologies (ce qui permet notamment d'obtenir des objets avec un bien meilleur ratio solidité/poids).

À la vue des caractéristiques assez uniques de cette technologie, il est facile de comprendre le fort enthousiasme qui s'est développé vis-à-vis de l'impression 3D ces dernières années. Et pourtant, bien que les technologies d'impression 3D soient loin d'être récentes (l'impression 3D existe sous diverses formes depuis le milieu des années 1980), on ne peut que constater que l'utilisation de l'impression 3D reste, de nos jours, limitée à quelques niches (dont le nombre grandit, soit, mais qui restent néanmoins des niches) et qu'on est très loin de la fameuse « révolution industrielle » annoncée de manière répétée ces dernières années.

Or, comprendre les raisons de la si lente adoption d'une technologie pourtant prometteuse requiert de mettre de côté les aspects technologiques de l'impression 3D et de s'intéresser à ses usages. C'est notamment ce que nous avons fait dans Rayna et

1. Même si le procédé d'impression 3D lui-même peut être plus lent que la production par moulage-injection, une fois l'outillage réalisé.

Striukova (2016) où nous avons identifié quatre phases distinctes d'adoption correspondant à quatre formes d'usage de l'impression 3D (Fig. 1).

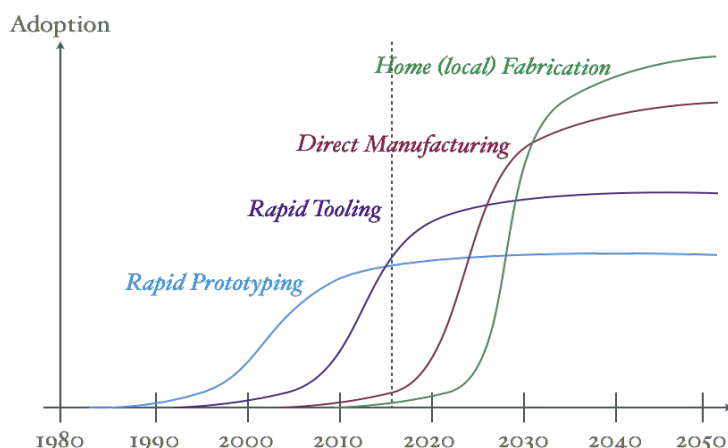


Figure 1 : Les différents usages de l'impression 3D et leurs stades d'adoption

Lorsque l'impression 3D apparaît, la technologie est chère et limitée en termes de matériaux, puisque seuls des matériaux plastiques peuvent être utilisés. Dans ce contexte, l'usage qui s'impose est celui du prototypage. On va alors utiliser l'impression 3D essentiellement pour réaliser des prototypes de pièces ou d'objets, qui seront par la suite fabriqués de manière traditionnelle. L'avantage du prototypage par l'impression 3D est que malgré son coût unitaire à l'époque très élevé, il est néanmoins significativement moins important qu'avec d'autres méthodes de prototypage. Surtout, cette méthode est largement plus rapide, ce qui vaudra à ces technologies d'être dénommées « prototypage rapide » pendant leurs 20 premières années d'existence².

Au début des années 2000, la technologie a suffisamment progressé pour qu'un autre usage émerge : l'outillage rapide. En effet, l'apparition de nouveaux matériaux d'impression, en particulier les alliages métalliques, permet d'envisager l'utilisation de l'impression 3D dans des contextes où solidité et résistance à la chaleur sont essentielles. On va alors commencer à « imprimer » des moules utilisés dans des procédés de moulage-injection, des guides de coupe, etc., sachant que l'impression 3D permet d'obtenir de tels outils à moindre coût, et surtout, beaucoup plus rapidement³.

Alors que, jusque-là, l'impression 3D n'était impliquée que de manière indirecte (prototype, outils) dans la production, les progrès réalisés pendant les années 2000 font que l'on commence à l'utiliser pour la production directe d'objets ou de pièces. On rentre alors dans une troisième phase d'usage et d'adoption : la fabrication directe.

Enfin, le progrès technologique (notamment en termes de miniaturisation et de fiabilité) et la baisse de coût en résultant laissent poindre une quatrième forme d'usage et d'adoption, qui reste extrêmement marginale à ce jour : la fabrication à domicile. Tout comme les imprimantes papier sont sorties des imprimeries pour conquérir les bureaux, avant de se répandre au sein des foyers, il n'est pas inenvisageable, au vu des tendances technologiques actuelles, qu'un phénomène similaire se produise pour l'impression 3D et que, dans un futur relativement distant, les foyers soient équipés d'imprimantes 3D, qui auront, par conséquent, à la fois un rôle de production et de distribution. À défaut (ou en attendant), on peut tout à fait envisager que des unités de fabrication locale (l'équivalent de la boutique offrant des photocopies, ou

2. Les dénominations « impression 3D » et « fabrication additive » ne se sont popularisées que relativement récemment, impression 3D (ou « 3D printing » en anglais) provenant d'une technologie particulière développée au début des années 1990 au M.I.T. tombée dans le langage courant.

3. Par exemple, le temps de fabrication d'un moule est typiquement réduit à quelques heures au lieu de plusieurs jours et le coût de fabrication est généralement deux fois plus faible (Rayna & Striukova, 2016).

du « café internet » à l'époque) émergent progressivement et permettent de récupérer à proximité de chez soi des objets commandés en ligne et fabriqués localement (sans nécessité de transporter les objets en question).

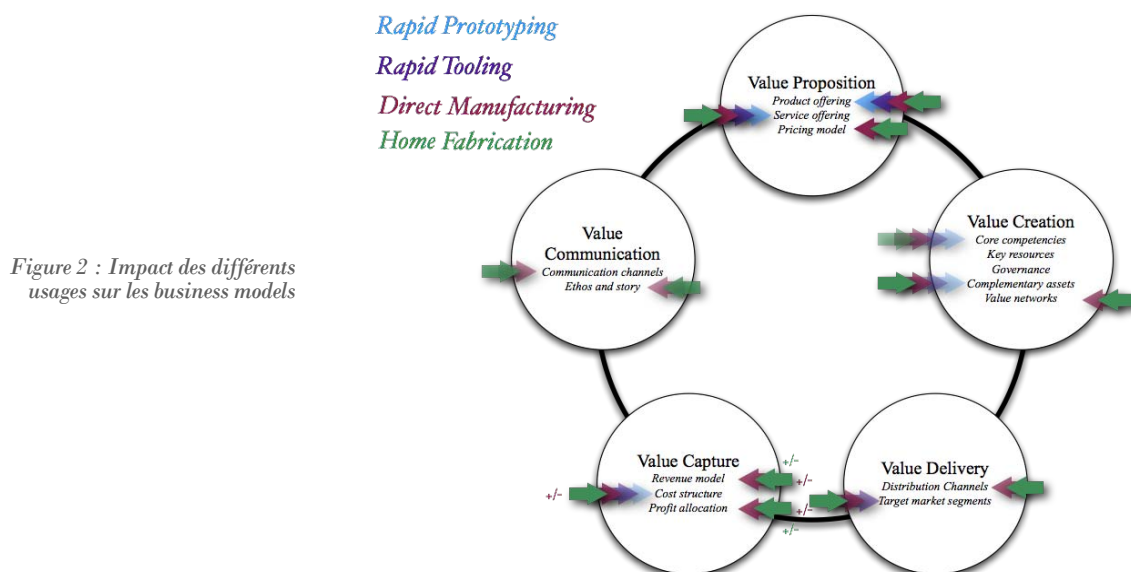
Où en est-on à l'heure actuelle de ces quatre vagues d'adoption ? Laissons de côté la fabrication à domicile qui, si elle a déjà séduit quelques « hobbyistes » et passionnés, reste actuellement plutôt dans le domaine de la science-fiction. Le prototypage rapide est très certainement, et de loin, l'usage le plus répandu. S'il est resté pendant longtemps l'apanage des grands groupes, les fortes baisses de prix des imprimantes 3D d'entrée de gamme observées ces 10 dernières années l'ont rendu accessible même aux plus petites entreprises et *startups*. D'ailleurs, grâce aux espaces de type « fab lab » ou « makerspace », qui mettent à disposition des outils de fabrication numériques, ou aux plateformes en ligne d'impression 3D (Rayna *et al.*, 2015), il n'est même pas nécessaire de posséder une imprimante pour réaliser des prototypes.

L'outillage rapide, de son côté, est en plein développement. Si cet usage est moins populaire que le prototypage rapide, les propriétés des outillages réalisés en impression 3D intéressent un nombre croissant d'entreprises, même si en termes d'adoption on reste encore loin des méthodes d'outillage traditionnelles.

Si la fabrication directe est, de nos jours, la partie la plus « visible » (au sens médiatique du terme), force est de constater que cet usage reste à l'heure actuelle confiné à certaines niches : prothèses médicales, satellites et lanceurs, sport automobile, haute couture, art. Si le nombre de ces niches croît régulièrement, on est cependant très loin d'un usage de masse de l'impression 3D en production.

Les business models

L'un des principaux effets de l'introduction des technologies numériques est qu'elles causent de fortes ruptures, notamment au niveau des « *business models* », qui doivent généralement être entièrement repensés. De ce point de vue, il est clair que les caractéristiques de l'impression 3D laissent présager des reconfigurations profondes des *business models* et des chaînes de valeur. Pourtant, à l'heure actuelle, rien de tel ne semble se produire, et même les secteurs où l'impression 3D est abondamment utilisée semblent, paradoxalement, avoir gardé le même *modus operandi*. S'intéresser aux usages plus qu'à la technologie elle-même présente précisément l'intérêt d'éclaircir cet apparent paradoxe (Fig. 2).



En effet, le prototypage rapide n'a finalement que peu d'impact sur les *business models*. Si le coût de prototypage peut s'en trouver fortement réduit, ce coût (fixe) ne représente finalement qu'une toute petite partie du coût moyen de production. Bien évidemment, cet usage permet également de développer les connaissances des départements R&D et d'améliorer les produits, mais ceci reste finalement très marginal en comparaison des multiples aspects d'un *business model*. L'outillage rapide a un effet finalement assez comparable au prototypage rapide, si ce n'est que le coût d'outillage plus faible rend économique la production de plus petites séries et permet, par conséquent, de viser des segments de marché de plus petite taille.

Ces deux usages étant, de loin, les usages les plus répandus, il n'est par conséquent plus surprenant, une fois les usages pris en compte, que l'impression 3D n'ait pour l'instant que peu d'impact observable sur les *business models*.

La fabrication directe a, en revanche, un fort impact potentiel sur les *business models*. En effet, le coût de fabrication constant de la fabrication par impression 3D fait qu'il n'y a plus aucune raison de fabriquer des milliers de fois le même objet. Mais le raisonnement doit en fait être poussé plus en avant : si le coût moyen de la fabrication avec une imprimante 3D reste constant, il devient surtout très rapidement plus élevé (typiquement quelques centaines, voire plusieurs milliers d'unités) que le coût de fabrication au moyen d'autres méthodes de production (notamment par moulage-injection). Ceci signifie qu'il n'y a non seulement aucune raison de produire des milliers de fois le même objet, mais qu'il y a toutes les raisons de ne surtout pas produire des milliers de fois le même objet avec l'impression 3D, car elle devient alors économiquement moins intéressante. Du point de vue de la « délivrance » de valeur, la fabrication directe permet de créer des segments de marché de taille 1 (Rayna & Striukova, 2016) et ouvre donc de réelles possibilités de « personnalisation de masse ».

De même, l'utilisation d'imprimantes 3D en production permet de créer de nouveaux canaux de distribution. Il faut d'ailleurs noter à ce sujet que le coût moyen constant associé à la fabrication directe fait que, contrairement aux méthodes de production traditionnelles (par exemple, moulage-injection) pour lesquelles il existe de fortes économies d'échelles liées aux coûts d'outillage, il n'y a que peu de raisons, dans le cas de la fabrication directe au moyen d'imprimantes 3D, de concentrer la production géographiquement et temporellement. Au contraire, le fait qu'il ne soit pas nécessaire de créer d'outillage spécialisé (chaîne de montage, etc.) fait que l'on a souvent tout intérêt à produire *localement* (sur des imprimantes 3D situées près des clients) et *à la demande*.

Du point de vue de la création de valeur, un des impacts clés de la fabrication directe se situe au niveau des réseaux de valeur. En effet, si l'impression 3D donne toutes les raisons de personnaliser tous les objets, encore faut-il savoir comment. De ce point de vue, il est évident que le phénomène grandissant de co-crédation, où les clients sont impliqués dans les processus de production (Rayna & Striukova, 2015), a toutes les chances de se développer très fortement avec la fabrication directe, puisque celle-ci, au moyen d'interfaces web idoines, donne la possibilité à chacun de personnaliser des objets de manière relativement simple⁴.

Si comme toutes les technologies émergentes, la fabrication directe a sans aucun doute un impact important sur la proposition de valeur (c'est-à-dire l'offre de produits, de services, ainsi que les modèles de prix), un des aspects les plus critiques concerne

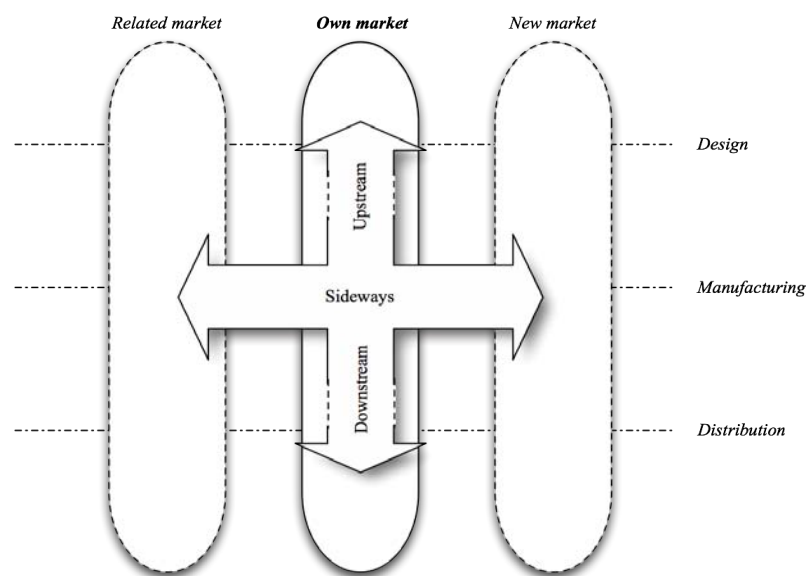
4. Voir par exemple l'interface développée par Digital Forming (<http://www.digitalforming.com>)

sans doute la capture de valeur. En effet, si un produit peut être fabriqué avec une imprimante 3D, cela veut dire que n'importe qui possédant une imprimante 3D (de même type) peut également fabriquer cet objet. De ce point de vue, on peut donc s'attendre à une forte montée de la contrefaçon et à une difficulté associée, pour les entreprises, *a fortiori* lorsque leurs produits créent une forte valeur, à recouvrer leurs investissements R&D.

En ce qui concerne l'impact de la fabrication à domicile sur les *business models*, les effets sont les mêmes que ceux observés pour la fabrication directe, mais largement amplifiés (Rayna & Striukova, 2016) : l'impression 3D devient alors un canal de distribution directe aux consommateurs, les opportunités de co-création et d'innovation utilisateur étant encore plus importantes, et, enfin, au-delà de la contrefaçon, il existe alors un risque potentiel de piratage massif des objets de la part des consommateurs.

Cependant, l'impact de l'impression 3D sur les *business models* est en fait double (Rayna & Striukova, 2016). Non seulement l'impression 3D change, comme nous l'avons vu, des composantes clés du *business model*, mais son utilisation en fabrication directe change la manière même dont l'innovation en *business model* se déroule. En effet, l'innovation en *business model* est traditionnellement difficile et risquée. Qu'il s'agisse de mouvements verticaux (par exemple, le développement de capacités de production) ou horizontaux (typiquement l'entrée sur de nouveaux marchés existants, ou bien le développement de nouveaux marchés), ce type de changements en *business models* requiert généralement de forts investissements, pour un retour généralement assez incertain. L'utilisation de l'impression 3D à des fins de production change radicalement les choses (Fig. 3).

Figure 3 : L'impression 3D change également la manière d'innover en business model



Prenons l'exemple d'une entreprise qui pense qu'il existe un marché potentiel pour des accessoires (par exemple, des porte-clés, des coques de smartphones, etc.) liés à sa marque. Ce type de déplacement horizontal demande normalement d'acquérir une capacité de production, puis de construire des stocks (généralement de quelques dizaines de milliers d'unités par produit – le minimum requis pour que la production

5. Portemanteau de « brother » et « pony ».

6. Bien qu'il soit difficile d'avoir des chiffres précis, les « bronies » sont suffisamment nombreux pour que des conventions annuelles soient organisées, notamment « BronyCon » (<http://2017.bronycon.org/about/what-is-bronycon/>) qui rassemble chaque année plus de 10000 « bronies ».

7. Les « bronies » étant difficiles à identifier et souvent peu disposés à discuter de ce qui pourrait être perçu de l'extérieur comme une passion correspondant assez peu aux canons en vigueur, une étude de marché traditionnelle n'aurait sans doute pas donné de résultats satisfaisants.

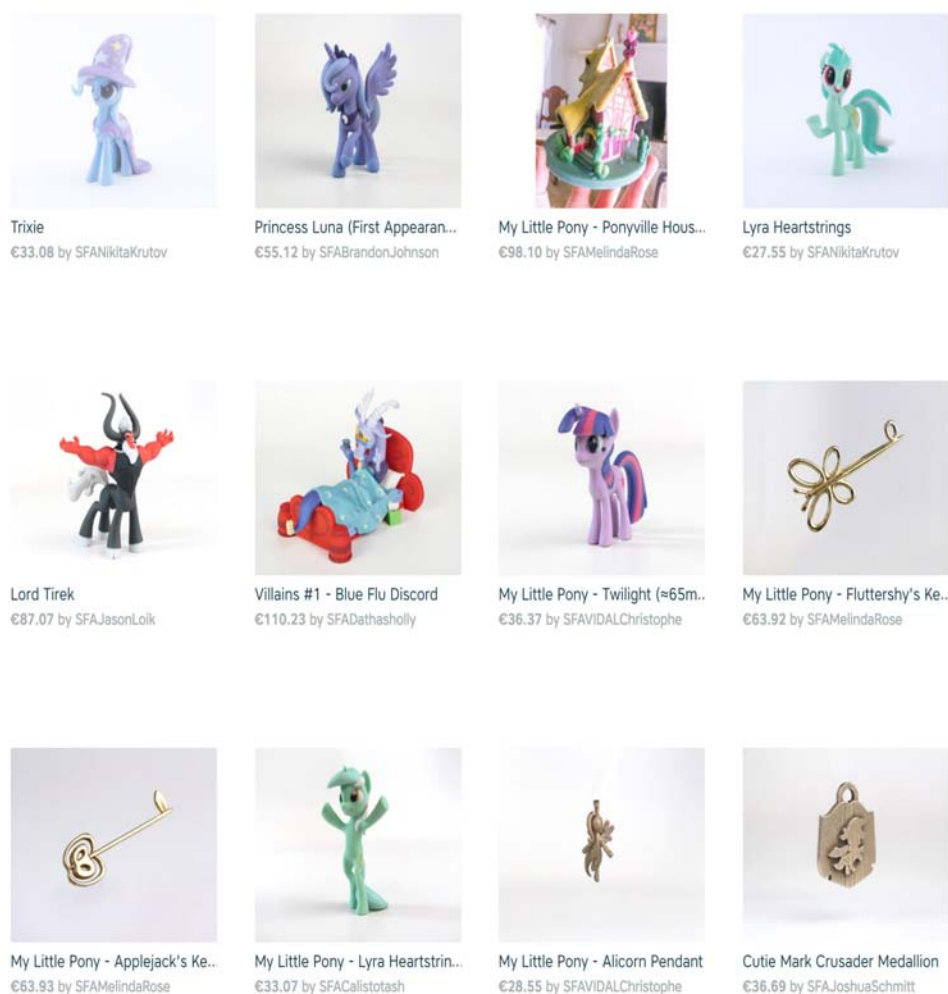
8. Les objets vendus sont ensuite fabriqués directement avec des imprimantes 3D par Shapeways, qui se charge également de l'expédition de l'objet au client (<https://www.shapeways.com/superfanart/mylittlepony>).

soit économiquement viable), et, enfin, de distribuer ces nouveaux produits, sans que l'on puisse savoir si ne serait-ce qu'une seule unité sera vendue. Le même scénario avec une production assurée par des imprimantes 3D serait on ne peut plus différent. En effet, dans ce cas, la production se ferait à la demande. Ainsi, tout ce que l'entreprise aurait à faire serait de mettre sur son site web des photos des nouveaux produits et d'attendre que les clients passent commande. Le risque devient alors minimal, puisque l'investissement requis pour cette innovation en business model l'est également.

À ce titre, l'exemple offert par Hasbro est particulièrement parlant. Cette entreprise, qui est un des leaders mondiaux de l'industrie du jouet, a relancé il y a quelques années une de ses marques phares – *Mon Petit Poney* (« *My Little Pony* ») – en produisant un nouveau dessin animé et en introduisant une nouvelle gamme de jouets, les deux ayant pour cible marketing les filles âgées de 3 à 11 ans. Or, Hasbro s'est progressivement rendu compte de l'existence d'une tout autre communauté de fans de « *My Little Pony* », constituée de jeunes (et moins jeunes) adultes, généralement masculins. Cette communauté, les « *Brony* »⁵, de par sa taille⁶ et le fait que, contrairement aux enfants, ses membres soient autonomes dans leurs décisions d'achat, représentait pour Hasbro un nouveau segment de marché potentiellement très profitable. Le problème était qu'Hasbro ne connaissait tout simplement rien sur ces nouveaux clients potentiels. Ils sont certes fans de la série, mais quels produits veulent-ils ? Probablement pas des jouets en plastique ! Et surtout, combien sont-ils prêts à payer pour ces produits ?

La nécessité de configurer une déclinaison de *business model* pour un marché complètement inconnu⁷, et le fort risque y étant associé, auraient sans doute conduit Hasbro, il y a encore quelques années, à délaisser ce nouveau marché potentiel. Au contraire, l'impression 3D a donné à Hasbro les moyens d'explorer ce nouveau segment. Suite à la découverte de ce segment insoupçonné, Hasbro a signé un accord avec Shapeways, une des plus grosses plateformes d'impression 3D en ligne, donnant la possibilité aux fans de « *My Little Pony* » non seulement de mettre en ligne des objets inspirés de la série, mais également de vendre ces objets⁸ au prix de leur choix, Hasbro touchant une commission sur chaque vente réalisée. Rapidement, de nombreux objets ont été mis en ligne par les fans de « *My Little Pony* » : des figurines (notamment de personnages secondaires qui n'étaient pas alors disponibles sous forme de jouets), des accessoires (porte-clés, etc.) et même des bijoux (médallions, broches, bracelets) imprimés en métal (Fig. 4). Même si tous les objets en ligne ne sont pas vendus (certains le sont, mais pour un très petit volume), cela permet à Hasbro de savoir précisément ce qui se vend et à quel prix. Si un objet se révèle particulièrement populaire, Hasbro peut tout à fait signer un contrat avec le créateur de l'objet en question et inclure cet objet dans sa gamme de produits fabriqués en masse. Inutile de dire que sans l'impression 3D, qui permet de fabriquer à la demande sans volume minimum, une telle forme d'innovation en *business model* n'aurait pas été possible. Grâce à cette technologie, Hasbro a pu, du point de vue de son *business model*, se déplacer horizontalement sur un nouveau marché et adopter un *business model* « court » du point de vue vertical (puisque le design est assuré par les fans, et la fabrication et la distribution par Shapeways).

Figure 4 : Objets créés par les fans de « My Little Pony » en vente sur Shapeways



Autre point intéressant : si cette stratégie n'avait pas fonctionné, cela n'aurait tout simplement rien coûté à Hasbro (mis à part le coût d'établissement du contrat avec Shapeways, qui était sans doute assez faible, ce type d'activités étant le cœur de métier de Shapeways). De ce point de vue, l'impression 3D (utilisée en fabrication directe) permet de passer d'un modèle de *cash-flow* négatif, à un modèle de « *cash-flow* » positif. Auparavant, Hasbro aurait dû investir dans la réalisation d'une chaîne de production, puis aurait dû payer pour produire un nombre relativement élevé de produits, qu'il aurait fallu transporter, puis stocker, et ce avant même que la première vente ait eu lieu. Vu le marché très particulier et profondément incertain des « *bronies* », il n'est absolument pas évident qu'Hasbro aurait été en mesure de vendre suffisamment pour recouvrir les sommes investies. *A contrario*, l'utilisation de l'impression 3D permet un modèle de *cash-flow* positif : il suffit de mettre les objets en vente sur la plateforme, ceux-ci n'étant produits que lorsqu'ils ont effectivement été achetés, à un prix qui couvre évidemment les coûts de production et de livraison. Il faut par ailleurs noter que dans le premier modèle, on produit pour une demande estimée (qui peut se révéler être largement surestimée), alors que dans le deuxième modèle on produit pour une demande réelle.

Si un grand groupe comme Hasbro peut se permettre d'investir de fortes sommes pour lancer un nouveau produit (et probablement survivre à un éventuel échec), ce n'est généralement pas le cas des *startups*. Pour des petites structures, le passage à un

9. Il est courant en Amérique du Nord de tremper des cubes de guimauve (« marshmallow ») dans son chocolat chaud. Les tasses de Max'is Creations apportent un aspect ludique, puisqu'elles permettent de lancer la guimauve dans le panier de basket (<https://maxiscreations.com>).

modèle de « *cash-flow* » positif change singulièrement la donne. De ce point de vue, le cas de « Max'is Creations » est particulièrement instructif. Cette *startup* américaine s'est lancée il y a quelques années dans la construction de tasses pour chocolat chaud équipées d'un panier de basket (Fig. 5)⁹. Cette idée est née d'un prototype réalisé en argile par un enfant de 8 ans, Max, lors d'un cours d'arts plastiques, prototype rapidement copié par nombre de ses camarades de classe. Cet enthousiasme initial pour ce prototype a donné l'idée aux parents de Max de commercialiser ce produit. Sans l'impression 3D, ils auraient dû investir (ou trouver des investisseurs qui l'auraient fait à leur place) de fortes sommes, sans aucune garantie du potentiel commercial effectif du produit. Or dans ce cas, les parents de Max se sont rendus à un bureau d'impression 3D local, qui les a aidés à réaliser un modèle 3D de l'objet, qui a ensuite été utilisé pour construire les premières unités du produit au moyen d'imprimantes 3D. Armés de ces premiers produits, ils sont allés démarcher les magasins locaux, qui ont passé des commandes, tout d'abord en petites quantités, puis en plus gros volumes. Entre temps, le design de l'objet s'est amélioré, suite aux retours des premiers clients et s'est éventuellement stabilisé. Lorsque le volume de



Figure 5 : la tasse-basket de Max'is Creations

commandes est devenu tel que l'impression 3D n'était plus l'option de fabrication la plus économique, un moule de la tasse a été réalisé au moyen d'une imprimante 3D (outillage rapide) et la fabrication à grande échelle a commencé.

Ainsi, l'impression 3D a permis de conduire à bien ce projet avec un investissement initial minimal. La montée en échelle progressive que cette technologie offre a permis d'éviter les problèmes de financement qui brident la plupart des projets entrepreneuriaux.

Une solution à la recherche de son problème

Si l'impression 3D permet de reconfigurer radicalement les *business models*, le faire avec succès requiert de surmonter deux écueils, un lié à la création de valeur, l'autre à la capture de valeur.

L'écueil lié à la création de valeur repose sur le fait de vouloir utiliser l'impression 3D sans se poser suffisamment la question de l'intérêt réel de cette utilisation. En effet, le coût constant associé à l'impression 3D est à la fois un avantage et un inconvénient. En effet, il existe toujours un volume de production au-delà duquel il est moins coûteux d'utiliser une autre méthode de fabrication (typiquement, le moulage-injection). De fait, l'impression 3D ne « gagne » que dans trois types de cas :

1. lorsqu'il y a urgence,
2. lorsque le volume de production est faible (ce qui implique, en dehors des *startups* ou d'applications très particulières, une stratégie de personnalisation de masse),
3. lorsque la forme de l'objet est telle qu'il ne peut pas être fabriqué au moyen d'autres méthodes¹⁰.

En dehors du premier cas, pour lequel ne se pose pas vraiment de question, l'utilisation de l'impression 3D dans les deux autres types de cas demande à être examinée de plus près. En effet, personnaliser des objets prend du temps et redessiner des objets (pour les rendre plus efficaces) en prend également. De fait, « l'ennemi » de la fabrication

10. Outre des applications artistiques, ceci implique généralement des objets dont la structure interne, au lieu d'être pleine, est faite de treillis, afin d'obtenir un ratio résistance/poids supérieur

directe est le temps. Combien de temps peut-on passer à personnaliser des objets ? Combien de temps peut-on passer à redessiner des objets ? Et surtout dans quel but ?

Si l'on regarde les niches dans lesquelles l'impression 3D est utilisée (prothèses et implants, pièces de satellites et de lanceurs, etc.), on se rend compte qu'elles correspondent à des utilisations pour lesquelles le bénéfice de la fabrication directe est évident (mieux vaut avoir une prothèse exactement à la bonne taille et avec la bonne forme ; mieux vaut une pièce de satellite résistante et légère), mais quid des autres cas ? Combien de temps peut-on passer à personnaliser ou à redessiner des couverts, des assiettes, des tables, des chaises ? Et surtout, dans quel but ? En l'absence d'un objectif clair, la fabrication directe est « *a rebel without a cause* », c'est-à-dire une technologie, potentiellement disruptive, mais qui ne l'est pas en pratique, parce qu'on ne lui a pas trouvé de but.

Trouver un but pour l'impression 3D en fabrication directe, et faire passer cette technologie d'une technologie de niche à une technologie adoptée en masse, requiert de cesser de se focaliser sur cette seule technologie et de s'interroger sur la manière dont elle s'articule avec d'autres technologies émergentes, telle la biomimétique, l'IoT/les objets connectés, et le *Big Data*.

La biomimétique vise à développer des solutions d'ingénierie s'inspirant de processus naturels (des exemples typiques sont le velcro et les déflecteurs – « cats' eyes » – situés en bord de route). Bien que la nature soit une source très riche d'inspiration, le problème est qu'il était jusqu'à présent difficile de copier un grand nombre de ces procédés naturels. En effet, la nature ne produit pas en sculptant ou en moulant de la matière, comme nous le faisons, mais en ajoutant des couches de matériaux (comme le montre la coupe d'un tronc d'arbre – Fig. 6). L'impression 3D nous permet donc d'imiter un bien plus grand nombre de procédés naturels, qui ne pourraient être produits autrement qu'avec cette technologie de fabrication. Dans ce cas, la question de l'utilisation de l'impression 3D ne se pose pas : elle est tout simplement nécessaire. Les bénéfices de cette utilisation peuvent être très importants. Ainsi, Airbus pense pouvoir réduire le poids de ces avions de 50 à 70 % en imprimant en 3D une carlingue dont la structure est inspirée de celle d'un os, à la fois légère et résistante (Fig. 7)¹¹.

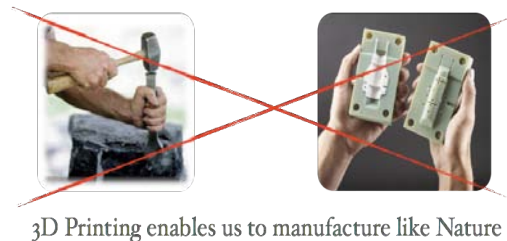


Figure 6 : Différence entre les procédés de fabrication humains et naturels

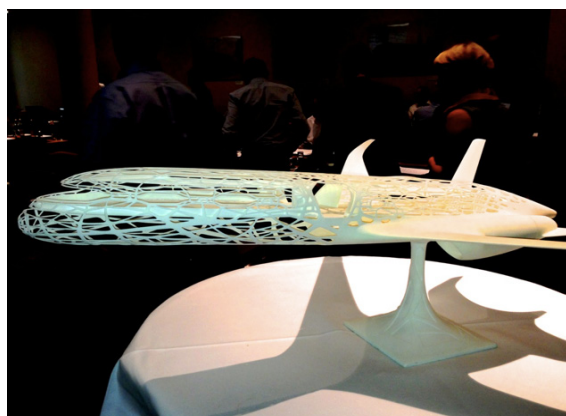


Figure 7 : Projet d'avion imprimé en 3D de Airbus

11. Voir le TEDTalk de Bastien Schaefer de Airbus (<https://m.youtube.com/watch?v=7oQY0uCS2jY>)

La fabrication directe au moyen de l'impression 3D s'allie également très bien avec une autre technologie émergente qui a du mal à se défaire de son statut de technologie de niche : « *Internet of Things (IoT)* » ou objets connectés. Là aussi en effet, on peut douter de l'intérêt général pour des objets tels que la brosse à dents connectée ou la raquette de tennis connectée, les informations délivrées par ces objets étant soit triviales (vous ne vous êtes pas brossé les dents suffisamment longtemps), ou ne permettent pas de régler le problème signalé (vous ne brossez pas bien la dernière molaire située tout au fond de votre bouche, ou votre frappe de balle est mal centrée). En revanche, si les données collectées par ces objets sont utilisées pour fabriquer tout ou partie de l'objet en impression 3D de manière intelligente, la chose est plus intéressante. Par exemple, il serait possible d'imprimer une tête de brosse à dents parfaitement adaptée à votre mâchoire et qui vous permette enfin de brosser cette molaire inaccessible. Ou bien les données collectées lorsque vous jouez au tennis permettent d'imprimer en 3D une raquette parfaitement adaptée à votre morphologie et style de jeux. On pourrait même ajouter de la masse à certains endroits de la raquette afin de faciliter l'apprentissage en aidant à guider le geste. Dans un tel contexte, la fabrication avec une imprimante 3D prend tout son sens, d'autant plus que l'on pourrait imaginer recevoir une nouvelle raquette, qui prenne en compte l'évolution du jeu, tous les quelques mois. On pourrait alors voir apparaître de nouveaux *business models* liés aux objets : on n'achèterait plus un objet, mais on s'y abonnerait.

Cependant, il est tout à fait possible que la quantité de données collectées par ces objets soit insuffisante pour permettre une telle personnalisation, ou que celle-ci prenne trop de temps (que se passe-t-il par exemple si l'on joue au tennis une fois par an ?). Dans ce cas, le « *Big Data* » et l'apprentissage machine pourraient constituer la dernière pièce du puzzle. Comme le fait Netflix pour son système de recommandation qui permet, après avoir évalué quelques films ou séries TV, de nous recommander avec un succès relativement élevé quoi regarder, les données collectées par les objets pourraient être croisées avec celles d'autres utilisateurs de manière à permettre une personnalisation plus fine et plus rapide. Ainsi, les données collectées lorsque je joue au tennis seraient combinées avec les données d'autres joueurs ayant une morphologie, un style de jeu, et un degré d'expertise similaires, permettant ainsi d'imprimer rapidement en 3D une raquette adaptée à mon jeu et me faisant progresser.

Allier impression 3D et « *Big Data* » a un autre avantage. En effet, comme évoqué précédemment, un des freins à la généralisation de la fabrication par l'impression 3D est le temps nécessaire à la personnalisation et au redesign des objets. Si ceci peut se faire automatiquement par de l'apprentissage machine, et que l'on offre aux consommateurs des objets personnalisés et optimisés sans qu'ils n'aient à s'impliquer dans leur création (mis à part, éventuellement, un choix final entre un petit nombre d'options), cela ôterait une des principales barrières à l'utilisation de la fabrication par l'impression 3D à grande échelle.

Plutôt que par une technologie particulière, c'est sans doute par la combinaison de ces technologies — impression 3D, IoT, *Big Data* et machine learning — mais également d'autres (Réalité augmentée, etc.) que viendra la rupture. Indépendamment, elles restent des technologies de niche. Ensemble, elles pourraient causer un « *perfect storm* » qui reconfigurerait radicalement et durablement nos économies¹². Ainsi, pour

12. À ce titre, on peut se rappeler que le PC est resté une technologie de niche jusqu'à ce qu'il se combine à l'impression papier, l'internet, les appareils photo numériques, etc.

l'impression 3D, résoudre l'écueil de la création de valeur requiert de trouver des synergies avec d'autres technologies.

L'autre écueil est celui de la capture de valeur, qu'il convient également de repenser. En effet, comme évoqué précédemment, dès lors qu'un objet peut être imprimé en 3D, toute personne ayant accès à une imprimante 3D peut le reproduire. Se dirige-t-on du coup vers un piratage des objets ? Très certainement, et c'est déjà d'ailleurs le cas, même si cela reste (la faible diffusion de la technologie aidant) à très petite échelle. De fait, des précédentes vagues de numérisation (de la musique, des films, des livres, etc.), on peut tirer trois leçons : 1. lorsqu'une industrie devient numérisée, il y a toujours du piratage ; 2. ni la technologie (DRM, etc.) ni la loi (HADOPI, etc.) ne permettent d'empêcher effectivement ou durablement le piratage ; 3. Si le piratage ne peut être empêché, il peut être évité au moyen d'un business model adapté. Ainsi, après des années de lutte technologique et judiciaire acharnée des industries de la musique et du film, c'est finalement l'introduction de nouveaux *business models* par Spotify et Netflix qui a permis de durablement réduire le piratage.

De ce point de vue, ce dernier est d'ailleurs un leurre. Ce n'est qu'un symptôme d'un phénomène bien plus large : les technologies numériques, parce qu'elles démocratisent les moyens de création, reproduction et diffusion, sont sources de concurrence intense pour les acteurs établis, car elles permettent à de nouveaux entrants de complètement reconfigurer le marché. À ce titre, on peut noter les fortes difficultés rencontrées par des entreprises dans des secteurs où le piratage n'a pourtant pas pris. Ce fut notamment le cas des entreprises produisant des banques d'images utilisées par d'autres entreprises pour leurs publicités et qui ont vu leur marché se réduire radicalement suite à l'apparition de sites d'hébergement et de partage de photos en ligne, tels Flickr ou Instagram : pourquoi payer pour une photo professionnelle, lorsqu'on peut avoir gratuitement une photo amateur, bien souvent d'une qualité tout à fait équivalente ?

Le même phénomène est déjà en train de se produire vis-à-vis des objets physiques, même dans les domaines les plus inattendus. Ainsi, les nouveaux entrants dans l'industrie automobile, tels Local Motors et Divergent3D¹³, ne cherchent pas à copier des Renault et des Peugeot. Ils ne se positionnent d'ailleurs pas en tant que constructeurs automobiles (ils n'auraient de fait aucune chance face aux entreprises établies), mais en tant que plateformes permettant à d'autres de fabriquer des voitures fortement personnalisées dont la conception est réalisée en collaboration avec la « foule » en innovation ouverte.

Ce mouvement de « platformisation » est lié au fait que la numérisation change radicalement le rôle de l'entreprise. On passe d'une situation où l'entreprise conçoit un produit, le fabrique et le distribue à une situation où, demain, avec l'impression 3D, l'entreprise conçoit un produit, le met en ligne, les consommateurs téléchargeant, fabriquant et distribuant (à eux-mêmes ou, localement, pour d'autres) l'objet en question. Le rôle joué par l'entreprise est donc fortement réduit, surtout dans un contexte de co-création/personnalisation où le consommateur est impliqué dans le design du produit, voire où la conception même du produit a été réalisée par la « foule ».

Cependant, bien que réduit, ce rôle n'en demeure pas moins fondamental, puisque l'entreprise devient gardienne d'un écosystème lié à sa marque. Facebook (contenu), Uber (taxi), Airbnb (logements touristiques), Alibaba (B2B), eBay (C2C) sont autant

13. <https://localmotors.com>, <http://www.divergent3d.com>

d'exemples d'entreprises qui ne fournissent elles-mêmes ni produit, ni service (outre ceux liés à leur rôle de plateforme), mais de par leur rôle d'interface jouent un rôle essentiel et ô combien profitable (Fig. 8).

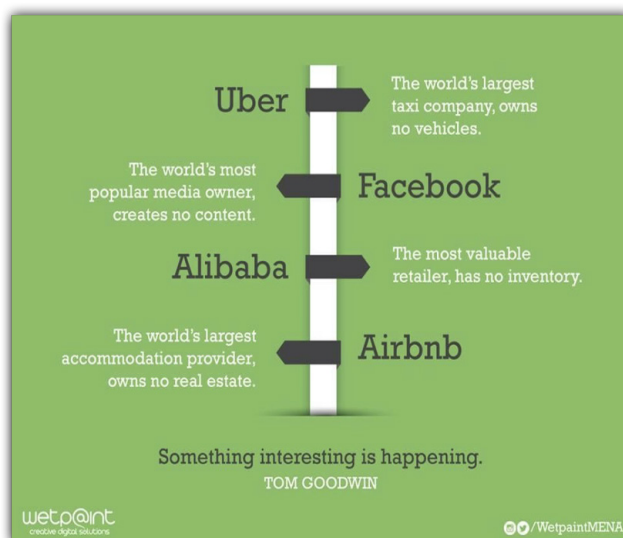


Figure 8 : La « plateforme » de l'économie

Dans ce mouvement de transition d'entreprise-produit à entreprise-plateforme, la disponibilité croissante des moyens de production numériques pourrait bien ne pas laisser de choix aux entreprises. Même lorsque celles-ci sont réticentes à endosser ce nouveau rôle, les consommateurs ont tous les outils nécessaires pour co-crée de manière indépendante (Rayna & Striukova, 2015). Ainsi, pour reprendre l'exemple de l'industrie automobile, des centaines d'objets liées aux marques Renault et Peugeot sont d'ores et déjà disponibles en téléchargement libre. Certains de ces objets (porte-clés, logos, coques de smartphone, boutons) sont inoffensifs (même s'ils enfreignent pour certains des droits de propriété intellectuelle), d'autres (notamment les nombreux « adaptateurs » permettant de fixer des objets — téléphones, tablettes, machine à café Nespresso — dans l'habitacle) le sont nettement moins. Enfin, certains (articulation de portière, prises de recharge pour véhicule électrique, pièces de frein) sont potentiellement dangereux (Fig. 9). Refuser de jouer ce rôle de plateforme crée, au-delà de la perte potentielle de revenus, un vrai risque pour l'entreprise en termes de marque (s'il commence à y avoir de nombreux accidents impliquant des Renault ou des Peugeot, cela diminuera la confiance dans la marque, même s'il peut être prouvé que l'utilisateur utilisait des pièces de frein imprimées en plastique).

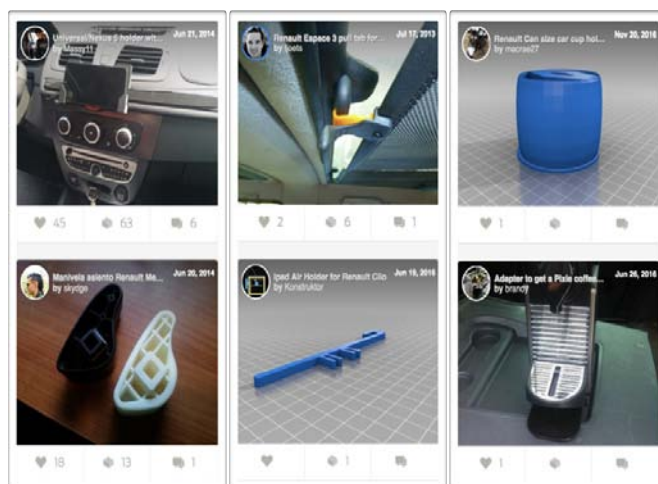


Figure 9 : Modèles d'objets à imprimer en 3D disponibles sur internet.

En se positionnant en tant que plateforme, Hasbro gagne un contrôle sur ce qui est produit autour de sa marque « My Little Pony » et joue son rôle de gardien : les termes contractuels de Hasbro interdisent notamment de mettre en ligne des poneys « violents ou obscènes ». Même si Hasbro ne pourra en aucun cas empêcher la mise à disposition de tels contenus en ligne, elle offre à ses clients un espace sûr en ligne qu'elle contrôle. Il y a peu de doute que nombre d'entreprises (dans les secteurs automobile, électroménager, électronique, puériculture, notamment) devront bientôt l'imiter.

Lorsqu'on passe du produit à la plateforme, la logique de la capture de valeur change radicalement : alors que dans le cas d'un produit, l'objectif est de capturer le plus possible de la valeur créée, dans le cas d'une plateforme être trop « gourmand » conduit à l'échec. Par exemple, si Hasbro veut prélever 90 % de la marge générée par les ventes d'objets sur la plateforme, soit il y aura peu de création, soit les objets créés seront vendus (ou distribués librement) ailleurs (auquel cas l'entreprise perd le contrôle). Dans une logique de plateforme, l'objectif est de maximiser la création de valeur et, pour ce faire, ne capturer qu'une faible partie de la valeur créée : mieux vaut une petite part d'un très grand gâteau, plutôt qu'une grosse part d'un petit biscuit.

Ce mouvement de « platformisation » a suivi l'évolution des technologies numériques : du contenu dans les années 2000, on est passé aux services dans les années 2010 (la fameuse « uberisation »), et on se dirige vraisemblablement vers un phénomène similaire pour les objets dans les années à venir. À ce sujet, il est important de noter que pour qu'une rupture se produise, il n'est pas nécessaire que tout le monde produise du contenu, sous-loue une chambre, ou fasse du covoiturage. Il suffit qu'une masse critique, mais néanmoins très minoritaire, se lance. Il est donc primordial pour les entreprises de repenser dès maintenant leurs *business models*.

DÉBAT

***Question :** L'impression d'un objet prend énormément de temps ; cela ne freine-t-il pas le développement de cette technologie ?*

Réponse : De gros progrès ont été faits en temps de production. Adidas lance une gamme de chaussures avec semelles imprimées en 3D. C'est devenu possible parce que le temps d'impression a fait de très gros progrès.

Remarque : Le problème pour l'instant n'est pas la fabrication mais le fait qu'on ne sait pas trop modéliser l'objet qui a une structure très différente de ce qu'on sait modéliser.

Réponse : Effectivement, Airbus ne sait pas trop modéliser et mesurer la résistance des pièces conçues en 3D. La machine n'a pas réussi à les casser, donc on peut avoir confiance dans leur solidité, mais on a effectivement une difficulté pour modéliser. Par ailleurs, l'industrie a été construite par rapport au prototypage et elle a continué dans cette voie. Les machines actuelles sont très capricieuses.

***Question :** Qui sont les acteurs du secteur ?*

Réponse : Jusqu'ici, ce sont les entreprises qui ont breveté les machines. Mais le secteur est en pleine évolution. General Electric vient de racheter deux acteurs importants. Jusqu'ici, on n'a pas réussi à intégrer l'impression 3D dans les processus

industriels classiques et c'est l'enjeu. Il s'agit maintenant d'offrir aux clients des solutions de production, incluant l'impression 3D dans des conditions de sécurité, de qualité, qui sont celles de l'industrie classique ■

Références

- Bogers Marcel, Hadar Ronen & Bilberg Arne (2016) "Additive Manufacturing for Consumer-centric Business Models: Implications for Supply Chains in Consumer Goods Manufacturing", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 102, n° 1, pp. 225-239.
- Ford Simon & Despeisse Melanie (2016) "Additive Manufacturing and Sustainability: an Exploratory Study of the Advantages and Challenges", *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, November, pp. 1573-1587.
- Petrick Irene J. & Simpson Timothy W. (2013) "3D Printing Disrupts Manufacturing: How Economies of one Create new Rules of Competition", *Research-Technology Management*, vol. 56, n° 6, pp. 12-16.
- Piller Frank T., Weller Christian & Kleer Robin (2015) "Business Models with Additive Manufacturing – Opportunities and Challenges from the Perspective of Economics and Management" in Brecher Christian [ed] *Advances in Production Technology, Lecture Notes in Production Engineering*, Berlin, Springer International Publishing, pp. 39-48.
- Rayna Thierry (2015) "3D Printing is Dead, Long Live Manufacturing!", *CECIMO Magazine – The European Association of the Machine Tool Industries*, vol. 10, pp. 18-19.
- Rayna Thierry & Striukova Ludmila (2015) "Open Innovation 2.0: Is Co-creation the Ultimate Challenge?", *International Journal of Technology Management*, vol. 69, n° 1, pp. 38-53.
- Rayna Thierry, Striukova Ludmila & Darlington John (2015) "Co-creation and User Innovation: The Role of Online 3D Printing Platforms", *Journal of Engineering and Technology Management*, vol. 37, July-September, pp. 90-102.
- Rayna Thierry & Striukova Ludmila (2016) "From Rapid Prototyping to Home Fabrication: How 3D Printing is Changing Business Model Innovation", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 102, n° 1, pp. 214-224.
- West Joel & Kuk George (2016) "The Complementarity of Openness: How MakerBot Leveraged Thingiverse in 3D Printing", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 102, n° 1, pp. 169-181.

Workshop

Transitionning 3D Printing from Niches to Mainstream Markets

1^{er} juin 2018

Le i3-CRG et l'École polytechnique organisent en partenariat avec le Keck Graduate Institute (États-Unis) et RWTH Aachen (Allemagne) un atelier de recherche sur les aspects économiques et manageriaux liés à l'impression 3D / fabrication additive. Ce Workshop, intitulé « Transitionning 3D Printing from Niches to Mainstream Markets » aura lieu le 1^{er} juin 2018 à l'École polytechnique et s'intéressera notamment aux dynamiques d'adoption de ces nouvelles technologies, ainsi qu'aux moyens permettant de surmonter les barrières qui ont confiné jusqu'à présent ces technologies à des applications de niche. Les thèmes abordés sont notamment : les challenges et opportunités liés à l'adoption de l'impression 3D à grande échelle ; les business models liés à l'impression 3D ; l'identification et le franchissement de barrières utilisateurs ; les modifications de dynamiques et de structures de marché par l'impression 3D ; l'impact de l'impression 3D sur les équipes et organisations « NPD » ; les politiques publiques permettant de promouvoir l'impression 3D ; l'impact sociétal au sens large de l'impression 3D ; les challenges liés aux théories de organisations que posent ces nouvelles technologies. La sélection des participants se fera par l'examen de résumés étendus (500-700 mots) qui doivent être déposés avant le 31 janvier 2018 (plus de détails sur le site de la conférence www.3dPrintingParis2018.com).

Les organisateurs de cet événement sont : Thierry Rayna (i3-CRG, École polytechnique), Joel West (KGI) et Frank Piller (RWTH Aachen).