

Université Paris Dauphine



Master II « LOGISTIQUE, MANAGEMENT & ECONOMIE DES RESEAUX »

Année 2013 - 2014

QUEL EST L'IMPACT DE L'IMPRESSION 3D SUR LA SUPPLY CHAIN ?



Mémoire

Présenté et soutenu publiquement par :

Stéphane RUFER

Jury :

Pascal Devernay, ex-Directeur Logistique chez Renault

& Patrice Prely, Consultant, Formateur et Professeur à Paris Dauphine en « Gestion de Projet »

Directeur de Mémoire : Pascal Devernay

Sommaire

Introduction	4
Chapitre 1 : Concept de l'impression 3D	5
1. Principes	5
2. De belles perspectives pour les années à venir	6
A. La personnalisation de masse : un besoin du marché	6
B. Le marché de l'impression 3D : un marché en pleine croissance	7
C. Le Personal Manufacturing ou Home Fabrication	9
Chapitre 2 : Principaux atouts et faiblesses de cette technique	11
1. Les atouts	11
A. La liberté de conception	11
B. Le gain pour l'environnement	12
C. La flexibilité	13
D. La personnalisation	13
E. Le rallongement de la durée de vie des produits (ou upcycling)	14
2. Les freins à l'utilisation industrielle massive de la fabrication additive	14
A. Un procédé relativement récent avec en corollaire un manque de recul	14
B. Le coût d'achat des imprimantes 3D : Choix et Coûts des matériaux	14
C. L'accessibilité	15
D. La vitesse et la qualité d'impression	15
E. La consommation en énergie	16
F. L'obstacle éthique : un contrôle nécessaire	16
G. La question de la propriété industrielle (PI)	16
H. Des gabarits de pièces limités	16
Chapitre 3 : Impacts sur la Supply Chain	17
1. Impact sur les prévisions de vente : une demande plus facile à anticiper	19
2. Impacts sur la production : une baisse des coûts de production	19
A. L'évolution de la production de produits manufacturés	20
B. Des coûts de mise en œuvre et des temps de conception plus faibles	21
C. Le retour sur investissement	21
D. Une plus grande flexibilité, un véritable avantage compétitif	23
E. Vers la fin de la production de masse ?	23
3. Impacts sur les besoins de stockage	24
A. Réduction des coûts de stockage	24
B. Une nouvelle norme : le stockage dans les « nuages »	25
4. Impact sur les transports : une diminution des coûts de transport	25
5. Impact sur les modes de distribution et la vente au détail	26
6. Création de nouveaux services logistiques	27

Chapitre 4 : Applications et domaines d'activité concernés	28
1. Les trois principales applications	28
A. La fabrication de prototypes	28
B. La fabrication d'outillage	28
C. La fabrication directe de produits finis	29
2. Les secteurs d'activité impactés	29
A. Le marché des pièces détachées	29
B. L'automobile	32
C. L'aéronautique, l'Aérospatiale & la Défense	33
D. La santé	34
E. L'architecture & le Design	36
F. L'éducation	37
G. Les autres applications potentielles (à titre anecdotique)	37
Chapitre 5 : La nouvelle organisation des processus Supply Chain	39
1. Les bonnes questions à se poser	39
2. Le rôle des différents acteurs	40
A. La logistique	40
B. Le transport	41
C. Relocalisation en France et plus largement dans les pays d'origine	41
Conclusion	43
Remerciements	44
Sources, pour aller plus loin ...	45
Sites Web	45
Entretiens téléphoniques – Interviews – Contacts	45
Repères bibliographiques	46

Introduction

Chacun aurait pu croire, il y a quelques années encore, à de la Sciences Fiction. Pourtant l'impression 3D est bel et bien aujourd'hui en train de prendre son envol. « Une révolution encore plus radicale que celle d'Internet », d'après Abe Reichental, le n°1 de cette division chez Dassault Systèmes.

Le présent rapport n'a pas pour objet d'échafauder des plans chimériques de ce phénomène mais propose une réflexion réaliste sur les perspectives et les enjeux de l'imprimante 3D sur la Supply Chain. Si on ne sait pas lire l'avenir dans une boule de cristal ni dans les entrailles de poulet, il est toujours difficile de prédire l'avenir. Toutefois, certains indicateurs encouragent à croire au potentiel de cette nouvelle technologie.

Selon un responsable de General Electric Aviation, dans les décennies à venir, au moins 50% des moteurs d'avion seront fabriqués par fabrication additive.

S'agit-il, pour autant, comme beaucoup le prédisent, de la prochaine révolution industrielle ? Outre les scénarii, plus ou moins futuristes, qui dépeignent cette technologie de rupture comme un vecteur puissant de réindustrialisation des pays développés, ses bénéfices et ses promesses annoncés par les spécialistes sont légion : production relocalisée, personnalisation des produits, création d'emplois, rallongement du cycle de vie des produits (upcycling) ... Le président américain Barack Obama a lui-même annoncé début 2014 que l'impression 3D avait « le potentiel de révolutionner la manière dont nous produisons les objets ».

A ce jour avec l'impression 3D, nous n'apercevons que le sommet de l'iceberg, il y a encore tout un bloc de glace sous l'eau dont nous ne pouvons imaginer les dimensions.

L'impression 3D va engendrer de nouveaux business, l'infrastructure qui se mettra en place autour sera gigantesque, et concernera comme nous allons le voir tous les secteurs d'activité.

S'agit-il vraiment d'une véritable révolution industrielle ou d'une simple évolution technologique ?

Quels seront les impacts sur toute la Supply Chain au-delà du simple processus de fabrication, en termes de transport, de stockage et de mode de distribution ?

Dans quels secteurs et domaines d'activité pourra se développer cette technologie ?

Peut-on envisager, comme beaucoup le prédisent, une production de masse ?

Après avoir défini le concept de l'impression 3D et détaillé ses principaux atouts, voilà autant de questions auxquelles nous allons essayer d'apporter des réponses.

Chapitre 1 : Concept de l'impression 3D

1. Principes

De quoi s'agit-il ?

L'impression 3D est une nouvelle technologie appelée également « production additive », par opposition à l'usinage qui modèle un objet par extraction, soustraction ou déformation à partir d'un bloc de matière brute en lui donnant une forme (procédés lourds en outillage et qui nécessitent une main d'œuvre qualifiée). Elle est apparue dans les années 90.

L'impression 3D consiste, en fait, à superposer de très fines couches de poudre de matériaux spécifiques (métal, plastique, bois, acier, etc ...) dont on veut que soit fait l'objet. Un rayon laser vient ensuite chauffer les parties que l'on veut solidifier. Il ne reste alors plus qu'à enlever la poudre superflue, et l'objet devient réel, palpable et fonctionnel.

La fabrication est lancée à partir d'un fichier CAO (objet 3D créé par ordinateur). L'idée est de reproduire l'objet virtuel découpé en tranches dans la réalité par un système d'impression. C'est l'empilement des couches qui crée le volume. On allie le numérique à une imprimante 3D dont le fonctionnement ressemble à une imprimante 2D classique. L'imprimante 3D est un outil qui rematérialise ainsi du numérique. C'est la représentation digitale de l'objet que l'on imprime.

L'obtention d'un modèle 3D peut également se faire grâce à la numérisation d'un objet à l'aide d'un scanner 3D fonctionnant sur le même principe que le scanner 2D. On peut ainsi avoir un modèle numérique 3D à partir d'un objet du monde réel.

Sous sa forme numérique de fichier 3D, un objet peut être modifié, partagé et amélioré par n'importe quel utilisateur ayant accès au fichier original (voir le site *thingiverse.com*). Les objets peuvent ainsi évoluer de manière itérative pour procurer un meilleur confort à l'utilisateur final.

Sans rentrer dans des détails trop techniques, trois technologies principales coexistent :

- La FDM (Fuse Deposition Modeling) : c'est le modelage par dépôt de matière fondue,
- La Stéréolithographie : une lumière UV vient solidifier une couche de plastique liquide,
- Le Fritage Sélectif par Laser : c'est la liaison du matériau sous forme de poudre soit par jet d'une colle liquide, soit par exposition à un laser.

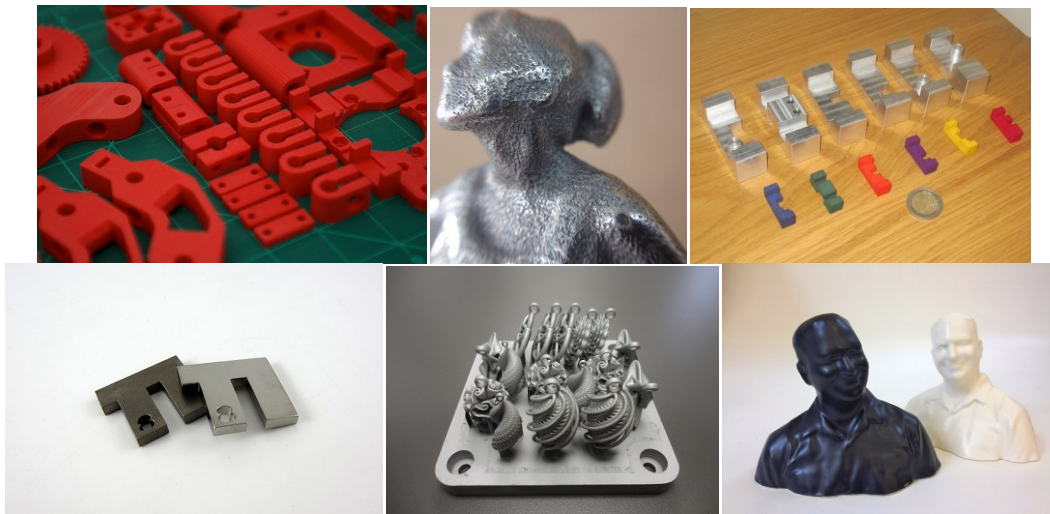
Aujourd'hui, environ 200 matériaux sont disponibles pour l'impression. On peut les réunir en 5 grandes familles :

- Les plastiques (aujourd'hui 75% des impressions) :
 - ABS : surface rugueuse et ressemblante au plastique tant au niveau texture, dureté et fonctionnalité. L'ABS fond à 200°C. Il est résistant et disponible en plusieurs couleurs. La célèbre marque Lego utilise l'ABS pour concevoir ses pièces.
 - PLA : issu de ressources renouvelables, respectueux de l'environnement et biodégradable. Le PLA fond à 160°C.
 - Résine : disponible en mat, brillant, blanc ou noir. Bonne finition de surface.
- Les métaux : principalement le titane et l'acier inoxydable. Egalement l'aluminium et le cobalt-chrome. A noter que l'or, l'argent et le bronze ne sont pas

fabriqués directement avec les imprimantes 3D mais celles-ci permettent la fabrication de moules dans lesquels seront injectés les métaux précieux.

- La céramique : compatible avec la nourriture, elle est recyclable et résiste à la chaleur
- Les autres matériaux : bois, cire, sable, béton, ...
- Les matières alimentaires : chocolat par exemple

Les laboratoires d'HP (Hewlett Packard) travaillent également sur le développement d'un nouveau matériau : le verre qui pourrait être le matériau le plus prometteur de l'impression 3D. Son PDG Meg Whitman précise : « Le Verre est facile à recycler, il est écologique et peu coûteux. C'est une matière agréable au toucher et qui est déjà familière à nos clients. Imprimer du Verre est un véritable défi pour les imprimantes 3D actuelles et HP veut explorer toutes les possibilités avec ce matériau. ». Le principal objectif est de réduire le temps et le coût de ce genre d'impression. Imprimer une bouteille, par exemple, peut prendre de 8 à 10 heures. C'est comme regarder la fonte des glaces ... Il est donc nécessaire d'imprimer plus rapidement pour réduire les coûts et rendre possible une commercialisation.



Exemples d'impressions 3D

2. De belles perspectives pour les années à venir

A. La personnalisation de masse : un besoin du marché

Une définition s'impose : la personnalisation de masse est le processus par lequel une marque donne la possibilité à ses clients de personnaliser un produit ou un service afin que celui-ci devienne le plus unique possible. La société *Coca-Cola* par exemple a récemment invité ses « fans » à participer à un jeu concours qui permet, via une application, de créer son avatar digital. Les gagnants, après s'être fait scannés en 3D à l'usine de *Coca-Cola*, sont repartis avec une figurine à leur effigie, accompagnée d'une bouteille de la célèbre marque.

Aujourd'hui ouvert à tous, le web a vu éclore des géants économiques comme Google ou Facebook, qui sont, à l'origine des « start-up » créées par des étudiants. Bientôt, on pourra créer un objet en un clic aussi facilement que l'on crée des sites internet aujourd'hui. Vous créez votre objet sous la forme d'un fichier 3D. Vous pourrez l'envoyer à un service d'impression 3D qui vous le livrera chez vous ou l'imprimerez avec votre imprimante 3D « maison ».

La personnalisation répond au désir du client d'avoir pour un coût raisonnable, exactement (ni plus, ni moins) le produit dont il a besoin, et ce, dans un délai limité.

Ce concept a rapidement été intégré par de nombreuses entreprises.

Nike sur son site internet (http://www.nike.com/fr/fr_fr/c/nikeid) propose, par exemple, à ses clients, en plus de personnaliser leurs chaussures par le choix d'options, de concevoir eux-mêmes les images ou logos y figurant.

Tout récemment, les boutiques *TheKase* (<http://www.thekase.com/EN/site/index.html>) créées par Jean-Emile Rosenblum, fondateur avec son frère de *Pixmania*, donnent la possibilité de personnaliser sa coque de téléphone ou de tablette. Le slogan est simple : « I am unik ». Le concept : choisir son modèle, télécharger sa photo, cadrer et ajouter du texte. Une imprimante spécialement conçue vient alors imprimer dans un temps record (moins de 10 mn) la coque désirée par le client.



Les consommateurs veulent aujourd'hui avoir plus de choix sur le format final du produit qu'ils achètent. L'apparition de nombreux marchés de niche centrés autour de produits fabriqués à la demande est un premier pas vers la personnalisation de masse. En effet, il est probable qu'à l'avenir, vous n'aurez pas la même tasse à café que votre voisin : vous en aurez trouvé une sur *Shapeways* tandis que votre voisin aura acheté un modèle différent sur *Sculpteo* et ainsi de suite. Pour ce genre de produits, la standardisation imposée par la fabrication de masse ne sera plus de rigueur.

C'est peut-être aussi la fin de la standardisation à outrance de type Ikea.

En Hollande, à Amsterdam, un magasin de meubles "design" permet de choisir son meuble sur catalogue. Il est ensuite imprimé sur place. Cela permet au propriétaire du magasin d'offrir un vaste choix de meubles sans grandes contraintes. Si ceux-ci ne plaisent pas ils ne seront jamais fabriqués. On peut également emporter un fichier chez soi, le « customiser » ou même fournir ses propres plans au magasin qui imprimera le meuble sur place. A l'heure où la standardisation, qui impose une baisse des choix imposés au client final, envahit l'ameublement au travers de chaînes de distribution comme Ikea, ce positionnement ravit la clientèle et les designers.

En parallèle à cette personnalisation, la diffusion des produits va être renforcée puisqu'un bon produit pourra rapidement être exporté à l'autre bout du monde ou être fabriqué sur son lieu de vente. Un "logiciel libre" permettra de partager les plans d'objets complexes et d'y apporter des améliorations. Le client final ne paiera alors plus que son impression.

L'avènement de la personnalisation de masse va permettre ainsi à chacun de posséder des objets différents.

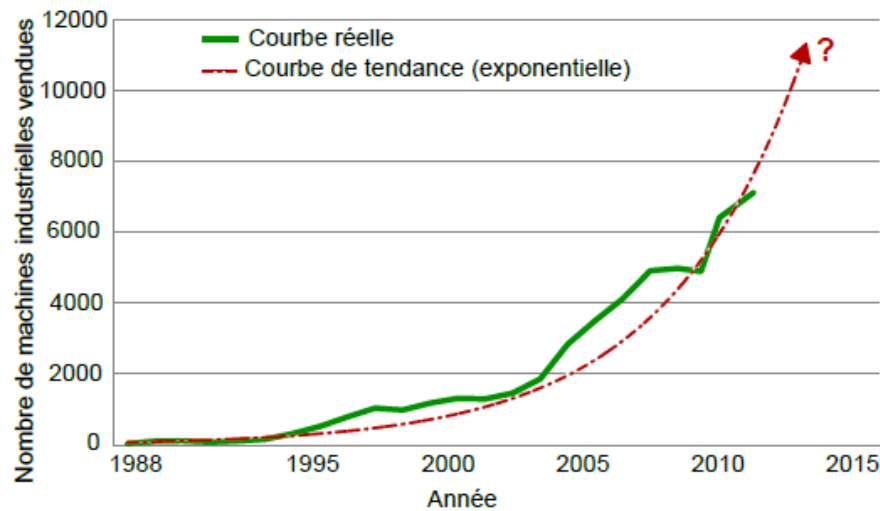
B. Le marché de l'impression 3D : un marché en pleine croissance

Les imprimantes 3D vont-elles révolutionner la Supply Chain ? En tout cas, cette révolution est en marche et arrive à grands pas. Le cabinet *Gartner* prévoit 90.000 ventes d'imprimantes 3D dans le monde pour l'année 2014 (+ 43%).

Les différents rapports *Wohlers* du nom de leur auteur *Terry Wohlers*, un consultant en impression 3D, rappellent depuis vingt-cinq ans les données du marché sur cette

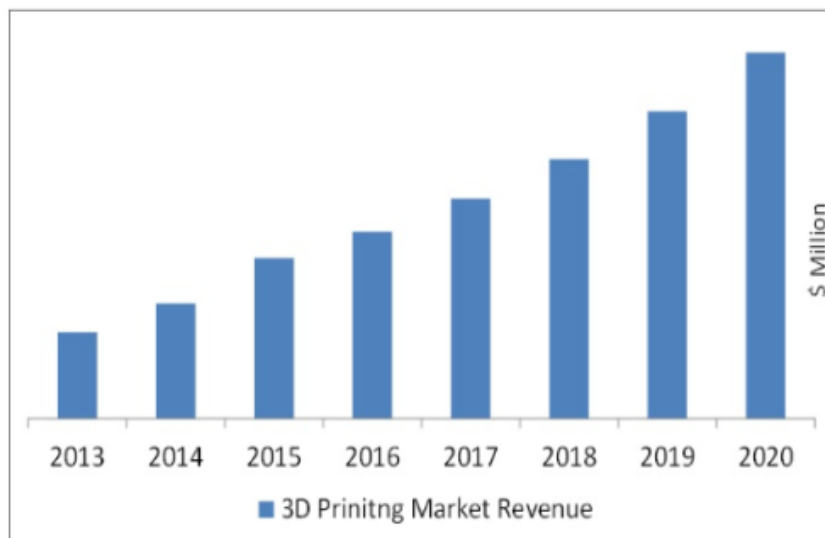
technologie et ses applications. Le rapport 2013 en particulier fournit des chiffres intéressants sur les revenus générés par l'économie de la fabrication additive et sur ses prévisions de croissance.

10 Milliards de \$, c'est ce que représentera le marché global de la 3D en 2020 (source : *Le Point* du 16 janvier 2014). A titre de comparaison, l'année 2012 a généré 2,2 Milliards de \$: une croissance fulgurante avec un passage à 6 Milliards de \$ prévue en 2017 (source *Wohlers*).



Parc machines : une croissance exponentielle

GLOBAL 3D PRINTING MARKET VALUE, 2013-2018 (\$ MILLION)



Source: MarketsandMarkets Analysis

Le potentiel du marché de l'impression 3D

Deux grands acteurs se partagent ce marché juteux. *Stratasys*, le plus gros, valorisé aujourd'hui à 3 milliards de dollars (50 % du marché des imprimantes professionnelles), aujourd'hui le *Google* de l'impression 3D. Derrière lui, *3D Systems* pèse 500 millions de dollars. On lui doit notamment l'imprimante 3D personnelle *Cube*. D'autres acteurs proposent par ailleurs des services d'impression (CA total de 2 Milliards de \$) tels que *Sculpteo* et *Shapeways*.

La France se place aujourd'hui en 7^{ème} position (3% du parc mondial) parmi les pays les mieux équipés en imprimantes 3D. 38% de ces imprimantes se trouvent aux Etats-Unis tandis que 28% sont réparties entre le Japon, l'Allemagne et la Chine.

En 2013, environ 30% des produits finis (essentiellement dans l'industrie aéronautique et automobile) ont eu recours à l'impression tridimensionnelle, et d'ici 2016 et 2020, ces estimations pourraient atteindre respectivement 50 et 80%.

Quatre marchés géographiques majeurs vont être concernés : l'Amérique, l'Europe, l'Asie-Pacifique et le reste du monde. Les pays émergents comme la Chine et l'Inde réfléchissent sérieusement à cette nouvelle technologie et commencent sérieusement à investir dans des programmes de R&D dans ces domaines. Une véritable nécessité si la production délocalisée dans ces pays venait un jour à rejoindre les pays qui consomment les produits.

C. Le Personal Manufacturing ou Home Fabrication

Si l'on constate que l'impression 3D se cantonne aujourd'hui au monde industriel, les chiffres penchent plutôt vers une démocratisation rapide des imprimantes individuelles. En effet, les ventes d'imprimantes 3D, dites grand public ont augmenté de plus de 300 % entre 2009 et 2013 avec des prix passant de 20 000 € à moins de 300 €.

Les progrès réalisés sur les procédés d'impression ainsi que la chute des prix des imprimantes 3D individuelles (à partir de 300 €) sont les signes de l'expansion de ce marché qui représente aujourd'hui un milliard de dollars. Par ailleurs, hier encore, très difficiles à calibrer et à manipuler, certaines imprimantes sont, aujourd'hui, presque aussi faciles d'accès que les imprimantes classiques.

Les imprimantes personnelles permettent aujourd'hui d'imprimer :

- Les objets du quotidien

Le site *thingiverse.com* propose aujourd'hui des modèles en téléchargement gratuit. Il suffit de les télécharger et de les envoyer à son imprimante qui se charge du reste. Une étude de la *Michigan Technological University* a montré que l'achat d'une imprimante 3D pour imprimer de tels objets s'avère rentable pour le consommateur. Après avoir imprimé une vingtaine d'objets de ce type et comparé leur prix de revient au coût d'objets similaires sur Internet, la *Michigan Technological University* assure que cela permet d'amortir une imprimante 3D dans une fourchette allant de quatre mois à deux ans, tout en assurant un retour sur investissement de l'ordre de 40% à 200 %. Si l'étude ne prend pas en compte le temps de calibrage ou l'ajustement des fichiers 3D, il ne fait pas de doute que l'impression 3D à la maison se pose comme une alternative à la fabrication d'accessoires et de certains objets du quotidien.

- Les pièces de rechange pour nos objets cassés

De nombreux objets de notre quotidien, en particulier les pièces plastiques, peuvent se casser. La plupart du temps, ces pièces sont introuvables dans le commerce car le fabriquant a tout intérêt à ce que l'on remplace l'objet plutôt que d'en assurer la réparation.

Ainsi, en donnant une seconde vie à certains objets de notre quotidien, l'impression 3D permet aux particuliers de réaliser des économies substantielles.



Issus du mouvement Open Source, les fabricants d'imprimantes personnelles sont aujourd'hui très nombreux : *Makerbot*, *Cube*, *Ultimaker*, *Printrbot*, *Bucanneer*, *Stratasys*, etc ... et proposent une gamme d'imprimantes très variée à des prix allant de 300 € à plus de 2000 €. Tout comme les services d'impression 3D (tels que *Sculpteo* en France), ces fabricants contribuent fortement à rendre l'impression 3D accessible à tous.

Avec le rachat en juillet 2013 de *Makerbot* par *Stratasys* pour 400 millions de \$, l'ambition de *Stratasys* est clairement affichée : devenir leader de l'impression 3D personnelle. On peut aujourd'hui le comparer à *Apple*, qui, dans les années 1980, avait démocratisé l'ordinateur personnel avec l'*Apple 1*, le premier ordinateur accessible à tous.

Avec l'impression 3D individuelle, et bientôt personnelle, il sera désormais possible de recréer des pièces détachées, personnaliser non plus par un désir stimulé mais par nos besoins et usages, lutter contre l'obsolescence programmée, en un mot entrer dans l'ère de ce que l'on pourrait appeler « la série de l'objet unique ».

Ces machines, pas plus encombrantes qu'un micro-onde, ont un pouvoir stupéfiant : celui de transformer notre situation de basique consommateur passif en inventif **consom'acteur**, pour reprendre le terme de Francis Pisani. Les élites de ce mouvement populaire sont aujourd'hui appelés les « makers », autrement dit les hackers du matériel.

L'impression 3D à la maison, via des imprimantes 3D pour particuliers, est le dernier pas vers la démocratisation de la technologie. Elle atteste d'un réel engouement vers l'adoption massive de cette technologie.

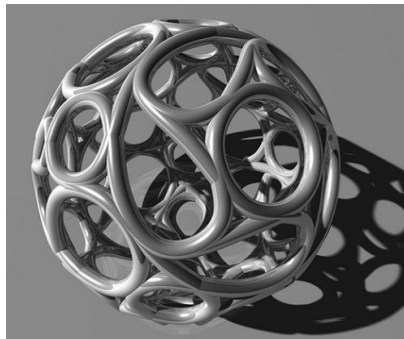
Chapitre 2 : Principaux atouts et faiblesses de cette technique

1. Les atouts

Bien qu'encore limitées en nombre, les applications industrielles de la fabrication additive sont très diversifiées. Cette évolution s'explique par les différentes opportunités qu'offre la fabrication par ajout de matière par rapport aux autres principes de fabrication. Elles dépendent évidemment du contexte associé au produit à fabriquer mais peuvent être, globalement, résumées en quatre principaux atouts.

A. La liberté de conception

Non limitées par l'utilisation d'un outillage, les pièces produites en fabrication additive peuvent comporter des caractéristiques difficiles, des formes très complexes, voire impossibles à réaliser avec un procédé de fabrication classique. Ces caractéristiques peuvent aussi bien concerner la géométrie de la pièce que le matériau la constituant, autorisant, entre autres, le développement de pièces multi matériaux. Ces nouvelles possibilités permettent de revoir la conception des produits mécaniques d'un point de vue fonctionnel, économique et environnemental.



La fonctionnalité d'un produit peut ainsi, par exemple, être optimisée grâce à une structure complexe spécifiquement conçue pour répondre au mieux à un cahier des charges donné (Fig. a).

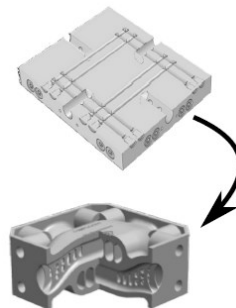
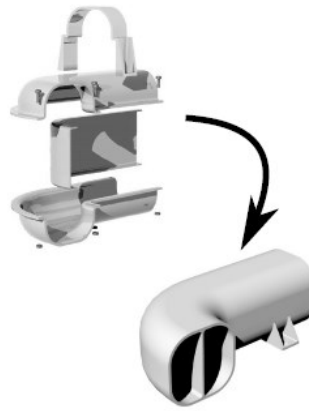


Fig. a

Exemple : Projet Compolight, reconception d'un échangeur permettant de diviser les pertes de charge des fluides y circulant par 4 et ainsi d'augmenter son rendement.

Son coût peut être réduit à travers la suppression d'assemblage de pièces (Fig. b).



b

Exemple chez Boeing : Révision de la conception d'un conduit réduisant le nombre de ses composants de 15 à 1 seul.

Enfin, dans le cas de pièce embarquée dans un véhicule, la réduction de sa masse, à performance fonctionnelle équivalente, permet une diminution de la consommation du véhicule et donc une diminution de son impact environnemental (Fig. c).

Exemple : Projet Atkins 6 chez un constructeur automobile : reconception d'une partie de pompe diesel pour minimiser sa masse et donc la consommation du véhicule qui l'embarque.

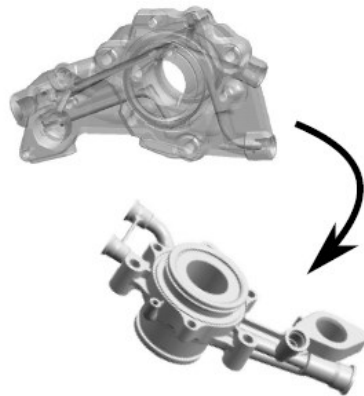


Fig. c

En résumé, tout ce qu'un concepteur peut imaginer peut être fabriqué. Cela favorise l'innovation de produits et permet la fabrication de pièces totalement optimisées pour la performance.

B. Le gain pour l'environnement

Ne partant pas d'une matière brute initiale, le processus de fabrication par ajout de matière permet, dans le principe, de n'utiliser que la matière constituant le produit final.

Soyons réaliste, l'empreinte sur l'environnement n'est pourtant pas nulle. En effet, les constructeurs d'imprimantes 3D ne sont pas plus écologiques que n'importe quel autre constructeur de matériels de conception (machine outils, robots, ...).

Par contre, le fait de produire localement à l'unité ou en petite série toutes sortes de pièces permet de réduire le transport, l'emballage et le stockage de quoi réduire drastiquement les émissions de CO₂. Quant aux déchets de production, la matière perdue lors de la fabrication additive peut être recyclée et réutilisée dans une nouvelle impression.

Pour beaucoup donc, l'impression 3D constitue une alternative durable à une partie de la production de masse puisqu'elle réduit le gâchis lié à la perte de matière lors du processus de fabrication. C'est particulièrement le cas pour les objets métalliques pour lesquels 90 % du métal original est perdu (source : Lipson, Hod et Kurman dans The new World of 3D printing).

Les axes de gains écologiques liés au processus d'impression 3D par rapport aux procédés traditionnels sont les suivants :

- Fabrication locale des produits, réduisant ainsi les distances de transport entre les fabricants et les consommateurs, et de ce fait la pollution associée.
- Réduction du nombre moyen de pièces par produit, simplifiant ainsi les chaînes logistiques, ce qui implique moins de transport et moins de gaspillage (produits invendus)
- Réduction des matières premières utilisées pour la production d'un objet : le processus additif des imprimantes 3D n'imprime que ce dont il a besoin.
- Production de petites séries, à la demande, près de la zone de consommation, limitant ainsi les stocks (conservés dans des entrepôts qui sont consommateurs d'énergie) et le transport des produits. Découper, par exemple, un bloc de métal par processus soustractif est beaucoup plus générateur de déchets que par fabrication additive.

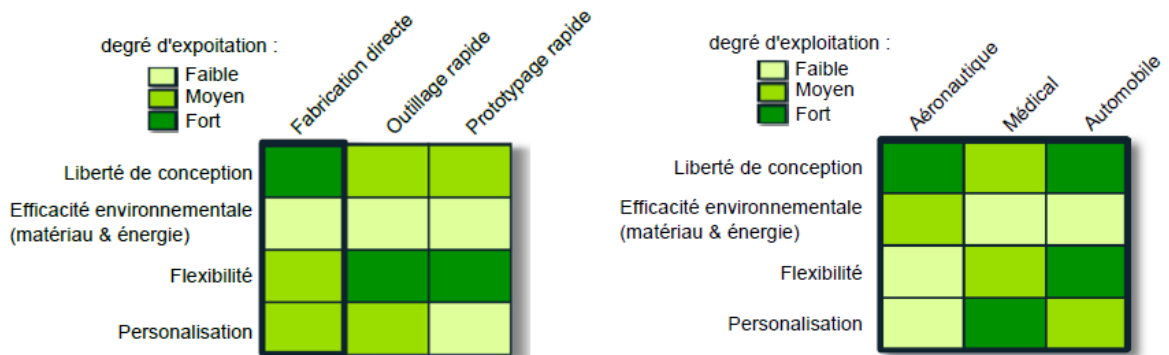
C. La flexibilité

Ne nécessitant pas d'outillages dédiés onéreux, la fabrication additive est parfaitement adaptée à la production de petites séries. Cette flexibilité permet d'envisager une production de type « Juste à Temps » (JAT) qui supprime, par exemple, la nécessité de stocks conséquents.

D. La personnalisation

La liberté de conception évoquée plus haut associée à la flexibilité de la production qu'offre la fabrication additive, permet d'obtenir aussi des produits parfaitement adaptés aux besoins du client sans surcoûts inhérents aux productions de petite série.

La fabrication de produits complexes, hautement personnalisables, tels que les implants médicaux ou certains composants d'avions, pourrait représenter un marché de 770 Milliards de \$ par an d'ici à 2025, et on estime qu'à terme 40% de ces produits pourraient être imprimés en 3D.



(a) Globalement pour chaque domaine d'application.

(b) Dans le cas de la fabrication directe.

E. Le rallongement de la durée de vie des produits (ou upcycling)

L'impression 3D permet de rallonger la vie de certains produits. En donnant la possibilité aux consommateurs d'imprimer des objets sur mesure, ils peuvent aussi donner un nouveau souffle à des objets qui auraient normalement été jetés, faute d'usage. Les consommateurs peuvent réparer un objet cassé grâce à leur imprimante 3D, en imprimant une pièce de rechange téléchargée sur Internet et en réimprimant eux-mêmes une partie d'un objet cassé.

Un excellent pied de nez à l'obsolescence programmée mise en place par les industriels pour réduire la durée de vie ou d'utilisation des produits afin d'en augmenter le taux de remplacement !!!

Si l'on prend le cas de l'impression des pièces détachées, sur le site de modèles 3D Thingiverse, il est possible de trouver des dizaines d'exemples de pièces détachées. Les imprimer soi-même va permettre de rallonger la durée de vie des objets et appareils de notre quotidien.

L'enthousiasme que suscite la fabrication additive semble donc parfaitement justifié par tous ces atouts.

2. Les freins à l'utilisation industrielle massive de la fabrication additive

La fabrication à l'aide d'imprimantes 3D se heurte toutefois à des limites techniques et des obstacles éthiques. Pour devenir une technologie adoptée par un grand nombre et poursuivre son formidable développement, l'impression 3D a de nombreux défis à relever. Elle reste un objet complexe à manipuler, présentant de nombreuses limites aussi bien en termes de coût que de qualité de fabrication.

A. Un procédé relativement récent avec en corollaire un manque de recul

Le premier brevet associé à la fabrication additive date néanmoins de 1892. Blather y propose une méthode d'obtention d'outillage pour la fabrication de cartes topographiques en relief. Toutefois il faut attendre 1986 pour voir se développer l'obtention de pièces de prototypes par solidification d'une résine liquide photosensible. Les matériaux se sont depuis multipliés : plastique, métal, céramique, ... Sur le métal en particulier, de nouvelles techniques ont vu le jour : technologie par lit de poudre, par projection de poudre et par dépôt de fil métallique.

Les premières machines ont été conçues de manière collaborative de par le monde et sous licence libre (ou open source) encourageant tout un chacun à s'emparer du projet et à l'améliorer. Un an plus tard, une plateforme de partage de fichiers 3D apparaissait et contenait déjà plusieurs dizaines de milliers d'objets.

Bien que vieille dame de plus d'un siècle, l'« approche » moderne de la fabrication additive n'est donc développée que depuis une trentaine d'années seulement. La fabrication de pièces métalliques, quant à elle, n'a été rendue possible que depuis une quinzaine d'années et c'est véritablement depuis 2010 que la notoriété et l'utilisation des imprimantes 3D connaissent une croissance sans précédent.

B. Le coût d'achat des imprimantes 3D : Choix et Coûts des matériaux

Le coût de fabrication reste relativement élevé par rapport à des procédés classiques. Avec un investissement de quelques dizaines de milliers d'euros à plus d'un million d'euros pour les imprimantes les plus perfectionnées.

Cela est principalement imputable à un coût de machine élevé couplé dans certains cas à un temps de fabrication important.

Toutefois, les coûts d'équipement et de matière première devraient connaître naturellement une baisse conséquente avec le développement de la fabrication additive.

Si l'on applique la Loi de Moore sur les imprimantes 3D, les prix pourraient sensiblement baisser. La Loi de Moore n'est certes pas une loi physique, juste une extrapolation empirique mais qui s'est très souvent révélée exacte. Entre 1971 et 2001, la densité des transistors a doublé tous les 18 mois. Les appareils électroniques sont alors devenus de moins en moins coûteux et de plus en plus puissants.

Concernant les matériaux, aujourd'hui, l'impression 3D à domicile se cantonne au plastique (ABS ou PLA), ce qui limite considérablement le champ des possibilités. Imprimer des objets en céramique ou en métal via une imprimante 3D personnelle est encore futuriste. De plus, les matériaux disponibles pour l'impression 3D sont limités : on ne peut utiliser que 200 matériaux 3D alors que plus de 1000 sont disponibles sur le marché. Par ailleurs, le traitement de matériaux complexes (pièces à base de fusion de métaux, par exemple) n'est pas toujours possible à ce jour. Enfin, l'impression 3D multi couleur en est encore à ses balbutiements. Les imprimantes 3D professionnelles capables d'imprimer en couleur sont peu nombreuses et coûteuses. Mais la technologie progresse rapidement : la première imprimante 3D personnelle capable d'imprimer des objets en plusieurs couleurs a vu le jour il y a quelques mois.

Le prix des matériaux pour les particuliers est encore élevé – environ 50% plus chers que les matériaux pour imprimantes professionnelles – puisqu'ils doivent être adaptés à la machine et au procédé d'impression.

Aujourd'hui, ce coût des matériaux est variable. Cela va de 20€ pour un 1kg d'ABS à plusieurs centaines d'euros pour de la poudre métallique utilisée pour le frittage laser ... Cela ne constitue toutefois qu'un ordre de grandeur des prix au cm³ pratiqués chez Shapeways.

On peut facilement calculer le coût de l'impression en un clic à partir de ce lien :

<http://www.3dnatives.com/calculer-le-cout-dune-impression-3d-en-un-clic/>

Le développement de nouveaux matériaux et la réduction de leur prix sont les principaux enjeux auxquels la technologie devra répondre pour se développer.

C. L'accessibilité

La mise en route d'une imprimante 3D est une manipulation encore complexe à réaliser. De plus, la création de modèles 3D et la complexité des formats d'exportation sont des barrières à l'adoption massive de la technologie. Le succès de l'impression 3D dépend également de l'amélioration des logiciels de conception de fichiers 3D, de scanners 3D et autres outils liés à la technologie.

D. La vitesse et la qualité d'impression

L'impression 3D est encore un procédé très lent comparé aux méthodes de fabrication traditionnelle. Même pour de petits objets, le procédé peut prendre plusieurs heures. Sans compter que l'impression n'est pas toujours de qualité et requiert une phase de finition : polissage, nettoyage, etc ...

De plus, les objets imprimés en 3D sont par ailleurs parfois instables et se déforment avec le temps, particulièrement les objets fins et allongés.

Enfin, la reproductibilité des objets 3D imprimés n'est pas évidente. D'une impression à l'autre, les matériaux peuvent réagir différemment en fonction des conditions d'impression et présenter de légères différences de formes. Cela pose un problème particulièrement dans le milieu industriel où la précision dans la finition des pièces

désirées est un des premiers critères de qualité. Pour la vitesse d'exécution, aucune norme n'existe. Tout dépend de la technologie utilisée (FDM, SLS, ou SLA), des matériaux utilisés et bien sûr du volume de l'impression.

E. La consommation en énergie

« Les imprimantes 3D sont très énergivores ». C'est le reproche qui leur est fait régulièrement. Pourtant une étude sur la consommation de l'imprimante 3D pour la création d'une boîte de 40x60x20 mm sur une durée de 20 mn) a montré qu'en veille, en préchauffage et en impression, la consommation énergétique n'était de 105 Watt en moyenne soit moins que deux lampes allumées !!! Et un constat : plus longue est l'impression, plus faible est la consommation moyenne.

Imprimer en continu permet donc de faire baisser sensiblement cette consommation moyenne.

F. L'obstacle éthique : un contrôle nécessaire

L'industrie des imprimantes 3D et des services associés reste encore trop embryonnaire pour attirer l'attention du législateur.

Si les imprimantes 3D permettent de tout produire, qu'en est-il des objets dangereux, nocifs ou mortels ?

Un contrôle des supports imprimés est absolument nécessaire. Mauvaise publicité pour l'impression 3D : il y a quelques mois aux Etats-Unis, un américain a « imprimé » une arme à feu qui fonctionnait, à partir du site communautaire Thingiverse qui regroupe de nombreux fichiers 3D téléchargeables gratuitement. Une arme, de plus, très difficile à détecter au rayon X dans les portails d'aéroports. Aujourd'hui, il suffit simplement d'appuyer sur un bouton et de lancer l'impression.

Même réflexion pour les médicaments. Médicaments ou drogues ? Ce n'est qu'une question de vocabulaire. Les dérives sont possibles avec la capacité de produire des drogues chimiques et de les distribuer ...

Enfin pour protéger les consommateurs, il est impératif que des normes garantissant les produits soient mises en place. Avec une batterie de tests (résistance, toxicité, etc ...) effectués avant leur distribution par des instituts indépendants avant leur distribution.

Un encadrement législatif très restrictif est nécessaire pour empêcher toutes ces dérives potentielles.

G. La question de la propriété industrielle (PI)

Si on peut copier tout et n'importe quoi sur une imprimante, que deviennent les brevets des industriels et où commence le piratage ? La question des problèmes juridiques et de la protection des œuvres se pose avec le respect des brevets, des droits d'auteur et des copyrights. D'autant plus que les sites internet qui proposent des fichiers de modèles 3D en libre téléchargement sont légion sur le web. Ils ne devraient en principe pas pouvoir être reproduits, modifiés ou vendus sans le consentement de l'auteur original ; en d'autres termes, nombre de ces fichiers sont illégaux.

La nouvelle industrie à naître appellera, pour le moins, une nouvelle législation adaptée du point de vue du droit à la propriété industrielle et au copyright.

H. Des gabarits de pièces limités

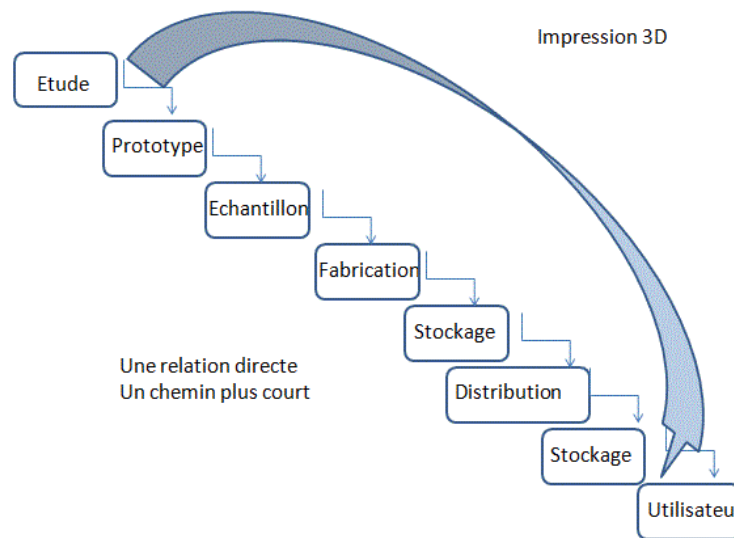
Le gabarit des pièces pouvant être créées par production additive est limité à 1 mètre pour l'industrie. Pour les particuliers, cela varie beaucoup en fonction des matériaux utilisés : de 152x152x101 mm pour la fabrication à partir de cire perdue à des dimensions de 850 x 450 x 500 mm pour la fabrication à partir de polyméthacrylate de méthyle (PMMA).

Chapitre 3 : Impacts sur la Supply Chain

De l'avis même de certains scientifiques, analystes ou investisseurs, l'impression 3D ne semble pas être une simple innovation au service d'un marché existant, mais constitue véritablement une technologie de rupture qui pourrait tout simplement chambouler l'industrie telle que nous la connaissons actuellement, tout autant que nos habitudes de consommation.

Au niveau de la Supply Chain, l'objectif principal est d'optimiser tous les maillons de la chaîne logistique : les coûts de production, les coûts de stockage et de transport pour satisfaire au mieux les besoins des clients.

A terme, l'impression 3D va permettre de court-circuiter les principales étapes (prototype, production de pièces, assemblage, distribution et entreposage) et de restreindre l'ensemble du process à la simple création d'un fichier numérique transféré directement pour la fabrication de l'objet.



L'adoption de l'impression 3D par les grandes entreprises va impacter durablement l'organisation même de la Supply Chain : de la prévision à la production en passant par le stockage et les transports pour finir par la distribution et la vente au détail. C'est l'ensemble des acteurs de cette chaîne logistique qui va devoir s'adapter.

C'est ce que je vais vous expliquer maintenant ...

The impact of 3D printing on supply chains

Whilst modest at present, 3D printing has the potential to transform certain parts of manufacturing, and supply chains, over the longer term.

In addition, instead of taking place in bespoke factories, 3D printing will create demand for smaller and more standard premises, opening up opportunities for developers and investors.

A traditional supply chain



1. Impact sur les prévisions de vente : une demande plus facile à anticiper

La fabrication par impression 3D étant réalisée à la commande ou sur de petites séries définies à l'avance, la demande est parfaitement connue. La production se situe au plus proche de la demande des clients qu'ils soient particuliers ou professionnels.

Dans le schéma traditionnel, des stocks de sécurité sont constitués pour couvrir les aléas liés à l'incertitude de la demande.

Reprenons les cours de Régis Bourbonnais sur le sujet. Sur une série de ventes, plus le coefficient de variation (correspondant à l'écart-type divisé par la moyenne) est élevé, plus il est difficile de prévoir la demande. A noter que des indicateurs tels que le MAD (Mean Absolute Deviation), le MSE (Mean Squared Error) et le SUMEPS (somme des erreurs cumulées) permettent de vérifier la fiabilité des prévisions. Ces résultats permettent de dimensionner le stock de sécurité.

Partant de ce constat, on s'aperçoit que ce stock de sécurité n'est pas nécessaire dans le cas de la fabrication additive puisque la demande est connue d'où des économies sur les coûts de stockage que nous étudierons un peu plus loin.

Rappelons aussi en se replongeant dans le cours de prévisions du Master Logistique de Dauphine que la méthode de Croston (souvent utilisée dans le cas des pièces détachées) permet de calculer des prévisions pour de faibles volumes de ventes. Mais cette méthode qui consiste à considérer l'apparition d'une commande sur une période par une non-commande sur la période suivante et qui se base donc sur deux paramètres : la fréquence de la commande (nombre de période séparant deux commandes) et la commande moyenne (nombre moyen d'articles commandés lorsqu'il existe une commande), a ses limites et sa fiabilité est souvent remise en cause.

2. Impacts sur la production : une baisse des coûts de production

Des centaines d'entreprises et organisations intègrent déjà l'impression 3D dans leur processus de conception et de production.

Le recours à l'impression 3D présente pour elles trois atouts majeurs :

- L'adaptation au besoin spécifique du client
- La fabrication d'articles non disponibles (suite à l'obsolescence du produit)
- La réalisation de petites séries

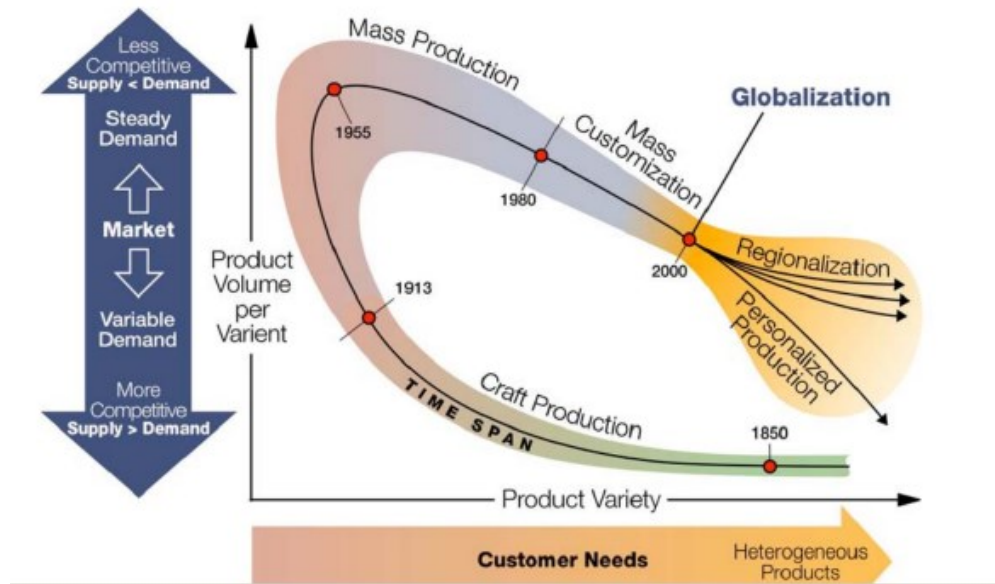
Avec l'amélioration de la qualité de l'impression 3D, la relative facilité d'utilisation de cette technologie et le plus grand choix de matériaux disponibles, l'impression 3D est en train de bouleverser la façon dont certains acteurs de l'industrie fabriquent leurs produits.

Selon le cabinet de conseil Mc Kinsey, « il est fort probable que la plupart des consommateurs puissent avoir accès à l'impression 3D en 2025, que ce soit par la possession d'une imprimante 3D dans leur foyer, par l'utilisation des services d'un prestataire local d'impression 3D, ou par l'achat des produits 3D imprimés en ligne ».

Voyons comment la production de produits manufacturés a évolué pendant plus d'un siècle et intéressons-nous ensuite aux gains sur la production avec des temps de conception plus courts et son corollaire avec les retours sur investissements. Après quoi, nous analyserons si une production de masse est envisageable.

A. L'évolution de la production de produits manufacturés

Au cours des deux derniers siècles les besoins et les attentes du marché en pièces manufacturées ont évolué faisant radicalement changer le paradigme de leur fabrication (voir figure).



Paradigme de la production de produits manufacturés

Les révolutions industrielles, et les guerres mondiales sont les éléments déclencheurs du passage progressif d'une production artisanale (craft production) à une production de masse (mass production). La première est basée sur une main d'œuvre qualifiée, utilisant des machines d'usage général pour faire de manière unitaire exactement le produit demandé par le client. A l'opposé, la production de masse répond à une demande supérieure à l'offre. Elle est basée sur la réalisation d'une gamme limitée de produits, fabriqués à volume élevé, par des moyens de production dédiés. Henry Ford et Louis Renault sont, respectivement aux Etats-Unis et en France, les premiers à appliquer ce type de production à l'industrie automobile [Marty et Linares, 1999].

La période de crise économique qui succède aux Trentes Glorieuses voit, par la suite, l'émergence progressive de la personnalisation de masse (mass customization) qui répond au contexte d'une offre cette fois supérieure à la demande [Pine et Davis, 1999]. Pour attirer de nouveaux clients et stimuler le marché, les entreprises doivent proposer une plus large variété de produits susceptibles de répondre aux différentes attentes des clients. Cette multiplication des modèles va se faire en passant par le développement de produits « à option » permettant au client de sélectionner la combinaison qui lui convient le mieux. Une telle approche permet aux entreprises de conserver une production de type massive, non plus à l'échelle des produits, mais à celle de leurs composants. Elle nécessite, cependant, de revoir la façon d'aborder le cycle d'industrialisation des produits.

Depuis les années 2000, ce type de production évolue avec le développement des outils informatiques et des moyens de communication, en particulier d'Internet. Ces derniers permettent entre autre de réduire, voire de supprimer, les intermédiaires entre le client et le fabricant. Dans le contexte actuel de saturation du marché associée à la raréfaction des matières premières, ces avancées poussent le concept de personnalisation de masse à son paroxysme. C'est-à-dire à une production parfaitement personnalisée (personalized production) [Hu et Al., 2011].

B. Des coûts de mise en œuvre et des temps de conception plus faibles

Le coût de production unitaire n'est pas forcément l'endroit où il faut aller chercher un intérêt pour cette nouvelle technologie. En revanche, le coût de mise en œuvre est beaucoup plus faible, ce qui peut avoir de gros intérêts pour les séries courtes.

Un moule pour injection plastique peut coûter quelques dizaines de milliers d'euros pour des produits un peu complexes et nécessite l'utilisation de diverses techniques de découpe (sculpture, fraisage, etc ...) elles-mêmes coûteuses en outillage. Le plasturgiste voudra toujours injecter quelques milliers de pièces pour rentabiliser son réglage. Si le client n'a besoin que de quelques dizaines ou centaines de pièces (comme c'est le cas dans beaucoup d'industries de niches aujourd'hui), cela induit des surcoûts très élevés !!!

En plus des coûts prohibitifs liés à la création des moules, il faut compter des commandes minimales pour la création de l'objet (généralement 10 000 pièces). Ce sont des barrières qui rebutent au départ de nombreuses personnes désireuses de concrétiser leur idée.

A contrario, l'impression 3D permet la fabrication d'un produit unique ou d'une petite série à des coûts raisonnables. Airbus, par exemple, utilise déjà l'impression 3D pour fabriquer des pièces d'avion en quantité limitée. (voir « Airbus explores building planes with Giant 3D Printers » sur le site Forbes.com).

Concernant le temps pour mettre le produit à la disposition du consommateur, il est plus faible.

Attention à ne pas confondre le temps de fabrication et le temps de disponibilité pour l'utilisateur ou le client (durée entre sa date de commande et la date de disponibilité réelle).

Dans de nombreux articles consacrés à l'impression 3D, un constat sous forme de remarque négative est souvent abordé : la lenteur de l'impression de l'objet concerné, qui est en moyenne, en fonction de la taille du produit et du nombre de pièces réalisées, de 4 et 8 heures.

A noter tout d'abord que toutes les nouvelles imprimantes présentées lors de ces derniers mois augmentent leur vitesse d'impression et la problématique liée aux vitesses d'impression devrait être aisément résolue dans les prochaines années.

Analysons ensuite le scénario suivant : un client vient de casser une pièce utile au bon fonctionnement de son outil, de son jouet ou tout autre article. Il doit rechercher les informations concernant le fournisseur, les références du produit, prendre contact avec celui-ci, s'assurer de la disponibilité de la pièce en question, négocier le prix, accepter le délai de livraison, etc ...

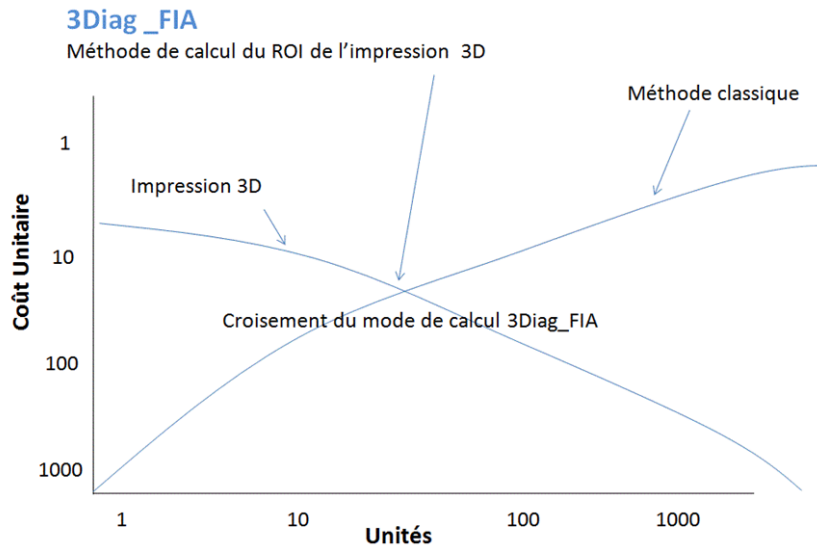
Même en imaginant qu'aucun obstacle (non-disponibilité du produit, grève, retard de livraison) ne se glisse dans le processus, le délai d'approvisionnement de ce produit sera toujours plus long que la démarche d'impression du produit avec une imprimante 3D.

Il est primordial donc de ne pas confondre délai de disponibilité des produits et délai d'impression du produit.

C. Le retour sur investissement

Une méthode de calcul mise en place par Mr Faraggi de Wcom, une société qui accompagne les entreprises dans le cadre de leurs projets de déploiement d'activités à base d'utilisation d'imprimante 3D, permet de déterminer le point du ROI (Return On Investment).

Il compare pour cela la fabrication selon la méthode classique avec la fabrication par impression 3D. Les résultats sont les suivants :

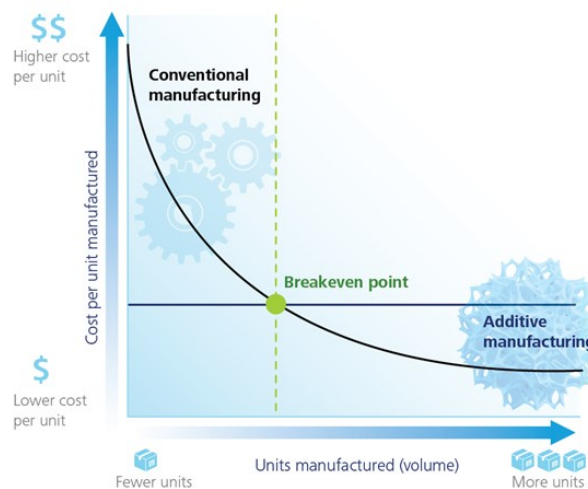


Return on Investment for Additive Manufacturing

Cette méthode de calcul permet d'analyser la faisabilité d'un projet et de déterminer si la fabrication par imprimante 3D est bien rentable.

Nous voyons très clairement dans ces courbes que cela dépend du volume (nombre d'unités nécessaires) mais aussi des matériaux utilisés. Cette technologie est donc particulièrement appropriée pour permettre aux industriels de concevoir des produits de petites séries. Ce que confirme également le graphique réalisé par Deloitte University Press ci-dessous.

Figure 1. Breakeven analysis comparing conventional and additive manufacturing processes



Graphic: Deloitte University Press | DUPress.com

Rentabilité de la fabrication additive par rapport à la fabrication traditionnelle

D. Une plus grande flexibilité, un véritable avantage compétitif

Il n'existe pas aujourd'hui de limite à la complexité d'un objet. Fabriquer un objet d'un seul tenant sur la base d'une structure avec des vides et des pleins reste un des atouts majeurs de l'impression 3D.

Plus l'objet est complexe plus il sera difficile à réaliser dans le cadre d'un processus classique se positionnant sur une approche soustractive de la matière utilisée et non pas sur une approche additive (voir l'exemple p 12 de la fig. b chez Boeing avec le passage de 15 pièces à 1). L'impression 3D permet de créer des objets aux formes imbriquées et extrêmement difficiles à usiner avec les méthodes de fabrication traditionnelles.

Le coût associé à l'outillage dans le cas de l'impression 3D est identique, quel que soit le nombre d'objets uniques produits. En éliminant les phases d'assemblage, les fabricants font d'énormes économies en termes de main-d'œuvre. Alors qu'il fallait des mois voire des années pour reconfigurer l'outil de production dans le but de lancer de nouveaux modèles, l'utilisation des imprimantes 3D est très réactive.

Les coûts nécessaires à configurer une chaîne de montage pourront alors être utilisés pour effectuer des expérimentations sur des designs innovants et permettre d'être ainsi plus proche de la demande des clients avec un seul objectif : accroître les ventes.

Au niveau des coûts salariaux, le gain est difficile à quantifier actuellement. La fabrication traditionnelle requiert une main d'œuvre d'experts et d'ouvriers pour faire fonctionner les machines et assurer la finition des produits. L'impression 3D requiert également la présence de professionnels qui maîtrisent la machine ainsi que de main d'œuvre pour la finition des produits qui ne sont pas tous "finis" en sortie d'impression mais à un degré moindre.

Pour la fabrication de produits dont le temps de production est élevé, qui font appel à un nombre importants de machines ou d'outils lors de leur production, qui sont fabriqués en petites quantités ou qui nécessitent une customisation, l'impression 3D présente un réel avantage compétitif au niveau de la mise en oeuvre.

E. Vers la fin de la production de masse ?

Il y a beaucoup d'effet d'annonce de la part des journalistes, un battage médiatique, relayé par Internet pour créer le « buzz ». Tous annoncent la fin de la production de masse grâce « ou à cause » des imprimantes 3D, la fin de la fabrication traditionnelle et le retour des usines dans nos pays occidentaux. Ils prennent comme hypothèse qu' « au cours des dernières décennies, le rôle de l'industrie est allé en décroissant en occident puisqu'une grande partie de la production industrielle était réalisée dans les pays émergents à faible coût de main d'œuvre. Les industriels se retrouvent, quant à eux, à se battre sur le seul terrain du prix à la recherche de coûts de main d'œuvre toujours plus faibles. L'utilisation d'une imprimante 3D étant très peu intensive en main d'œuvre, la relocalisation de tous les sites de production à proximité des zones de ventes se fera de fait, de quoi révolutionner la production d'objets physiques et de quoi mettre un terme à la logique de décentralisation des entreprises ».

C'est un des grands rêves de cette technique : s'affranchir de la production de masse industrielle.

L'impression 3D continuera certes à être de plus en plus utilisée dans les années à venir pour réaliser des produits uniques ou en petites séries, personnalisés et réalisés à la demande pour des marchés de niche. Mais elle ne peut totalement remplacer la production de masse des pays à bas coûts de main d'œuvre. Les jouets par exemple, pour la plupart fabriqués en Chine, ont peu de chance d'être remplacés par des jouets imprimés en 3D. Pour les grands fabricants comme Mattel, l'intérêt de l'impression 3D, en plus de pouvoir

réaliser des prototypes rapidement, est de venir s'ajouter aux méthodes de fabrication traditionnelle pour améliorer les produits. Les deux techniques sont amenées à être complémentaires. Concrètement, on peut concevoir que la plus grosse partie d'une poupée Barbie reste fabriquée en Chine à l'aide des méthodes traditionnelles, en bénéficiant d'économie d'échelle, et que la partie « personnalisée », unique à l'objet, comme la tête de la poupée, soit imprimée en 3D. Ce rapprochement entre les deux techniques présente un double avantage pour le fabricant : une optimisation des coûts de fabrication via la méthode traditionnelle et, parallèlement, une augmentation de la valeur ajoutée du produit, qui devient « unique », grâce à la pièce imprimée en 3D.

A l'avenir, les grands fabricants ont donc tout intérêt à intégrer l'impression 3D au sein de leur chaîne logistique de fabrication de produits.

L'impression 3D n'a pas vocation à remplacer totalement la fabrication traditionnelle.

D'abord parce que certains objets complexes ne peuvent être réalisés aujourd'hui par fabrication additive. Le meilleur exemple est celui des objets technologiques comprenant des composants électroniques (téléphones, tablettes, téléviseurs, ...). Par ailleurs, la fabrication des tissus à partir d'imprimantes 3D n'est toujours pas possible.

Ensuite parce que cette technologie convient particulièrement aux séries moyennes et courtes mais n'est pas encore assez rapide pour fabriquer vraiment de grosses séries (rentables par le biais des économies d'échelle).

Pour la fabrication additive, la production de masse ne présente aucun intérêt. Les coûts de l'impression 3D sont élevés et seulement des fabrications de petites séries (maximum 100 pièces) présentent un intérêt.

Les bouchons de bouteilles plastiques, par exemple, sont fabriqués à la cadence de quelques centaines toutes les quatre secondes dans l'industrie classique. Ils prendraient quelques milliers de fois plus de temps en technologie additive !!!

Il faut donc plutôt apprendre à faire coexister les deux technologies et exploiter au maximum leur complémentarité. La fabrication additive n'éliminera pas de toute façon les machines-outils conventionnelles quoiqu'on en dise. La comparaison avec la famille des procédés classiques de fabrication montre que le recul que peut avoir l'industrie vis-à-vis de la fabrication additive est très relatif. Cela étant dit, la fabrication directe sur le cycle de Gartner n'en est qu'au début de sa phase de croissance.

3. Impacts sur les besoins de stockage

A. Réduction des coûts de stockage

L'impression tridimensionnelle promet une belle révolution dans l'organisation même de la logistique et en particulier dans sa phase de stockage.

La production s'effectue à la demande du client avec un niveau élevé de personnalisation des produits ce qui limite le stockage d'inventaires. Le produit est conservé sous forme digitale et non plus sous forme physique dans les entrepôts puis envoyé depuis des services d'impression 3D locaux ou imprimé en 3D grâce à l'imprimante personnelle du consommateur.

Une réduction des besoins d'entreposage devrait donc très vite s'imposer.



B. Une nouvelle norme : le stockage dans les « nuages »

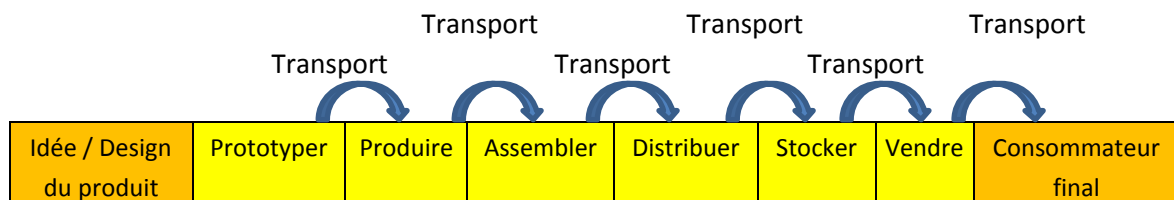
Le fait que chaque objet qui sort d'une imprimante 3D trouve son origine dans un fichier 3D pourrait révolutionner la façon dont sont stockés les produits. Dans un futur proche peuvent être imaginés deux façons d'expédier un objet : par courrier traditionnel ou au moyen d'Internet par transmission d'un fichier 3D. De plus, les objets, sous forme digitale, seront stockés sur des serveurs. A l'instar d'Internet, qui a transformé la façon de produire et transporter les documents papier, l'impression 3D va changer la manière de stocker et transporter certains objets « imprimables ».

Ainsi, pour Christopher Barnatt, auteur du livre « *3D Printing : The Next Industrial Revolution* », l'imprimante 3D est aux objets physiques ce que les ordinateurs et Internet ont été et sont pour le stockage et la communication de l'information numérique.

4. Impact sur les transports : une diminution des coûts de transport

Les transports sont l'un des segments de la Supply Chain souvent traité de façon secondaire alors que leur maîtrise est primordiale pour les industriels et les différents distributeurs. Soumis aux contraintes réglementaires, sociales et économiques les plus fortes, le transport représente plus de 50 % des coûts logistiques. Certaines études prévoient même à terme une évolution de cette part qui pourrait atteindre jusqu'à 60 %.

AVANT : avec la chaîne logistique traditionnelle



APRES : avec la chaîne logistique de l'impression 3D



L'impression 3D va permettre de réduire la logique de décentralisation des entreprises, notamment avec la hausse constante des coûts de transport. En rendant possible la production de pièces à la demande au plus proche du consommateur, plutôt que de l'acheminer sur des milliers de kilomètres, cette technologie va autoriser la réduction des frais de stockage, de manutention et de distribution (parfois via avion ou cargo) qui auraient été nécessaires pour assembler les différents composants et les acheminer jusqu'aux points de ventes.

Pour John Manners-Bell, PDG de Transport Intelligence, l'adoption progressive de l'impression 3D par les grandes entreprises dans leur processus de fabrication peut provoquer le retour de certaines usines à l' « Ouest », c'est-à-dire en Europe et aux Etats-Unis. « Potentiellement, la fabrication d'une partie des biens fabriqués aujourd'hui en Chine ou dans les autres pays émergents, pourrait être relocalisée en Amérique du Nord et en Europe. Cette tendance permettrait de réduire considérablement les frais de transport maritimes et / ou les volumes de fret aérien », explique John Manners-Bell.



Aujourd'hui, avant d'être présenté sur les étagères de nos supermarchés, un produit parcourt plusieurs dizaines de milliers de kilomètre. Les pièces sont fabriquées en Chine, assemblées au Cambodge, puis le produit fini est stocké en France et distribué dans toute l'Europe. L'objet finit par se retrouver dans les mains du consommateur après avoir parcouru plusieurs fois le tour du monde.

L'avantage considérable de l'impression 3D est de regrouper les différentes étapes de la chaîne logistique. Les phases de fabrication et d'assemblages sont ainsi réalisées par une imprimante 3D, située à proximité du consommateur (chez lui ou dans sa ville).

Cette baisse du volume des marchandises à transporter devra à l'avenir être prise en considération par les acteurs de la profession.

5. Impact sur les modes de distribution et la vente au détail

A l'autre bout de la chaîne logistique la vente au détail, maillon final de la chaîne de distribution, devrait changer de visage avec l'émergence de l'impression 3D. Cette technologie, en effet, va avoir un impact important sur les relations entre fournisseurs, grossistes et détaillants.

Aujourd'hui les grossistes jouent un rôle d'intermédiaire entre les fabricants et les vendeurs au détail. Ils s'assurent de la bonne distribution des biens et réduisent pour les détaillants les coûts de stockage en trop grande quantité. Avec l'impression 3D, l'opération se fait à la demande rendant inutile la fabrication et le stockage de produits en grandes quantités avant de passer à la phase de la distribution et de la vente.

Ainsi, à l'avenir, imagine John Manners-Bell, PDG de Transport Intelligence, les grossistes seront amenés à disparaître pour laisser place à une relation fabricant – détaillant. L'expérience de vente au détail en magasin pourrait alors être très différente. Certains détaillants pourraient cesser d'exister ou devenir des « vitrines » pour les fabricants avec un stock quasi nul ou limité. La majorité des commandes serait alors effectuée directement auprès du fabricant et livrée au domicile du consommateur. On passerait alors d'une chaîne fabricant – grossiste – détaillant consommateur à une chaîne simplifiée fabricant - consommateur.

6. Création de nouveaux services logistiques

Pour alimenter ces imprimantes 3D en matières premières (plastiques, métaux, céramique, sable, etc ...), de nouveaux prestataires vont voir le jour en proposant des services d'entreposage et de transport. Pour des prestataires comme UPS ou DHL, cela constitue moins une menace qu'une opportunité dans la mesure où il faudra bien quelqu'un pour organiser cette production et assurer des envois individualisés vers les clients.

La maintenance de ces équipements va également être assurée et devrait être créatrice d'emplois. Une telle révolution va entraîner par la même occasion l'émergence d'un nouveau type d'intervenants ressemblant aux prestataires 4PL et proposant le développement d'applications informatiques, services de livraison, gestion des relations entre partenaires et gestion des contrats.

Cette évolution représente donc une réelle opportunité pour les acteurs majeurs de l'industrie qui disposent des ressources suffisantes pour développer et proposer ces types de service.

Le groupe La Poste s'est lancé lui aussi dans l'impression 3D. Le groupe propose ainsi dans trois de ses bureaux (Boulogne-Billancourt, Hôtel-de-Ville de Paris et Paris-La Boétie), depuis le 27 novembre 2013 et pour 6 mois des imprimantes 3D en libre-service. Cela devrait conduire à une large diffusion et à un déploiement massif de ces équipements dans tout l'Hexagone. Les professionnels suivent avec intérêt ce test.



Imprimantes 3D disponibles en libre-service à la Poste

Chapitre 4 : Applications et domaines d'activité concernés

1. Les trois principales applications

Initialement limitée à l'obtention de simples prototypes visuels, la fabrication additive est aujourd'hui employée industriellement dans trois principaux types d'application.

A. La fabrication de prototypes

C'est la principale application aujourd'hui (58% des cas) de la fabrication additive.

Les prototypes sont les premiers exemplaires fabriqués d'un produit. Ils servent à valider les différentes fonctions que doit remplir le produit fini : fonction de signe, d'usage, d'échange et de productibilité. De par leur fonction, ils sont donc amenés à être réalisés en très petites quantités et à changer fréquemment de caractéristiques.

La production de masse est inadaptée à la fabrication de prototypes puisqu'aucune économie d'échelle n'est réalisable. Construire une ligne d'outillage et d'assemblage pour produire un produit en si faible quantité n'est pas pensable d'un point de vue financier !!! Le problème ne se pose pas avec l'impression 3D, qui présente de nombreux avantages.



*Prototype de téléphone pour validation
avant lancement en production*

De plus, en offrant une représentation physique de l'objet à produire, elle favorise l'identification de défauts de conception et accélère le processus de fabrication en supprimant la phase d'outillage et d'assemblage de certains objets.

A ce jour, de nombreuses entreprises ont intégré l'impression 3D dans leur processus de conception de produits. Les fabricants de chaussures de sport, comme Nike, Puma ou Reebok utilisent l'impression 3D pour accélérer et rentabiliser le processus de conception de leurs derniers modèles. Les constructeurs automobiles, notamment Ford et Renault, font largement appel à la modélisation et l'impression 3D pour concevoir des prototypes de pièces. Des ingénieurs de la NASA ont également réalisé des prototypes d'impression 3D pour tester certaines pièces avant de les produire.

B. La fabrication d'outillage

La fabrication additive est actuellement aussi utilisée en pré-production industrielle, c'est-à-dire avant la phase de production, notamment dans la phase de conception et de développement d'outils de qualité supérieure qui permettront d'accroître l'efficacité du processus de production industriel.

L'impression 3D permet de raccourcir les temps de réglage, d'éliminer les erreurs d'outillage et d'accélérer le processus de fabrication de moules qui serviront à produire l'objet. Par exemple, les moules imprimés en 3D rendent possible un refroidissement plus rapide de la matière injectée, réduisant donc considérablement le temps de cycle de production et participant à l'amélioration du produit final.

On peut citer l'exemple de Prodrive, société anglaise, spécialisée dans le sport automobile. L'entreprise utilise désormais l'impression 3D pour améliorer son outillage. « Avant, cela nous aurait coûté environ £ 10 000, nous pouvons maintenant imprimer ces outils pour environ £ 10 » admet Paul Doe, designer chez Prodrive.

C. La fabrication directe de produits finis

Aujourd'hui, on estime que plus de 28 % des imprimantes 3D déployées dans le monde servent aux industriels pour fabriquer des produits finis.

En effet, cette technique s'avère plus rentable et plus simple pour fabriquer de faibles volumes de produits : elle n'utilise aucun outillage supplémentaire, n'a pas besoin d'usine pour fonctionner et permet une gestion du stock en flux tendu (acheminement régulier, en temps utile, de produits destinés à être vendus immédiatement sans stockage), limitant le nombre d'inventaires. Ces économies de fabrication allègent ainsi le coût de fabrication final des pièces. Autrement dit, l'impression 3D élimine la problématique des économies d'échelle et permet de rentabiliser la production de faibles volumes.

C'est la plus récente catégorie d'application rendue possible grâce aux nombreux progrès qu'ont connus les procédés de fabrication additive ces dernières années. Les industriels et chercheurs s'accordent à dire qu'elle n'est toutefois qu'au début de son développement. Principalement développée dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile de luxe et du secteur médical, elle correspond actuellement à l'obtention de pièces en petite série ayant des formes particulièrement complexes ou à l'obtention de pièces personnalisées.

Depuis quelques années est apparu ce nouveau marché porté par des entreprises comme Sculpteo (<http://www.sculpteo.com/fr/>) en France et (<http://www.3trpd.co.uk/>) en Angleterre. Celles-ci proposent à travers une interface web, de fabriquer les pièces ou produits unitaires imaginés et conçus par tout un chacun. Pour ce faire, elles utilisent ce procédé de fabrication additive qui leur permet de fabriquer en petite série ou de manière unitaire « la » pièce que leur client a lui-même imaginé et défini pour répondre à son besoin, qu'il soit fonctionnel ou esthétique.

2. Les secteurs d'activité impactés

Aujourd'hui, les domaines d'application sont très nombreux : Aérospatiale, Automobile, Santé, Défense, Recherche et bien d'autres comme le domaine des Arts ou de l'Architecture. La croissance la plus grande aujourd'hui concerne toutefois les marchés de l'Aérospatiale et de la Santé, avec un développement également fort à attendre sur les marchés des pièces de rechange.

Des centaines d'entreprises et organisations intègrent déjà l'impression 3D dans leur processus de conception et de production.

A. Le marché des pièces détachées

a) Situation actuelle

La gestion logistique des pièces détachées est très spécifique.

En effet ces pièces détachées (ou pièces de rechange) sont indispensables au bon fonctionnement des équipements des entreprises ou des particuliers. Elles doivent très souvent être livrées dans un délai très court pour ne pas prolonger l'arrêt des machines et conduire à des situations critiques. Réactivité et flexibilité sont donc les maîtres mots de cette logistique. Beaucoup de prestataires s'engagent aujourd'hui à livrer dans un délai de 24h à 48h (selon la situation géographique) avec un taux de service moyen de l'ordre de 95 %.

Une autre caractéristique de ces pièces est liée aux ventes. Elles sont très erratiques (en règle générale, moins de 10% des pièces détachées font l'objet d'une demande soutenue) et donc très difficiles à prévoir. Même s'il existe la méthode de Croston pour anticiper les consommations de produits à faible rotation ... Cette méthode, que nous avons déjà évoquée, consiste à considérer l'apparition d'une commande sur une période par une non-commande sur la période suivante et se base donc sur deux paramètres : la fréquence de la commande (nombre de période séparant deux commandes) et la commande moyenne (nombre moyen d'articles commandés lorsqu'il existe une commande).

Enfin, cette logistique "à flux tirés" se distingue par son nombre important de références et la grande hétérogénéité de ses articles.

Ces contraintes de réactivité, de difficultés à prévoir et du grand nombre de références impliquent de constituer un stock important pour satisfaire la demande dans un minimum de temps. Sans compter qu'un grand nombre de pièces non utilisées sont in fine très souvent détruites.

Un certain nombre de secteurs sont concernés par ces pièces. Parmi eux, citons l'automobile, l'informatique, les équipements et appareils médicaux, les machines-outils et les équipements industriels.

Prenons ici un exemple, celui du secteur automobile avec le groupe Renault.

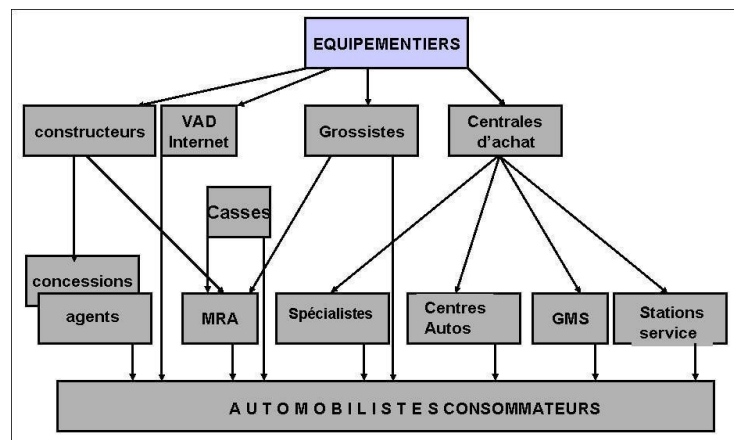
La problématique de Renault est de livrer un nombre très important de références avec une grande diversité d'articles à différents clients : centres de réparation, garages et concessionnaires. Avec la contrainte d'une organisation capable de livrer sous 24 h, voire 12 h et même parfois deux fois par jour. Ce marché des pièces détachées représente pour le groupe Renault 4,5 Milliards d'Euros de CA soit 10% du CA avec une croissance de l'ordre de 10%.

La règle est de livrer :

- Instantanément : une pièce d'usure dont la vie est limitée.
- En quelques heures : des pièces dont les pannes sont relativement fréquentes.
- En 24 à 48 h : des pièces dont les pannes sont très exceptionnelles, si ces pièces ne provoquent pas un arrêt total de la production.

Les modalités de mise à disposition nécessitent de mettre en place un stock à différents échelons :

Un stock central avec un magasin regroupant l'ensemble de la collection (27 magasins dans le monde). Un stock régional dans le pays avec une partie de la collection. En local, un concessionnaire qui stocke les pièces les plus courantes.



Circuit de distribution des pièces détachées automobiles

Comme on peut le voir ici sur le schéma, les pièces détachées sont livrées depuis les magasins centraux vers les magasins « pays » qui eux-mêmes livrent les concessionnaires avant que la pièce n'arrive au client. Un autre circuit permet de passer par des grossistes. Enfin un dernier canal consiste à livrer par le biais des centrales d'achat les centres automobiles, les chaînes de distribution qui disposent d'un espace de ventes de pièces et d'accessoires et les centres de réparation de type Midas et Speedy.

Cette organisation complexe multiplie les stocks avec un coût d'immobilisation important et reste très coûteuse en termes de transport puisque la multiplication des références nuit à la massification des flux et donc aux économies d'échelle.

b) Les économies réalisées grâce aux imprimantes 3D

Le recours à la fabrication additive permet de disposer de la bonne pièce de rechange (en plastique ou en métal) au bon moment. L'utilisation des imprimantes 3D permet ainsi de gagner en réactivité et en rapidité puisqu'il suffit simplement de télécharger le design de la pièce de rechange fourni par le constructeur via une librairie virtuelle et de lancer son impression.

Elle est donc particulièrement appropriée pour un grand nombre de références de pièces de rechanges critiques pour le fonctionnement des appareils et qui ont des consommations erratiques.

L'intérêt est de répondre à la demande des clients dans un délai très court et pour un coût moindre puisque cette organisation ne nécessite ni coûts d'immobilisation, ni coûts de transport.

Le simple changement d'une pièce défectueuse permet ainsi de prolonger la vie d'un produit. Avec un nouveau concept : « réparer plutôt que jeter ». L'impression 3D met ainsi fin à l'obsolescence programmée d'un grand nombre de pièces. Nous avons en effet tous constaté que certains produits ou articles ont des délais de fonctionnement programmés par le fait même de leur mode de fabrication. La consommation des produits et le marketing du jetable règnent en maître sur les articles que nous achetons. L'argument qui consiste à dire « ce produit n'existe plus dans notre catalogue » ou « le produit est trop vieux, nous n'avons plus les pièces de rechange en stock », est en voie de disparition. Les industriels et les fabricants doivent tenir compte de cette mutation afin de pouvoir adapter les structures de réalisation de leurs produits. Cela permet également au particulier de réaliser une belle économie puisqu'il ne lui est pas nécessaire d'acheter un nouveau produit.

Avec le recours à l'impression additive, il est maintenant possible de produire des pièces de rechange pour des machines en fin de vie sans avoir à les acheminer depuis le fabricant.

Dans cette recherche d'optimisation des coûts, économie rime parfois avec écologie. L'impression 3D possède ainsi un potentiel important en termes de développement durable.

Si on prend l'exemple d'un fabricant de machine à laver. Il doit en principe fournir des pièces de remplacement (souvent à des prix exorbitants) à tous les magasins qui vendent ses produits même si la plupart de ces pièces ne seront probablement jamais utilisées. Mais le commerçant est tenu d'avoir ces pièces en stock lesquelles selon toute vraisemblance ont été fabriquées en Chine par exemple où à l'origine a été envoyé la matière première. De Chine, les pièces ont ensuite été dirigées vers l'entrepôt central qui les a réparties aux quatre coins de la planète. Bref, une simple pièce de rechange en plastique peut avoir fait deux fois le tour de la planète avant de se retrouver entre les mains des clients. D'un point de vue écologique, c'est inacceptable. D'autant plus que se développe aujourd'hui une

prise de conscience collective des consommateurs qui intègrent largement l'impact écologique dans leur acte d'achat.

Pour conclure sur le marché des pièces détachées, il faut préciser que c'est un marché très rentable qui a un bel avenir devant lui.

Un exemple : Oscaro.com, le leader européen de vente de pièces automobiles pour les particuliers sur internet. Cette société vient de remporter le dernier trophée de roi de la Supply Chain 2014 décerné par Supply Chain Magazine. Oscaro.com songe à avoir recours à l'impression 3D pour gérer ses 500 000 références. De quoi accompagner sa croissance ininterrompue de 30% par an et garantir la livraison de ses trois millions et demi de clients.

B. L'automobile

L'imprimante 3D dans le secteur de l'automobile favorise aussi le travail itératif.

Elle permet de tester les pièces sans contrainte budgétaire et fluidifie la chaîne de production. L'impression 3D est idéale pour créer des prototypes automobiles résistants et des articles à partir de thermoplastiques d'ingénierie de haute performance.

La production additive permet de :

- Remplacer l'usinage CNC

Les pièces réalisées par usinage CNC sont coûteuses et longues à produire. L'impression 3D permet de réduire considérablement les coûts de production. Les pièces en plastique imprimées donnent au final de meilleurs résultats sur le plan technique. Elles sont plus légères et peuvent présenter des formes extrêmement complexes qui seraient difficiles à réaliser avec les techniques de fabrication traditionnelle.

- Fabriquer des outils plus adaptés

Pour les appareils portatifs utilisés sur les lignes d'assemblage, les ingénieurs peuvent avoir recours à l'impression 3D pour fabriquer des outils parfaitement adaptés et qui présentent de bien meilleurs résultats que les outils conventionnels.

- Tester et identifier des problèmes de conception

Dans certains cas, l'utilisation de modèles de CAO seule n'est pas suffisante pour cerner les problèmes de conception. Les ingénieurs font alors appel à l'impression 3D pour identifier un problème de design qui n'aurait pas été identifié lors de la phase de conception initiale.



Exemple de pare-choc ...



... et de tableau de bord imprimés en 3D

C. L'aéronautique, l'Aérospatiale & la Défense

Les ingénieurs de ces secteurs à forte dominante technologique utilisent aussi l'impression 3D pour le prototypage, l'outillage et la fabrication de pièces finies.

A partir de thermoplastiques à haute performance, ils sont en mesure de construire des gabarits de montage, des jauges de contrôle mais aussi des pièces finies utilisées dans ces secteurs.

L'imprimante 3D permet de créer des pièces résistantes à la chaleur, aux substances chimiques et aux rayons ultra-violets qui n'absorbent en outre pas l'humidité.



Exemples de charnières d'Airbus en un seul bloc, sans soudure, ni boulons

Plus de trois cents pièces différentes imprimées en 3D équipent déjà les avions fabriqués par la société Boeing (les conduits d'air par exemple).

Pour de petites séries et des pièces aux formes compliquées, il est possible ainsi de réduire considérablement les coûts de production. L'impression 3D permet par ailleurs un gain de poids pour les pièces en plastique ou en métal et offre une meilleure isolation électrique.

Les thermoplastiques de production de haute qualité sont donc une solution idéale pour la fabrication de composants pour avions, en raison de leur légèreté et leur résistance à la chaleur (caractéristiques ignifuges), atouts déterminants dans cette branche de l'industrie.

Même remarque pour le secteur de la Défense, l'impression 3D donne aux gouvernements et aux militaires la liberté de concevoir des pièces en faible quantité, de créer rapidement de l'outillage à moindre coût et de construire des prototypes complexes et sophistiqués. L'impression 3D est déjà largement utilisée dans la fabrication des drones.

Les prototypes imprimés en 3D permettent d'anticiper les défauts potentiels de conception avant d'engager le lancement de grandes séries réduisant ainsi l'image négative et les surcoûts liés à l'introduction sur le marché de nouveaux produits comportant des défauts sur le marché.

Les ingénieurs de conception et de fabrication peuvent enfin utiliser ces prototypes comme outil de communication qui serviront à améliorer le produit tout au long du cycle de développement jusqu'à la phase de production.

D. La santé

Dans le monde médical, l'impression 3D apporte de belles promesses dans de nombreux domaines : des implants dentaires aux prothèses auditives en passant par la chirurgie réparatrice. Elle a un double avantage : permettre aux fabricants d'économiser de l'argent qu'ils peuvent investir dans la recherche et offrir aux clients un confort encore jamais atteint, en leur proposant des prothèses parfaitement adaptées à leur morphologie personnelle. L'expert britannique Phil Reeves estime qu'il existe environ 10 millions d'appareils auditifs et plus de 500 000 implants dentaires imprimés en 3D en circulation dans le monde entier.

Les matériaux d'impression 3D utilisés dans le monde médical offrent de plus une excellente finition et une grande stabilité.

Jusqu'ici, les prototypes médicaux ont encore été utilisés avec parcimonie dans le secteur de la santé pour des raisons de coût et de temps. L'impression 3D est un outil plus rapide, plus simple qui permet aux fabricants de produits médicaux de développer des dispositifs d'essais cliniques prêts à l'emploi rendant la validation de ces dispositifs plus rapide, plus simple, mieux adaptable et plus fonctionnelle.

a) Les implants dentaires

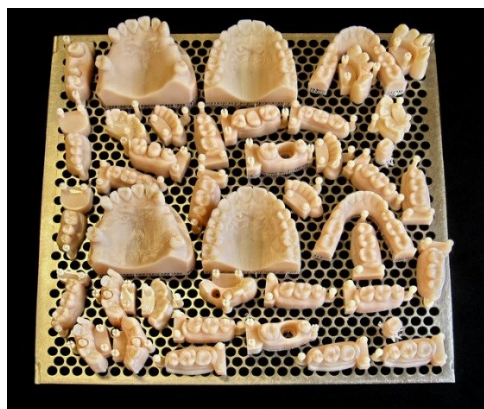
En combinant le scan 3D des voies orales avec la conception CAO, l'impression 3D a déjà envahi le premier niveau de complexité du corps humain. Les laboratoires dentaires peuvent ainsi rapidement et avec une grande précision de produire des plâtres dentaires, des appareils orthodontiques, des plateaux de réception et de positionnement, des gouttières et des appareils transparents, des couronnes, des bridges, ...

L'impression 3D est facile d'utilisation et peut utiliser des matériaux d'impression dentaires spécialisés.

Elle permet d'améliorer les délais de production ainsi que la productivité des ateliers. De plus, en travaillant avec des modèles numériques, les professionnels peuvent stocker l'ensemble des fichiers clients pour un coût quasiment nul. Ils offrent à leurs clients un confort inégalé avec des pièces parfaitement adaptées à leurs besoins.

La fabrication additive offre en outre un rapide retour sur investissement.

Avec des gammes de matériaux tout à fait adaptées aux cliniques et laboratoires dentaires, l'impression 3D revient à un prix abordable pour une précision et une vitesse d'exécution inégalées.



Exemple d'implants dentaires fabriqués par fabrication additive.

b) Le bio printing ou impression de tissus vivants

Ce qu'on appelle le bio printing ou impression de tissus vivants est l'un des secteurs les plus porteurs de cette technologie. Ce sont ni plus, ni moins que des « pièces détachées pour le corps ».

L'impression 3D est capable de sauver des vies. En imprimant des os ou même des organes, l'homme pourrait faire face à la maladie et à de nombreux problèmes de santé. Si l'on prend l'exemple des transplantations d'organe, au lieu d'attendre la disponibilité d'un organe par le décès d'un autre être humain, les patients pourraient se voir transplanter un cœur ou un rein réalisé sur mesure par une imprimante 3D. Il en serait de même pour remplacer un cartilage usé ou une rotule fissurée. Le principe : le fabricant scanne la partie du corps humain concernée. Le scanner enregistre la forme qu'il transforme ensuite en fichier numérique compatible avec des logiciels de conception 3D. Enfin, le fichier est 3D imprimé.

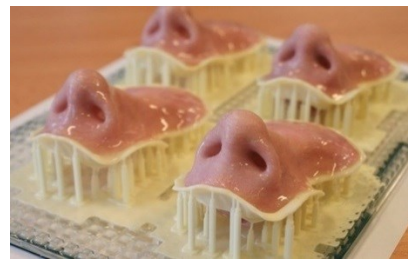
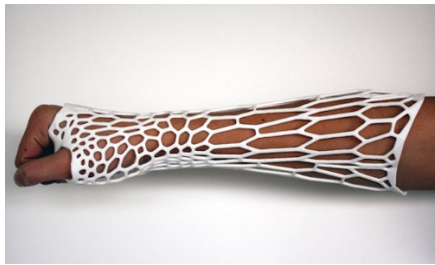
A noter enfin que le Bioprinting va constituer de nouveaux domaines de formation du corps médical.

c) Les prothèses

La possibilité de fabriquer toute sorte de prothèses imprimées en 3D constitue une avancée majeure et bouleverse déjà la vie de ceux qui ont pu en bénéficier.

Aux Etats-Unis, on recense plus de deux millions de personnes équipées de prothèses ou de membres artificiels. L'impression 3D permettrait de réaliser celles-ci avec un niveau de personnalisation sans précédent. Ces implants doivent être acceptés par les organismes des patients. Ceux imprimés en 3D ne devraient pas susciter plus de phénomènes de rejets que ceux actuellement à la disposition du corps médical.

En août 2014, des chirurgiens d'un hôpital de Pékin ont implanté une vertèbre implantée en 3D chez un jeune garçon chinois de 12 ans. Une première mondiale !!!

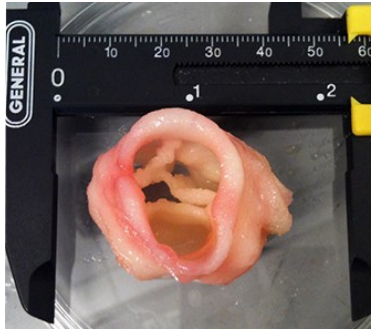


Exemple d'un nouveau type de plâtre à base de résine et prothèses de nez

d) La transplantation d'organes

En 2012, 12 800 personnes en France avaient déjà bénéficié d'une transplantation d'organe. Avec le vieillissement de la population, ce nombre ne peut que s'accroître.

Cette situation crée de belles opportunités pour l'impression 3D.



Exemple de valve artificielle pour le cœur humain.

e) La fabrication de médicaments

Un chercheur anglais s'est lancé dans l'impression de molécules pour créer des médicaments à partir d'une imprimante 3D. Pourquoi ne pas demain imprimer ses propres médicaments à la maison depuis une imprimante 3D à partir des sites internet officiels des laboratoires pharmaceutiques et ainsi disposer sans délai du médicament localement, là où les gens en ont besoin. Une fois le problème de la prescription médicale qui ne peut être éludé, un bouleversement prochain dans le fonctionnement de l'industrie pharmaceutique, ne peut être écarté.

La majorité des médicaments est composée aujourd'hui à partir de molécules banales, telles que le carbone, l'hydrogène, ou encore l'oxygène ce qui implique qu'avec peu d'encres différentes, il est possible de créer une vaste gamme de médicaments (à commencer par l'Ibuprofène).

Par ailleurs, il va être possible de fournir des médicaments à des malades qui n'y ont pas accès aujourd'hui du fait de coûts de distribution et de R&D trop importants par rapport aux ventes.

Ces nouvelles perspectives devraient permettre de lutter plus efficacement contre les méfaits des médicaments contrefaits.

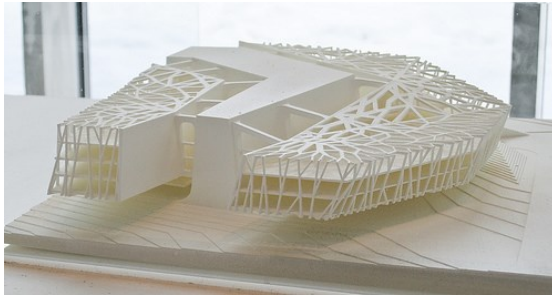
E. L'architecture & le Design

Pour les cabinets d'architecture, les bureaux d'étude ou les studios de design, l'impression 3D facilite le travail et le rend plus rapide en créant des modèles résistants et complexes, directement à partir de données CAO ou CAD issues d'un logiciel 3D d'architecture ou de design 3D (comme AUTO CAD, 3D Turbo et BIM).

Ces modèles conduisent à l'élaboration de maquettes détaillées dans une gamme de matériaux y compris les photopolymères rigides prêts pour la peinture.

L'impression 3D permet un gain de temps et une meilleure communication dans la fabrication de maquettes d'étude ou de maquettes artistiques. En imprimant des modèles plus détaillés, les clients peuvent mieux visualiser et comprendre le design et faciliter ainsi le processus décisionnel des projets.

C'est un gain considérable sur le temps passé et les dépenses liées à la production de modèles de construction, nécessitant souvent des détails très précis. Les maquettes ainsi créées sont en outre plus résistantes que les modèles traditionnels.



Série de maquettes d'études architecturales

Enfin, pour des séries répétitives, il est possible de fabriquer un moule avec l'imprimante 3D pour des articles de fonderie. On peut ainsi produire plusieurs pièces pour un prix abordable.

Des projets plus ou moins réalistes existent aussi dans le domaine des constructions de maison. Voici une vidéo sur le sujet :

<http://www.youtube.com/watch?v=TyOgDIUWfFE>

F. L'éducation

L'imprimante 3D va devenir, par ailleurs, un véritable outil pour la salle de classe. Plusieurs fonctionnalités peuvent d'ores et déjà être envisagées :

- Il fournit aux enseignants des aides visuelles en trois dimensions utilisables dans leur cours pour illustrer une notion difficile à saisir.
- Au lieu de montrer des images d'objets, il permet aux enseignants de susciter l'intérêt de leurs élèves en imprimant des objets réels.
- Il améliore l'apprentissage pratique et l'apprentissage par la pratique à l'aide de mini-modèles réalistes en 3D.
- Il offre plus d'espace pour les activités interactives en classe
- Il permet aux étudiants d'acquérir de nouvelles compétences et de nouvelles opportunités de carrière, ceux-ci pouvant présenter leurs projets imprimés non seulement en cours mais aussi lors d'entretiens d'embauche. La connaissance de ces techniques d'impression va également devenir un atout pour les entreprises qui utilisent l'impression 3D en interne.

G. Les autres applications potentielles (à titre anecdotique)

Enfin, pour finir sur une note plus légère, voici deux débouchées pour le marché de l'impression 3D.

a) Le food-printing (ou la nourriture 3D)

L'idée est de pouvoir choisir dans un catalogue illimité de recette en ligne, le plat que l'on souhaite consommer. Il suffit d'appuyer sur la touche, imprimer pour obtenir la préparation du met désiré, avec en outre la possibilité de programmation anticipée.

Comme le micro-onde a révolutionné nos pratiques culinaires, le food-printing devrait conduire à des bouleversements plus grands encore, surtout quand on connaît l'intérêt de nos compatriotes pour la cuisine et le temps qu'ils passent à table.

Le principe est toujours le même : le recours à des logiciels CAO puis à des ingrédients reconditionnés ou des ingrédients de synthèse. Le food-printing génère au niveau des temps de préparation des gains de temps considérables et offre en outre la possibilité de mesurer avec la plus grande exactitude l'apport calorique des plats imprimés.

Utopie, chimère, ... pas vraiment.

Certes les limites de l'impression de nourriture en 3D sont aujourd'hui très nombreuses :

- l'absence tout d'abord d'imprimante grand public de ce type sur le marché,
- les ingrédients devant se présenter sous forme de pâte molle, un calibrage de l'imprimante extrêmement complexe,
- une perception négative des consommateurs vis-à-vis de plats perçus comme trop synthétiques et chimiques.

Bien que cette technique n'en soit qu'à ses balbutiements, elle intéresse déjà beaucoup les grands groupes de l'agro-alimentaire de par ses conséquences sur la Supply Chain. Par ailleurs, à une époque où de par le monde des millions d'êtres humains souffrent encore de malnutrition, l'impression en 3D de plats protéinés constitue à terme une perspective non négligeable qui ne peut à priori être écartée.

b) Accessoires

Il convient d'évoquer enfin les accessoires qui peuvent être produits par fabrication additive.

Le designer Ron Arad a lancé en avril 2013 une gamme de lunettes de soleil imprimées, faites d'une seule pièce. Ron explique que cette méthode de fabrication permet de s'affranchir des manipulations fastidieuses nécessaires à l'assemblage des différentes pièces qui composent une paire de lunettes classique.

Dans le domaine des chaussures de sport, Nike, l'équipementier sportif a dévoilé en mars 2013 une chaussure de football dont semelle et crampons solidaires sont réalisés à partir d'imprimantes 3D. La firme New Balance va encore plus loin. En étudiant la foulée d'un coureur à l'aide de capteur et de logiciels CAO, elle est capable de générer une semelle 100% personnalisée à sa foulée. Cette personnalisation grand public est prévue à l'horizon 2018 ... soit demain.

Chapitre 5 : La nouvelle organisation des processus Supply Chain

Ce cinquième chapitre est davantage un avis personnel sur les tendances et les perspectives sur l'impression 3D.

Soyons clair. Je parlerai bien entendu ici que de petites et moyennes séries. Si le produit vise un marché de plusieurs dizaines de millions de personnes et qu'il est tout à fait standardisé (grandes séries), les moules à injection restent encore la meilleure solution. Par contre, si l'objectif est de proposer une expérience unique, personnalisée et adaptée à chaque client, l'impression 3D va permettre de tirer les coûts vers le bas tout en court-circuitant le nombre d'intermédiaires.

Pour relever le défi du passage à l'impression 3D, les industriels vont devoir revoir toute leur organisation Supply Chain tant les conséquences pour eux sont importantes.

1. Les bonnes questions à se poser

Avant de se lancer dans l'aventure de la fabrication additive, les directeurs Supply Chain pour anticiper cette nouvelle technologie et modifier en conséquence leur organisation logistique devront se poser les bonnes questions.

La première d'entre elles, la plus basique mais sans doute la plus importante : « **Quelles sont parmi les pièces que je commercialise celles qui sont éligibles à l'impression 3D ?** ».

Cette question doit être étudiée à la fois d'un point de vue technique, financier mais aussi commercial.

Au niveau technique, on jugera de la faisabilité pour le matériau requis et de la possibilité de combiner plusieurs matériaux.

Au niveau financier, on mettra dans la balance la rentabilité de l'impression 3D en prenant en compte l'ensemble des coûts du produit (production, transport, logistique, ...) et celle de la production dite « traditionnelle ».

Enfin, au niveau commercial, dans la stratégie Achats (*cf cours du Master II de Natacha Tréhan*), on se penchera sur les véritables motivations et besoins des clients des industriels pour imprimer les objets en 3D : qualité, coût ou et délai ? Sachant qu'ils cherchent de plus en plus à se distinguer à la fois par les coûts et par la différenciation. L'occasion également de faire une analyse de la valeur ainsi qu'une analyse fonctionnelle du produit (nécessité pour cela d'un cahier des charges plutôt fonctionnel que technique). Une autre piste consiste à chercher d'éventuels matériaux de substitution, voire un nouveau design moins consommateur de matière. Il faudra alors idéalement travailler sur une re-conception à coûts objectifs pour le produit dans sa globalité.

Tout dépendra bien évidemment du type d'achat, fonction de l'engagement financier et du niveau de risque de l'entreprise : achats lourds, achats stratégiques, achats simples ou achats risqués.

Deuxième question : « **Suis-je suffisamment équipé pour me lancer dans l'impression 3D ?** »

Au-delà de l'aspect matériel avec l'acquisition de ces imprimantes et de l'investissement financier qui est requis vient le souci de formation des équipes. L'objectif est de maîtriser l'étendue des possibilités des imprimantes 3D, d'identifier les qualités et contraintes de leur usage, d'étudier la législation du numérique et d'être maître de la chaîne numérique : du scan 3D à l'impression 3D pour passer du réel au virtuel et du virtuel au réel.

Dernière question : « **Où positionner ces machines à répliquer en 3D pour être au plus près de la demande ?** »

Directement chez le fabricant ? Chez de nouveaux fournisseurs de proximité qui détiendraient des machines par matière ? Chez des prestataires de service type La Poste ? Directement chez le client ? La logique : plus on se rapprocherait du client, plus les flux logistiques se simplifieraient (réduits à la simple fourniture de matières premières) et les flux d'information se complexifieraient (envoyer le bon plan à la bonne machine, de manière sécurisée pour protéger les secrets de fabrication).

Je pense sincèrement que les services d'impression 3D en ligne de type Sculpteo vont être amenés à se développer largement en France, en Europe et Outre-Atlantique.

Quant à la localisation des imprimantes 3D, elle se positionnera soit directement chez l'industriel pour les grandes entreprises soit sur de grands centres régionaux pour les PME.

2. Le rôle des différents acteurs

Pour la construction de son organisation logistique, le Manager Supply Chain devra tenir compte des changements sur sa Logistique, ses Transports et les probables relocalisations qui suivront.

A. La logistique

Contrairement à ce qui ressort de nombreux articles racoleurs sur l'impression 3D, même si les besoins de stockage réduiront sensiblement, il sera bien entendu nécessaire de stocker les consommables qui permettront d'imprimer les objets.

Des enjeux importants : le marché des bobines plastiques par exemple représente 310 Millions de \$.



Bobines d'ABS



Poudre métallique

Selon moi, les nouveaux centres logistiques qui seront amenés à apparaître seront de deux types :

D'un côté des entrepôts de stockage classiques permettant d'entreposer les différents matériaux plastiques, métalliques ou céramiques. Pour le plastique, l'ABS par exemple, sera décliné en différents coloris, différentes longueurs et différentes qualités.

De l'autre verront le jour de grandes plateformes (centrales et régionales) proposant une offre complète : du stockage des différents matériaux à la mise à disposition de pièces détachées pour le remplacement des pièces défectueuses des imprimantes. Ce sera également des centres de production avec sur la place une série d'imprimantes 3D capables de répondre rapidement à la demande personnalisée des clients.

A noter que pour bénéficier de tarifs plus intéressants auprès des fournisseurs de matériaux, les industriels et leurs acheteurs seront amenés à se regrouper et à massifier ainsi leurs besoins.

B. Le transport

Les besoins en transport vont selon moi considérablement réduire avec le développement de l'impression 3D du fait de la baisse sensible des volumes de matières à déplacer. Il est fort à parier que les transporteurs qui vivent aujourd'hui des heures difficiles ne seront pas favorables à cette nouvelle technologie.

Si on prend le cas du transport routier par exemple, les difficultés conjoncturelles et les problèmes structurels sont bien présents (63 452 défaillances en 2013 soit + 5,3% par rapport à 2012). On peut donc s'attendre à une très forte résistance aux changements des transporteurs et un frein social important. A moins que cette technologie ne soit perçue comme une réelle opportunité : l'occasion de proposer des transports de courte distance entre les entrepôts de stockage classiques ou les grandes plateformes proposant des offres complètes.

Les municipalités, quant à elles, y verront davantage un intérêt puisque l'engorgement des villes ne sera plus qu'un lointain souvenir. Par ailleurs, l'emprunte carbone et la conscience écologique étant de plus en plus présents sur les grandes villes (Paris, Nantes et Toulouse pour ne citer qu'elles), l'engouement de l'impression 3D est amené à progresser. Un intérêt écologique qui s'accompagnera d'un réel gain économique.

C. Relocalisation en France et plus largement dans les pays d'origine

Je reste persuadé que la décision de délocaliser va être dans bien des cas remise en cause avec cette nouvelle technologie pour toute ou partie de la production du moins pour les petites et moyennes séries avec un nouveau concept : ***“Think global, make local”***.

En effet, dans certains cas (cf cours de Master II : El Mouhoub Mouhoud - Mondialisation et délocalisation des entreprises), la délocalisation est réversible : c'est la relocalisation. Au sens strict, la relocalisation est le retour dans le pays d'origine d'unités de production, d'assemblage ou de montage antérieurement délocalisées sous diverses formes dans des pays à faibles coûts salariaux.

Cette relocalisation se justifie largement par :

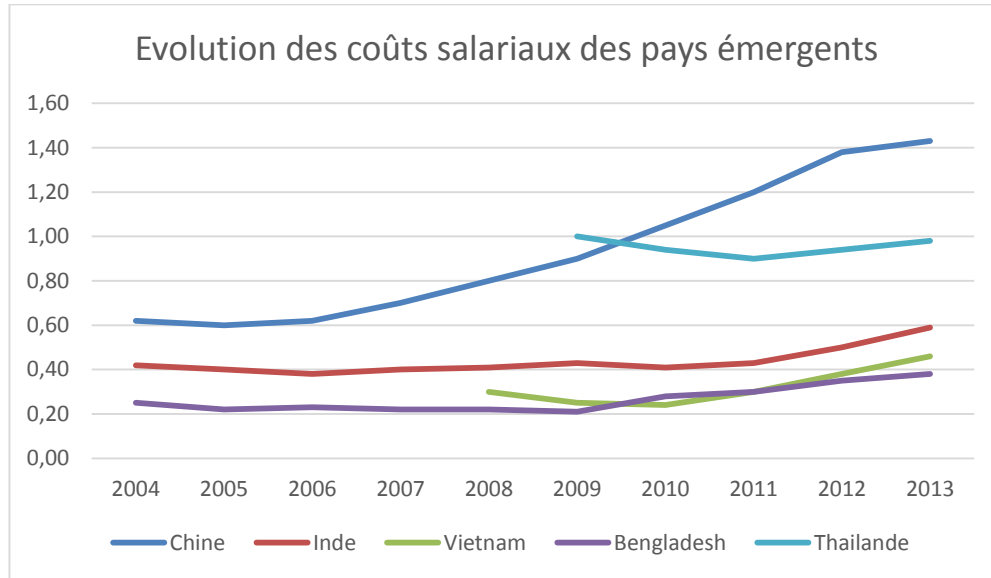
- la réduction des coûts de transport et de transaction,
- les imperfections des prestations délocalisées,
- les difficultés de compréhension entre les clients et les sites de production des pays à bas salaires,
- les écarts salariaux qui se réduisent entre pays développés et pays émergents,
- les problèmes de qualité des produits,
- les pertes importantes liées à la flexibilité et à la capacité à respecter les délais,
- les problèmes de disponibilité d'une main d'oeuvre qualifiée.

L'impression 3D, comme tout progrès technique permet de substituer le capital au travail, ce qui réduit la part relative de la main d'oeuvre dans la production et la part des coûts salariaux dans le coût total de la production. Cette part est passée par exemple dans l'électronique grand public de 30 % dans les années 1970 à moins de 2 % dans les années 2000.

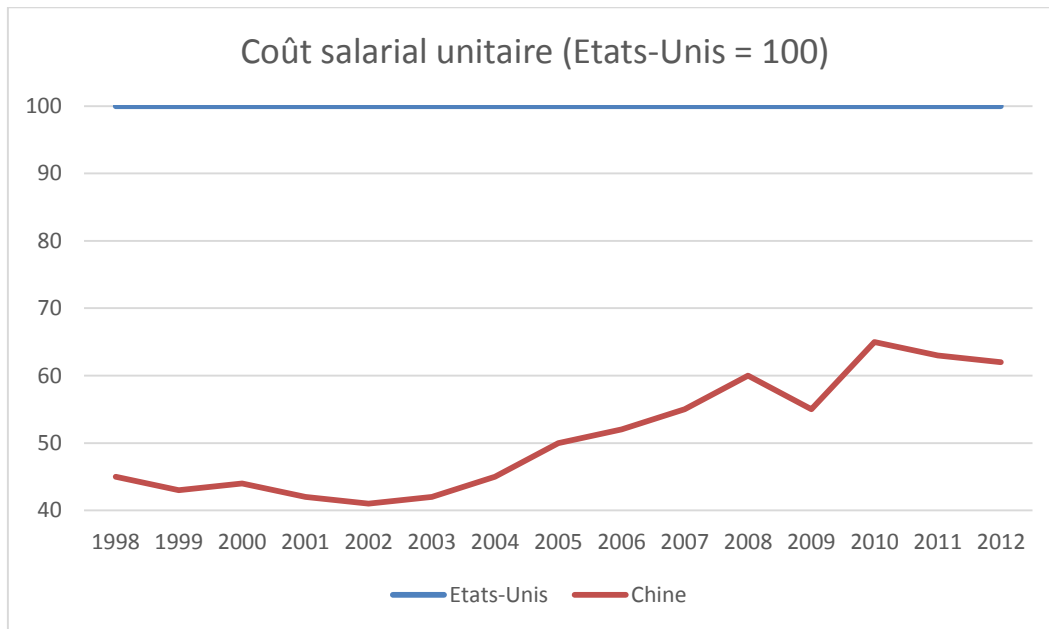
Une autre motivation moins louable des relocalisations consiste à bénéficier des mesures incitatives et des aides de l'Etat. Les aides attirent parfois des chasseurs de primes, des entreprises nomades et volatiles. Très nombreuses sont les entreprises qui empochent les aides et quittent le territoire à l'approche de la fin de la période d'exonération des charges sociales ou fiscales. En fait, les relocalisations pérennes sont liées à des motifs de compétitivité par l'innovation et non par les prix.

Même si les cas de relocalisation sont aujourd’hui marginaux par rapport à l’ampleur des mouvements de délocalisation, la situation devrait s’inverser dans les années à venir avec le développement de l’impression 3D.

Selon moi, une partie de la production devrait continuer à se faire en série dans les pays à faibles coûts de main d’oeuvre et une autre relocalisée pour la personnalisation et la différenciation retardée.



Hausse des coûts salariaux dans les pays émergents propice à la relocalisation



Réduction de l'écart du coût salarial entre Etats-Unis et Chine

Conclusion

Les imprimantes 3D évoluent très vite et leur généralisation future, par le biais des économies d'échelles abaissera demain sensiblement leur coût.

Chaque semaine, de nouveaux modèles d'imprimantes 3D naissent toujours plus sophistiquées.

De nouveaux matériaux voient le jour. L'impact sur l'économie va s'intensifier ...

Pour la Supply Chain, comme nous l'avons évoqué, la généralisation de cette nouvelle technologie va conduire en termes d'approche à des effets bénéfiques considérables :

- une importante réduction des coûts de transport maritime et aérien,
- une baisse significative des coûts de stockage,
- une capacité accrue de produire à la demande et de faciliter le réassortiment des articles proposés à la vente en fonction des seuls besoins,
- une énorme faculté à produire à l'unité des pièces adaptées aux goûts des clients,
- une production possible partout et surtout sur les lieux même de consommation, rendant vraisemblable le retour des usines délocalisées en Chine et dans les pays émergents et le développement d'un écosystème de marché de niche.

Pour continuer à progresser l'impression 3D devra relever de nombreux enjeux et défis : des limites inhérentes à la technologie (vitesse et qualité d'impression, disponibilité des matériaux, etc ...) à la difficile maîtrise des logiciels de modélisation 3D. Aujourd'hui, l'impression 3D est au même stade que les ordinateurs dans les années 1980 : dans ses balbutiements et accessible seulement à une petite partie de la population. Trente ans après, les progrès de la technologie ont été tels que l'ordinateur personnel est devenu un objet de notre quotidien. Si l'on ne peut pas encore prévoir que l'imprimante 3D suscitera le même engouement que le PC auprès du grand public, il est d'ores et déjà indéniable que cette technologie a une immense marge de progression et de nombreux atouts à faire valoir dans le futur.

Les caractéristiques d'une technologie de rupture, c'est souvent celle que personne ne voit arriver, ou que la portée est sous-estimée. L'impression 3D possède toutes les caractéristiques de ce genre d'innovation. La circulation extrêmement rapide de l'information permet aujourd'hui d'entrevoir les nombreux domaines d'application de l'impression 3D.

Avec ce mode de fabrication, c'est donc toute la Supply Chain qui va se trouver impacté avec cette nouvelle technologie : plus de droits de douane, moins de transport de marchandises, moins d'entrepôts de stockage nécessaires.

On peut donc parler de véritable révolution, au même titre que l'imprimerie au XV^{ème} siècle ou qu'Internet, beaucoup plus récemment. Ni plus ni moins ...

De là, à imaginer, une production de masse par l'impression 3D, on en est encore loin. Les deux systèmes sont amenés à cohabiter ensemble encore de nombreuses années ...

Attendez-vous donc à voir naître très bientôt des prestataires spécialistes dans l'impression 3D, prêts à reproduire à la demande, près de grands centres de consommation, toute une variété d'objets un outil de production industriel et performant.

L'impression 3D est un sujet passionnant. J'espère au moins avoir partagé avec vous mon enthousiasme pour ce sujet.

Remerciements

« Heureux qui comme Ulysse a fait un beau voyage » écrivait du Bellay. Ce mémoire, pour moi, fut un beau voyage, quelquefois semé d'embûches, mais dans lequel j'ai toujours trouvé de l'aide.

Je voudrais ici remercier toutes les personnes qui à travers leurs conseils, leur bonne humeur, leur patience et leurs attentions m'ont permis d'arriver au bout de ce périple.

En premier lieu, je souhaite remercier mon directeur de mémoire Pascal Devernay. Il a toujours été très disponible malgré son emploi du temps chargé. Il m'a également soutenu et encouragé dans les périodes de doute. Son suivi régulier et ses précieux conseils m'ont aidé tout au long de ma démarche.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements à Patrice Prely qui m'a fait l'honneur d'évaluer ce mémoire.

Merci aussi à toute l'équipe pédagogique du Master « Supply Chain International » de Paris Dauphine, d'une très grande qualité cette année encore.

Je voudrais remercier enfin toutes les personnes qui m'ont soutenu en dehors du travail.

Merci de tout mon cœur à ma femme qui m'a encouragé à me lancer dans ce Master. Toute cette aventure, elle l'a vécue à mes côtés et m'a toujours soutenu dans mes choix. Elle a su faire preuve d'une très grande patience. Merci Isa.

Merci à mes filles, Maëlys (7 ans) et Laura (11 ans) qui ont trouvé étrange au début de voir leur papa retourner à l'école et faire des devoirs soirs et week-ends.

J'espère leur avoir prouvé qu'à force de courage, de travail et de ténacité, on arrive toujours à l'objectif qu'on s'est fixé.

Merci enfin à mes parents (et en particulier à mon père pour la relecture de ce mémoire), mon frère et ma sœur pour le réconfort qu'ils m'ont apporté durant toute cette année de Master.

Sources, pour aller plus loin ...

Sites Web

- <http://future.arte.tv/fr/sujet/les-imprimantes-3d> : une première approche ludique de l'impression 3D
- <http://www.youtube.com/watch?v=alsFut9kWsM#t=80> : le zapping de l'imprimante 3D
- http://highflyer.eads.com/04_2013_efan_and_ethrust.html#article_0102 : l'impression 3D dans l'Aéronautique
- http://www.liberation.fr/economie/2012/10/01/l-impression-3d-nouvelle-revolution-industrielle_850035 : un article intéressant sur l'impression 3D dans Libération
- <http://industries-creatives.com/impression-3d-lere-de-la-personnalisation/> : un article à captivant à lire
- <http://www.larevue.info/science-sante/107-comment-l-impression-3d-va-tout-changer> : un article à ne pas rater sur l'impression 3D
- <http://fr.3dilla.com/>, LE site de référence de l'impression 3D
- <http://www.wcom.fr/> : un cabinet de conseil qui accompagne les sociétés vers le recours à l'impression 3D
- <http://www.pearl.fr/> : un site de vente des matériaux 3D
- <http://thingiverse.com> : un site qui vous aide à concevoir vos objets en 3D
- <http://www.shapeways.fr> : un site de service d'Impression 3D en ligne
- <http://wohlersassociates.com/> : LE site de référence sur le marché de l'Impression 3D
- <http://ckab.com> : l'expert de l'impression 3D individuelle depuis 2009
- <http://www.sculpteo.com/fr/> : un site de service d'Impression 3D en ligne
- <http://www.3trpd.co.uk/> : un site anglais sur l'impression 3D
- http://www.nike.com/fr/fr_fr/c/nikeid : le site de Nike et ses produits personnalisés
- <http://www.3ders.org/articles/20130523-wohlers-report-2013-reveals-growth-of-low-cost-3d-printers-cools-significantly.html> : l'impression 3D en chiffres
- <http://www.thekase.com/EN/site/index.html> : le site officiel de Thekase
- <http://blog.coomcoom.com> : un blog sur l'impression 3D, mise à jour régulière

Entretiens téléphoniques – Interviews – Contacts

Benjamin LAVERGNE : Créateur de la société 3Dilla.com

Benjamin FARAGGI : Société de conseil pour le déploiement de la 3D dans les entreprises

Mathilde BERCHON : Auteure de l'ouvrage « L'impression 3D »

Clément MOREAU : Directeur général de la société Sculptéo

Romain POUZOL : Responsable Impression 3D chez CKAB

EI MOUHOUB MOUHOUD : Professeur d'économie à Paris Dauphine, spécialiste de la Mondialisation et de la Délocalisation des Entreprises

Guillaume RIOTTOT : Ancien collègue chez Kodak. Etudiant réalisant une thèse sur le développement d'un service d'impression 3D pour un imprimeur.

Repères bibliographiques

« L'impression 3D » de Mathilde Berchon – Librairie Eyrolles – Sorti en août 2013 - Premier livre français sur l'impression 3D

« Industrialisation des produits mécaniques », volume 3 de C. Marty et J.M. Linarès - Editions Hermès

« Mass customization, the new frontier in business competition » de B. Pine et S. Davis – Harvard Business Press

« Assembly system design and operations for product variety » de Hu et Al. – CIRP Annuals – Manufacturing Technology

« L'imprimante 3D, une révolution en marche » de Benjamin et Mathieu Lavergne - Editions Favre - Sorti en janvier 2014

« Mondialisation et délocalisation des entreprises » d'El Mouhoub Mohoud - La découverte - 4^{ème} édition

« Impression 3D, merveille ou menace ? » - Supply Chain Magazine – mai 2014, pages 84 à 87

« Les pièces de rechange et la révolution 3D » - Supply Chain Magazine – juillet / août 2014