

Impression 3D

La voie ouverte à la fabrication open source

Thierry HENOCQUE

AIP Primeca Dauphiné-savoie
1 rue de l'adresse
38000 Grenoble

Résumé

Les techniques traditionnelles de prototypage rapide, peu adaptées à la réalisation de pièces de petite taille, ont évolué vers des méthodes de fabrication additive que l'on regroupe sous le terme générique d'imprimantes 3D.

Ces imprimantes, inadaptées à la production de masse, s'avèrent toutefois très compétitives dans la production de pièces uniques (ou sur mesure). Elles sont actuellement en pleine expansion dans les domaines de l'orthopédie, de l'aéronautique et de la bijouterie.

Les procédés de fabrication additive mettent en jeu des matériaux de plus en plus variés avec des techniques d'agrégation ou de solidification variables en fonction de la précision attendue ou des propriétés de la matière première.

Longtemps réservées aux professionnels du prototypage, certaines de ces techniques se sont démocratisées grâce au projet open-source « RepRap » particulièrement dynamique. Le modèle de licence GPL utilisé par celui-ci a eu pour conséquence une optimisation rapide des coûts et des contraintes de fabrication de ces imprimantes. L'expansion de la communauté, qui s'accompagne de la mise en place de nombreux « Fab lab », a eu pour conséquence une diversification des projets associés, utilisant de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques d'impressions.

L'impact de cette avancée socio-technologique sur le développement de la mécanique open-source va beaucoup plus loin que la conception d'imprimantes ou la distribution de modèles 3D de pièces prêtes à imprimer. Les compétences acquises lors du montage de sa propre imprimante permettent facilement de concevoir par soi-même d'autres machines car c'est toute la chaîne de contrôle commande et de pilotage des moteurs qui est alors maîtrisée.

Mots-clefs

Imprimante 3D, mécanique open-source, fabrication additive, FDM, SLS, GPL, RepRap, Arduino, Raspberry-Pi, fab lab.

1 Introduction

Le modèle open-source, appliqué à l'informatique, a montré sa capacité de développement notamment grâce au système de licence GPL qui, par son principe d'accord sur le retour vers la communauté des améliorations apportées, garantit une vitesse d'évolution proportionnelle à la dimension de la communauté intéressée.

Des projets de matériel open-source, par transposition du modèle à des produits palpables, ont récemment vu le jour. On peut mentionner en particulier l'apparition d'ordinateurs avec le projet « Raspberry-Pi », de cartes-contrôleur avec le projet « Arduino » et des imprimantes tridimensionnelles, avec (entre autres) le projet « RepRap » initié à l'Université de Bath sous la forme d'un Wiki.

Cet article va présenter une liste non exhaustive des différentes technologies d'impression 3D disponibles sur le marché, analyser ensuite ce que les projets « RepRap » et « Arduino » ont apporté à ces technologies, et enfin analyser l'impact de leur démocratisation sur la capacité de fabrication individuelle et collective.

2 Technologies d'impression 3D

Les différentes technologies peuvent être classées en quatre catégories principales en fonction de la consistance du matériau de base.

2.1 Construction par assemblage de couches usinées

Les techniques traditionnelles de prototypage par usinage et traitement manuel des surfaces étaient devenues prohibitives du fait des coûts des matières et de la main d'œuvre qu'elles nécessitaient. Elles ont de surcroît perdu de leur intérêt à l'époque du développement du prototypage virtuel. Des techniques de fabrication additive se sont alors développées pour compenser ces problèmes de coûts de production. Les travaux du CIRTES¹ dans le domaine ont apporté une technique révolutionnaire consistant à usiner le modèle préalable décomposé en couches dans des planches d'épaisseur fixes et de les réassembler ensuite pour reconstituer le modèle 3D. Cette technique diminue considérablement les pertes de matière première. La simplification du processus apportée par le découpage de couches permet d'utiliser des machines beaucoup moins onéreuses et supprime un grand nombre de contraintes d'usinage. Cette technique est dite de « prototypage rapide », les temps de main d'œuvre et d'usinage nécessaires pour passer du modèle numérique à la maquette finie étant particulièrement courts.

La notion de division du modèle en couche fines, nommée ALM², est en fait la base de la fabrication additive utilisée dans presque toutes les technologies d'impression 3D aujourd'hui.

Quelques modèles d'imprimantes 3D ont utilisé au début une technique consistant à déposer une feuille de plastique, à la découper avec un laser et à la coller à la précédente par chauffage. Ces machines n'ont pas eu le succès escompté, produisant des objets fragiles, monochromes et occasionnant des pertes en matière première finalement plus importantes que par un simple usinage.

2.2 Construction par dépôt de matière

Les techniques par dépôt de matière sont aujourd'hui les plus répandues. Parmi elles, la FDM³ consiste à déposer un fil de matière fondue en couche successive (le plus souvent des matières plastiques de type ABS⁴ ou PLA⁵) en laissant à la matière le temps de se solidifier. En fait, cette technique est maintenant de plus en plus dérivée par le dépôt de matériaux bi-composants qui polymérisent au moment de leur mélange, ou durcissent au contact de l'air. Quelques projets remarquables comme l'imprimante à béton qui construit des maisons ou les imprimantes à usage culinaire qui déposent les ingrédients destinés à confectionner tout type de plat. On trouve aussi des machines qui déposent du métal fondu avec des techniques qui s'apparentent à la soudure à l'arc ou à la brasure.

2.3 Construction par solidification de poudres

Une autre méthode, également répandue, consiste à déposer dans une cuve, une couche uniforme de poudre qui est ensuite solidifiée, soit par fusion localisée, soit par l'ajout d'un composant. On trouve dans cette catégorie des imprimantes de type jet d'encre qui projettent un liant coloré dans un matériau proche du plâtre. C'est aussi dans cette catégorie que l'on trouve les imprimantes professionnelles les plus attractives, en termes de matériaux, utilisant un rayon laser (SLS⁶) ou un faisceau d'électron (EBM⁷) pour respectivement souder ou fusionner localement la poudre. A noter aussi l'imprimante « solar sinter », conçue par Markus Kayser, et utilisant l'énergie solaire pour vitrifier du sable dans le désert.

¹ <http://www.cirtes.com/>

² ALM : Additive Layer Manufacturing (fabrication par assemblage de couches) ;

³ FDM : Fused Deposition Modeling (modelage par dépôt de matière fondue)

⁴ ABS : L'acrylonitrile butadiène styrène

⁵ PLA : Acide polylactique (polymère biodégradable) et PLLA : Acide L-polylactique (polymère biodégradable biocompatible)

⁶ SLS : Selective Laser Sintering

⁷ EBM : Electron Beam Melting (fusion par faisceau d'électron)

2.4 Construction par photo polymérisation

La base de ces technologies consiste à éclairer localement une résine photosensible pour la faire polymériser. On trouve dans cette catégorie des techniques qui fonctionnent par couche successives de type FTI⁸ ou SLA⁹, mais aussi des techniques basées sur la focalisation de faisceaux lasers, permettant de réaliser dans une goutte de résine des impressions de dimension nanométriques observables qu'au travers de microscopes électroniques.

2.5 Avantages et inconvénients des technologies d'impression 3D

Les technologies d'impression 3D offrent la possibilité de construire des pièces qu'il n'est pas possible de réaliser par usinage ou par moulage. Elles permettent en outre d'économiser beaucoup de matière première en n'utilisant que le strict minimum pour construire la pièce et ne nécessitent généralement que très peu de main d'œuvre, les rendant particulièrement compétitives pour une production de petites quantités ou utilisant des matières à haute valeur ajoutée (telle que le titane). Elles offrent également la possibilité de valider et d'exploiter les travaux anciens sur l'optimisation des structures en fonction des contraintes de résistance des matériaux. Enfin, elles permettent de fabriquer des assemblages de plusieurs pièces en une seule passe, mécaniquement fonctionnelles ...et indémontables.

Les systèmes multi-composants se développent via un dépôt sélectif contrôlé des matériaux, permettant par exemple de fabriquer en une seule pièce, un couvercle rigide avec son joint souple directement intégré à la matière qui le constitue.

L'inconvénient majeur reste le fait qu'une pièce, en fonction de sa géométrie, n'est pas forcément imprimable par n'importe quelle technologie, et qu'il y a souvent, de surcroît, des supports de construction à gérer qui peuvent nécessiter l'usage d'une technologie spécifique à son impression.

Une imprimante donnée est souvent associée un nombre très réduit de matériaux utilisables et les imprimantes domestiques ne proposent, pour l'instant, que des matériaux plastiques aux caractéristiques mécaniques limitées.

3 Le modèle open-source « RepRap »

3.1 Objectif

Le projet, dont le nom vient de l'abréviation du terme anglais « **R**eplication **R**apid prototyper » a été initié par l'Université de Bath, en Angleterre, en 2005. Il est né de la volonté de créer une imprimante tridimensionnelle, libre et sous licence GPL.

Fortement inspiré du projet « Fab@home », il apporte en plus la notion d'autoréplication partant du postulat que la majeure partie des pièces la constituant doivent pouvoir être fabriquées ...par l'imprimante elle-même !

3.2 Plan et pièces nécessaires

Pour la partie mécanique, tous les plans des très nombreux modèles sont distribués via un *wiki*. Ils sont libres, sans brevet et sous licence GPL, ce qui fait que les améliorations de conception peuvent faire l'objet d'update hardware. La structure des imprimantes est réalisée à partir de composants simples que l'on trouve dans tous les magasins de bricolage. Un des intérêts majeurs de la licence GPL, est qu'il tend à optimiser le rapport qualité/prix de ces éléments. Certaines pièces (extrudeur, moteurs pas-à-pas, etc.) constituent toutefois la partie la plus délicate mais font l'objet de nombreux sites dédiés de vente sur internet. La partie alimentation électrique est souvent réalisée avec une vieille alimentation d'ordinateurs, mais peut nécessiter une alimentation électrique plus puissante pour les modèles haut de gamme munis d'un plateau chauffant et de ventilateurs pour refroidir les cartes électroniques et les pièces en construction.

3.3 Cartes de contrôle-commande

La partie pilotes et cartes de contrôle-commande est réalisée à partir d'une plateforme de prototypage électronique *open source* de type « Arduino ». Il s'agit d'une carte microcontrôleur, modulable, avec un très grand choix de pilotes,

⁸ FTI : Film Transfer Imaging

⁹ SLA : StéréolithographieApparatus

facile à configurer et à programmer. Ce système, sous licence *creative common*, est de plus en plus utilisé dans le domaine du prototypage industriel pour sa simplicité, sa souplesse d'utilisation et ses capacités variées de contrôle et de commandes. En apportant aussi simplement l'intelligence nécessaire au contrôle et à l'animation de tout système mécanique, il constitue la clé de voute du développement de la mécatronique domestique.

3.4 Logiciels

Les logiciels nécessaires pour passer d'un modèle physique ou d'un modèle tridimensionnel à l'objet imprimé peuvent être séparés en trois tâches.

3.4.1 Génération du modèle numérique tridimensionnel

Le modèle numérique peut être obtenu directement par conception assistée par ordinateur ou par numérisation d'un objet réel.

Conception assistée par ordinateur

Il existe quelques logiciels de conception assistée par ordinateurs open source ou libres (*Blender*, *FreeCAD*, *Open SCAD*) mais ce domaine reste le plus délicat à appréhender. Rarement intuitifs, ils ont été conçus pour être adaptés à l'usinage et n'intègrent pas les notions propres à la fabrication additive d'optimisation de la matière dans la construction de la pièce. Toutefois, le format de fichier AMF¹⁰ se développe pour pallier ces lacunes. Trop jeune toutefois, il n'est pas encore assez répandu pour être réellement utilisable.

Numérisation d'un objet réel

Autrefois réservée aux professionnels et nécessitant du matériel et des logiciels très onéreux, la numérisation tridimensionnelle est désormais à la portée de tous avec des solutions *open source* originales utilisant des capteurs de type *Kinect*, la reconnaissance d'images basée sur le couple webcam et *open-cv*, ou encore la photogrammétrie¹¹.

Les modèles ainsi numérisés (après quelques correctifs à la marge) sont directement exploitables sur une imprimante 3D.

Formats d'échange

Il existe un très grand nombre de format de fichier de description d'objet 3D. Pour l'instant toutefois, il n'existe pas de logiciel intégrant une fonction du type « print3D » pour passer directement de la conception à l'objet imprimé. Les formats d'échange sont peu nombreux et les solutions d'impression *open source* n'implémentent généralement que le format STL¹². Celui-ci est basé une triangulation de la surface extérieure du modèle. Quelle que soit l'origine du modèle (numérisation ou conception), le fichier STL doit être vérifié et corrigé (avec *MeshLab*, *MiniMagics* ou *Netfabb Studio*, etc.) pour être utilisable, car il comporte généralement des trous, des triangles inversés, superposés ou intersectés.

3.4.2 Génération du programme d'impression

La génération du code-G commence par l'ajout de supports destinés à la construction du modèle, si sa structure le nécessite. Il est ensuite découpé en tranches fines et, pour chaque strate, le programme calcule le parcours de l'extrudeur pour déposer aux endroits voulus le plastique fondu. Bien que ces trois opérations puissent théoriquement être réalisées indépendamment, plusieurs programmes *open source* (*slic3r*, *RepRapHost*) réalisant ses trois opérations sont disponibles.

3.4.3 Firmware et pilotage de l'imprimante

Le programme de pilotage de l'imprimante par la carte de commande est livré en *open source*. Il peut être modifié via l'environnement de développement dans un langage proche du C et doit être adapté aux caractéristiques techniques du modèle fabriqué.

¹⁰ AMF : Additive Manufacturing File (standardisé en 2011 ASTM F2915)

¹¹ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Photogramme>

¹² STL : StereoLithography Interface Specification, 3D Systems, Inc., October 1989

Le principe d'impression est basé sur l'envoi à l'imprimante d'un programme en langage G-Code utilisé par la quasi-totalité des machines à commandes numériques. Ce langage a été normalisé (ISO6983) en 1980, signifiant que n'importe quel outil professionnel de FAO¹³ pourrait potentiellement être utilisé pour calculer le parcours de l'extrudeur. Ils ont été conçus historiquement pour enlever de la matière à partir de calculs de trajectoire d'outils, mais les éditeurs du domaine ne sont pas insensibles au marché en cours de développement.

Plusieurs programmes *open source* (*Repetier-Host*, *SkeinForge*) intègrent la partie commande manuelle et contrôle de l'imprimante nécessaire aux opérations de réglage, de mise en route et d'envoi du programme d'impression.

3.5 Acquisition de compétences

Le fait de construire soi-même sa propre imprimante favorise le développement d'un ensemble de compétences en mécanique et en mécatronique. L'effet immédiat est qu'une personne s'inscrivant dans cette démarche, peut aisément extrapoler et utiliser ses compétences, acquises éventuellement dans d'autres domaines. On peut envisager alors de fabriquer d'autres machines à commandes numériques (centre d'usinage, tours numériques, robots) en fonction de ses besoins, mais aussi de remettre à neuf des appareils électro-ménagers (lave-linge, cafetière, robot ménager) dont le programmeur, par exemple, est hors d'usage.

Cette mouvance est largement entretenue par l'émergence des *fab labs* ou « laboratoires ouverts », qui sont des lieux publics, dans lesquels on peut utiliser et apprendre à fabriquer (entre autres) des imprimantes 3D.

4 La mécanique *open source*

4.1 Protection par brevets

Le système de protection de propriété intellectuelle le plus utilisé en mécanique est le système du brevet qui protège l'inventeur de la commercialisation par un tiers de son invention. Un brevet nécessite le dépôt et la publication des plans et de tous les éléments nécessaires à la compréhension du mécanisme protégé. Ainsi, le fait de déposer un brevet implique forcément la publication des sources. Il serait donc plus judicieux de parler de mécanique *libre de droits* que de mécanique *open source*.

4.2 Cas particulier de la fabrication individuelle

Toutefois, il n'est absolument pas interdit de fabriquer, pour son propre usage, un système breveté. C'est la commercialisation de l'objet induit qui est règlementée. Le fait de fabriquer par soi-même et pour son propre usage a toujours été libre. La grande évolution vient donc du fait qu'il va maintenant être possible de se fabriquer des objets brevetés ou non. Mais, seuls les objets libres de droits pourront être commercialisés.

4.3 Partage de concepts et de plans

L'apport flagrant de la licence GPL sur le développement des modèles d'imprimantes libres a porté sur l'optimisation des coûts de fabrication, par des choix d'architectures et de mécanismes. Il s'exprime par un ensemble de plans et de concepts partagés sur un wiki ou un forum utilisé comme plateforme collaborative.

La communauté étant principalement composée d'informaticiens, d'électroniciens et de mécaniciens, les solutions proposées sont souvent originales, plus simples mais néanmoins fonctionnelles, que celles qui auraient pu être proposées par des mécaniciens de formation.

Toutefois, les difficultés de création par conception ou par numérisation des modèles 3D sont encore bien réelles, favorisant en cela le partage de modèles réalisés par (et avec) la communauté.

¹³ FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur

5 Conclusion

L'impression 3D est en pleine expansion au niveau industriel. Elle s'explique par le gain en productivité et les avantages économiques induits lors de la production de petites quantités ou de pièces très complexes. On observe donc une forte augmentation des parts de marchés associées à ces technologies.

Parallèlement, elle se démocratise par le biais de projets *open source* qui ont ouvert la voie à des imprimantes à très bas prix, aux possibilités de fabrication individuelle totalement inédites. L'émergence des *fab labs*, lieux où on peut apprendre, échanger et fabriquer (entre-autres) des imprimantes 3D, a notablement contribué à ce processus de démocratisation.

Aujourd'hui, ces capacités de production domestiques vont beaucoup plus loin que le simple fait de fabriquer quelques pièces en plastique avec son imprimante car les compétences acquises par le biais de sa fabrication permettent d'envisager de fabriquer beaucoup d'autres mécanismes commandés et motorisés.

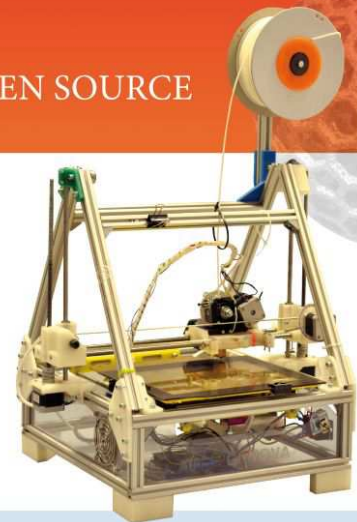
La communauté qui s'est créée autour de ce projet est un moteur et un catalyseur pour la création de nombreux autres projets de mécanique et de mécatronique dite *open source*, libres de droits et à bas prix de revient. Il devrait en résulter un accroissement très rapide des possibilités de fabrication domestique.

IMPRESSION 3D

LA VOIE OUVERTE À LA FABRICATION OPEN SOURCE

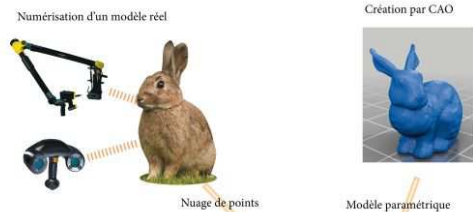


Les imprimantes 3D RepRap sont des machines auto-répliquantes qui fabriquent leurs propres pièces.



PROCESSUS D'IMPRESSION

Génération du modèle numérique tridimensionnel



Conversion en modèle imprimable

Nuages de points et modèles paramétriques doivent être convertis en modèles surfaciques fermés (STL) pour être réutilisés par les imprimantes.

Sites de partage de modèles

Pas toujours open source, certains sites s'approprient les fichiers déposés.

Génération du programme d'impression

Après l'ajout de géométries pour supporter les parties surplombantes, on découpe le modèle en tranches et pour chaque couche, on calcule la trajectoire de la buse pour générer le programme d'impression en code-G

Impression du modèle

Le programme est envoyé à l'imprimante qui l'exécute.

Pour un coût très réduit, on peut imprimer chez soi toute sorte de pièce en plastique, ce qui introduit la notion de fabrication distribuée, déporté directement chez le client.

FABLAB ET LABORATOIRES OUVERTS

Des lieux ouverts au public où l'on peut fabriquer, innover, échanger des connaissances, des compétences et des idées.



MÉCANIQUE OPEN SOURCE

Les compétences associées acquises lors de la construction d'une imprimante permettent d'extrapoler dans des domaines variés, de construire tout sorte de machines à commande numérique, et même des robots.



Les cartes open source ARDUINO, destinées au prototypage électronique constituent la base du contrôle commande des systèmes open source.

La structure de Poppy, le robot humanoïde open source est fabriquée par une imprimante 3D et utilise des technologies similaires de motorisation et de contrôle commande.



Rejoignez-nous pour une démonstration jeudi toute la journée à la cabine photo3D, à côté de la salle serveur TIBERIADE.

