

licence publique générale GNU, comme un logiciel libre. Autrement dit, tout utilisateur est autorisé à la reproduire, à la modifier et même à la commercialiser.

Une vaste communauté internationale de passionnés s'est rapidement rassemblée autour du projet *RepRap* (pour *Replicating Rapid Prototyper*, prototypeur rapide et répliquatif) et des centaines de versions plus évoluées ont vu le jour. La *RepRap Prusa Mendel*, du nom de son contributeur tchèque Josef Průša, est l'une des plus populaires. Des particuliers se réunissent dans des endroits tels que les «hackerspaces» – des lieux où passionnés d'informatique se rencontrent pour apprendre et créer ensemble – et construisent leurs propres imprimantes 3D.

Matériel libre ou projets commerciaux

De nombreux projets commerciaux sont nés du projet *RepRap*. Par exemple, en 2009, au sein du hackerspace NYC *Resistor* à New York, un groupe d'amis a modifié et amélioré leur *RepRap* jusqu'à créer une variante, qu'ils nommèrent *MakerBot Cupcake*. Ils décidèrent de vendre leur modèle sous la forme d'un kit à assembler soi-même. La *MakerBot* a remporté un franc succès auprès d'un public de créateurs, d'ingénieurs et

■ L'AUTEUR



Mathilde BERCHON est consultante spécialisée en fabrication numérique et en matériel libre de droits. Vivant à San Francisco, aux États-Unis, elle a fondé le blog et podcast *MakingSociety.com*, destiné aux entrepreneurs de ce domaine.

■ À ÉCOUTER

Le jeudi 20 février 2014, de 14h à 15h, Mathilde Berchon reviendra sur le développement de l'impression 3D dans la partie Actualités de l'émission **La marche des sciences**, sur *France Culture*.
www.franceculture.com

de bricoleurs chevronnés. L'entreprise *MakerBot*, depuis fusionnée avec *Stratasys*, était ainsi lancée, et avec elle l'idée d'une imprimante 3D dans chaque foyer.

La technique d'impression 3D par dépôt successif de matière ne se limite pas au plastique. Suivant le même principe de la tête d'impression qui extrude la matière et la dépose sur un plateau, des chercheurs mettent au point des imprimantes 3D capables d'imprimer des cellules vivantes. Les imprimantes 3D de la société californienne *Organovo* impriment ainsi des tissus humains utilisés pour la recherche pharmaceutique : les cellules sont déposées sur un gel (imprimé simultanément) par une seringue qui se déplace horizontalement.

Par des méthodes analogues, l'Institut Wake Forest de médecine régénérative, aux États-Unis, a réalisé des prototypes d'un rein, d'une oreille ou d'un os de la main. Ces organes ne sont cependant pas fonctionnels et ne peuvent donc pas encore être implantés. L'un des grands défis est la précision de l'impression : il faut pouvoir reproduire les réseaux de vaisseaux qui irriguent l'organe et lui permettent de vivre.

Le même principe du dépôt par seringue a été utilisé pour le dépôt de matière alimentaire. Fromage, pâte à pizza,

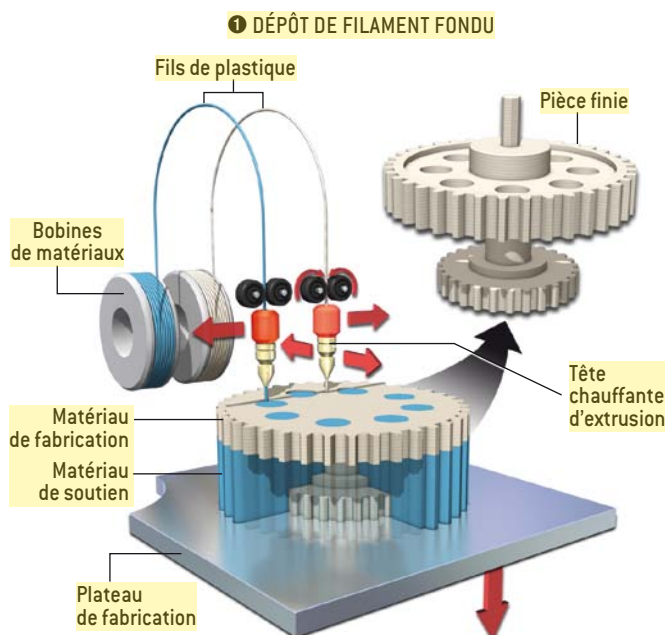
IMPRIMER EN TROIS DIMENSIONS : TROIS

Les techniques existantes d'impression en trois dimensions se regroupent en trois principales familles, chacune fondée sur un principe différent. Dans tous les cas, l'objet est fabriqué couche par couche.

Dans les techniques de dépôt de filament fondu ❶, un fil de plastique passe dans un dispositif à roues commandé par ordinateur et qui alimente une tête chauffante d'extrusion. Le fil, aminci en un filament et fondu, se dépose sur le support et se solidifie. Le balayage horizontal des têtes d'extrusion permet de former une couche de l'objet à fabriquer. On passe aux couches suivantes grâce à un déplacement vertical des têtes d'extrusion ou du plateau.

Dans les techniques fondées sur la photopolymérisation ❷, l'objet est fabriqué par polymérisation (donc solidification) locale, grâce à un faisceau lumineux convenablement dirigé, d'une résine liquide. Dans certains dispositifs, un balai assure, pour chaque pas vertical, l'étalement d'une couche uniforme de résine liquide.

Dans les techniques de frittage par laser ❸, les particules de poudre sont localement fusionnées ou collées, sous l'action d'un rayon laser puissant. Chaque couche de poudre est étalée par un rouleau.

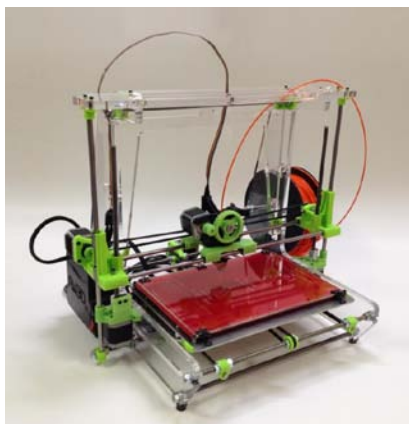


chocolat, etc. peuvent ainsi être déposés couche après couche pour constituer un produit comestible, avec la forme que l'on désire.

Polymériser un liquide avec un faisceau laser

Dans une deuxième famille de techniques d'impression 3D, la matière est déposée sous forme liquide et solidifiée par l'action d'un rayon lumineux. La stéréolithographie est la technique la plus ancienne ; c'est aussi la plus précise. Elle a été brevetée en 1984 par un ingénieur américain du nom de Chuck Hulls, désormais à la tête de *3D Systems*, la plus grande entreprise au monde spécialisée dans l'impression 3D. La stéréolithographie fait appel à un faisceau laser ultraviolet qui vient polymériser et, ainsi, solidifier une substance liquide photosensible. À chaque passage du rayon sur le lit d'impression, couche après couche, le liquide se transforme en résine solide jusqu'à former l'objet dans son ensemble.

Il existe de nombreuses variantes de cette technique. Citons la DLP (*Digital Light Processing*, traitement numérique de la lumière), où la lumière est balayée sur le bain de polymère grâce à une puce de haute définition contenant un très grand nombre de miroirs microscopiques (des



© Airwolf 3D



© Objet

2. LES IMPRIMANTES 3D PROPOSÉES aujourd'hui sur le marché vont des imprimantes personnelles utilisant la technique du dépôt de filament fondu (*en haut*), vendues pour quelques centaines à quelques milliers d'euros, aux imprimantes industrielles (*en bas*), beaucoup plus onéreuses mais de performances très supérieures.

puces similaires équipent les projecteurs puissants utilisés en salles de conférence). Elle est exploitée notamment par l'entreprise allemande *EnvisionTEC*, réputée pour la précision de ses impressions (de l'ordre de 15 micromètres par couche).

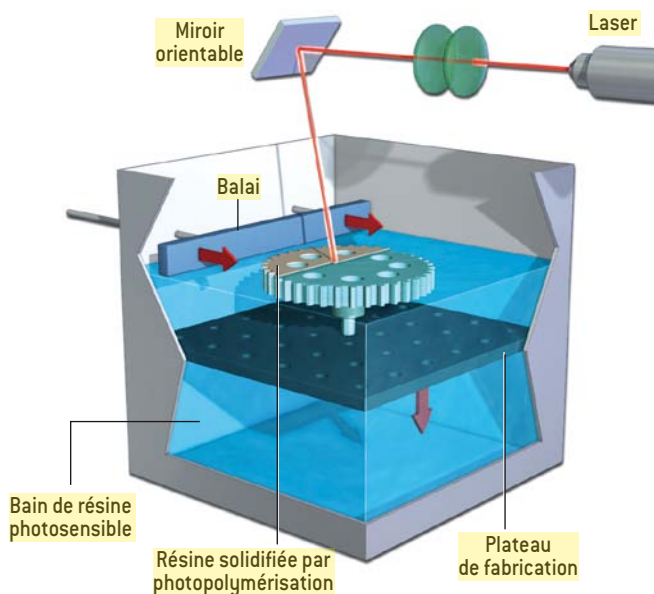
Citons aussi la technique *PolyJet*, apparentée à l'impression classique par jets d'encre. Elle a été développée par l'entreprise israélienne *Objet*, qui a fusionné en 2012 avec l'américain *Stratasys*, l'autre géant de l'impression 3D. Le procédé *PolyJet* permet d'imprimer plusieurs plastiques aux propriétés différentes (flexibles ou non, transparents ou non, résistants à la chaleur, etc.) au sein d'un même objet, au cours d'une même impression.

Résolution : quelques dizaines de micromètres

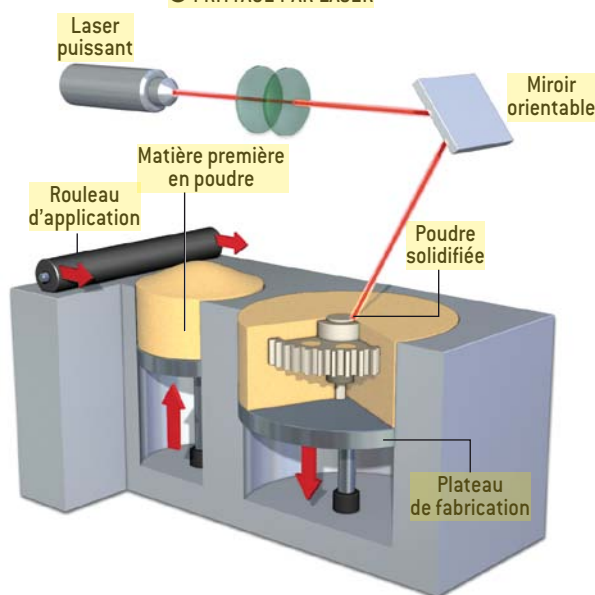
La qualité d'une impression 3D dépend de plusieurs paramètres, en particulier la résolution et l'épaisseur de couche. La résolution s'exprime souvent en points par pouce (dpi, pour *dots per inch*) et correspond au nombre de particules de matière que la machine est capable de déposer par unité de surface. Il s'agit donc, en général, de la résolution horizontale. La résolution verticale est l'épaisseur de couche, mesurée en micromètres ou en millimètres.

GRANDES FAMILLES DE TECHNIQUES

② STÉRÉOLITHOGRAPHIE



③ FRITTAGE PAR LASER



Bruno Bourgeois

Les techniques de stéréolithographie, DLP ou *PolyJet* ont des résolutions pouvant atteindre quelques dizaines de micromètres, voire moins, et conviennent ainsi à la réalisation de prototypes de grande qualité, reproduisant les fonctionnalités de l'objet au plus près de la vision de l'ingénieur ou du designer industriel. Elles sont très utilisées par les studios de design ou les laboratoires de recherche et développement de grandes entreprises de biens de consommation, telles *Nike* ou *Adidas*.

Ces techniques de fabrication par photopolymérisation sont aussi employées dans des domaines qui se sont pleinement emparés de l'impression 3D, telles l'industrie des prothèses dentaires, la bijouterie de luxe et l'industrie des aides auditives. Les constructeurs développent des imprimantes 3D spécialisées pour ces corps de métier, capables d'imprimer en résine ou à la cire perdue des modèles sur mesure, rapidement et avec une grande précision. Le cinéma utilise aussi la technique *PolyJet* pour la réalisation d'effets spéciaux et d'accessoires. Ainsi, le costume d'*Iron Man* a été imprimé en résine aux mesures de l'acteur Robert Downey Jr., puis peint pour lui donner un aspect métallisé réaliste.

Les imprimantes stéréolithographiques ont de bien meilleures performances que les imprimantes à dépôt de filament fondu, mais elles sont aussi plus coûteuses, à l'achat comme en matières premières. Cependant, grâce à l'arrivée sur le marché de jeunes entreprises telles que *FormLabs*, issue du MIT, il est possible aujourd'hui de se procurer une petite imprimante stéréolithographique de bureau pour moins de 3000 euros. Les modèles professionnels coûtent, eux, de l'ordre de plusieurs dizaines, voire centaines, de milliers d'euros.

Dans la troisième famille de techniques d'impression 3D, on procède par fusion progressive de particules de matière réduite en poudre. Pour fusionner les particules, il existe divers procédés. Le frittage par laser, ou SLS (*Selective Laser Sintering*) est l'un des principaux. Il consiste à utiliser un faisceau laser puissant pour échauffer localement la poudre et ainsi faire fusionner ses particules, couche après couche. C'est la technique privilégiée par les cabinets d'architecture pour la construction de maquettes, par les artistes et les designers pour la création de sculptures complexes, ou par le secteur de la mode pour la réalisation de pièces sur mesure (chapeaux, mailles). On l'utilise



© Shapeways



© Scripps Research Institute



© LayerWise



© Objet

3. LES DOMAINES D'APPLICATION de l'impression 3D sont aujourd'hui nombreux. Outre la réalisation de prototypes pour l'industrie, on peut citer l'architecture (a, une maquette de pont), l'enseignement et la recherche (b, un modèle moléculaire de la porine), la médecine (c, une mâchoire inférieure qui a été implantée chez une personne âgée de 83 ans), le cinéma (d, un élément de l'armure d'*Iron Man*, réalisée sur mesure), la bijouterie, la dentisterie, le design, etc.

aussi de plus en plus pour fabriquer des pièces finies (boîtiers, coques de téléphone, mécanismes, etc.).

Les imprimantes à frittage par laser sont de grande taille et coûtent plusieurs centaines de milliers d'euros. Elles équipent principalement les services de recherche et développement de grandes entreprises et certains sites de production. Il est cependant possible d'y avoir accès grâce aux services d'impression 3D en ligne qui s'adressent à la fois aux particuliers et aux professionnels.

Le principal avantage du frittage de poudre est d'offrir un choix très vaste de matériaux d'impression. Dès lors que le matériau peut être réduit en poudre homogène, son impression 3D est envisageable.

Imprimer avec du métal est possible

Le matériau le plus courant est le polyamide, avec lequel on réalise des prototypes et des produits finis. Mais, surtout, il est possible d'imprimer des métaux, ce que ne peuvent faire les techniques précédemment décrites. Titane, cobalt-chrome, acier inoxydable, acier d'outillage, mais aussi or, argent, bronze ou platine peuvent être imprimés par des machines spécialisées, qui utilisent des techniques similaires au frittage par laser, mais avec des rayons bien plus puissants. On parle alors de procédé DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*). Ainsi, avec un faisceau laser d'une puissance de 200 watts qui balaye la poudre de métal, on peut obtenir une épaisseur de couche de 20 micromètres.

Le procédé *E-Beam*, ou *Electric Beam Melting*, mis au point par la société suédoise *Arcam*, fait appel, lui, à un faisceau d'électrons pour fusionner la poudre dans une chambre à vide, à des températures comprises entre 700 et 1000 °C. La NASA développe une variante de ce procédé, nommée EBF³ ou EBDM (*Electron Beam Direct Manufacturing*) pour rendre possible l'impression 3D de métal en situations d'apesanteur.

Grâce à ces techniques, la poudre non fusionnée peut être en partie réutilisée lors d'une impression ultérieure, ce qui permet de réduire les pertes de matière, un avantage notable étant donné le coût élevé des métaux. L'entreprise *Boeing* utilise par exemple l'impression 3D pour réaliser certaines pièces de turbine dans ses avions. Jusqu'ici réalisées par fabrication soustractive, ces pièces nécessitaient la création

d'un outillage particulier et un assemblage long et complexe de plus d'une dizaine de composants. Elles sont désormais imprimées en 3D en titane, en une seule fois. L'impression 3D a permis une réduction importante des coûts. De plus, la pièce a été redessinée en prenant en compte les possibilités de l'impression 3D, ce qui a produit un élément plus ergonomique, grâce auquel la consommation de carburant des appareils a été réduite.

Très utilisée en architecture pour la réalisation de maquettes, l'impression 3D par frittage laser peut aussi s'appliquer au secteur du bâtiment. L'ingénieur italien Enrico Dini est ainsi à l'origine de la technique *D-Shape* pour imprimer du sable solidifié ou du béton. Son système utilise un procédé similaire au frittage laser, en fusionnant les particules de matière dans un dispositif de grand volume.

Dans la même famille des techniques de liage de poudre, la 3DP (pour *3D Printing*), est une technique mise au point au MIT dont les droits d'utilisation ont été vendus à plusieurs entreprises en 1995. Ainsi, les imprimantes 3D de la marque *Z Corporation*, aujourd'hui propriété de l'entreprise *3D Systems*, utilisent cette technique qui consiste à encoller couche après couche, par déposition de microgouttes de colle, les particules de poudre d'un matériau composite.

Des imprimantes personnelles pour moins de 500 euros

Les avantages de la 3DP sont sa rapidité d'impression (croissance de plusieurs centimètres par heure dans la direction verticale, l'une des plus élevées du marché) et sa capacité à imprimer en couleurs (plus de 390 000 couleurs sur les modèles les plus avancés). La texture obtenue est rugueuse et légèrement sableuse, et les objets produits cassants et fragiles. Les impressions par 3DP sont idéales pour des présentations scientifiques, pour visualiser un prototype, pour réaliser des maquettes ou des figurines, mais conviennent mal à la production de pièces finies utilisées au quotidien.

La baisse rapide du coût des machines est l'un des principaux facteurs du déploiement de l'impression 3D auprès des particuliers. Il est aujourd'hui possible de s'équiper d'une imprimante 3D personnelle pour environ 300 euros. Ces machines

bon marché ont des performances assez rudimentaires, mais elles permettent de réaliser rapidement des pièces en plastique de petite taille.

Les sites de financement collaboratif, tels *Kickstarter* et *Indiegogo* aux États-Unis, *KissKissBankBank* et *Ulule* en France, facilitent le lancement de nouvelles imprimantes plébiscitées directement par les particuliers. L'un des derniers projets en date, *Peachy*, mené par l'ingénieur canadien Rylan Grayston, vise à commercialiser une imprimante 3D à 100 dollars (80 euros) fondée sur une technique originale de stéréolithographie (où le laser est guidé par un signal audio-numérique engendré par l'ordinateur à partir du fichier 3D de l'objet).

La technique matérielle et ses coûts ne représentent cependant qu'une partie des difficultés associées à l'impression 3D. Aujourd'hui, la phase de modélisation des objets reste le principal frein à la diffusion massive de ces techniques de fabrication.

BIBLIOGRAPHIE

M. Berchon, *L'impression 3D*, Eyrolles, 2013 [site Web attentant : www.serialmakers.com].

B. Pettis et al., *Imprimer en 3D avec la MakerBot*, Eyrolles, 2014.

C. Anderson, *Makers - La nouvelle révolution industrielle*, Pearson, 2012.

L'impression 3D au service des scientifiques

Les laboratoires de recherche scientifique sont de grands utilisateurs de matériels produits en petites quantités et qui sont donc vendus à des prix assez élevés. Une partie au moins de ces équipements peuvent aujourd'hui être fabriqués par impression 3D, ce qui permettrait aux laboratoires à la fois de s'équiper à des coûts inférieurs et d'avoir du matériel bien adapté à leurs besoins plutôt que du matériel standard.

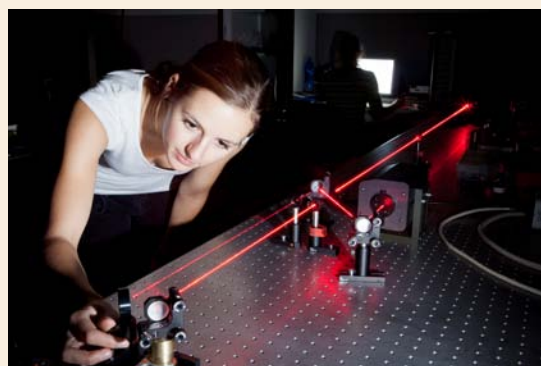
Le laboratoire de biologie dirigé par Jonathan Eisen, à l'Université de Californie à Davis, est un de ceux qui ont franchi le pas. Grâce à une imprimante 3D achetée environ 1 500 dollars et installée dans le laboratoire, ce dernier se confectionne notamment des peignes à électrophorèse en plastique pour un coût de 0,21 cent l'unité, alors qu'auparavant il devait les acheter 51 dollars pièce !

Joshua Pearce, chercheur en génie des matériaux à l'Université technologique du Michi-

gan, aux États-Unis, milite pour l'utilisation de matériel libre ou à source libre par les scientifiques. Il fait notamment le parallèle avec la généralisation des publications à accès libre et des logiciels libres dans certains milieux scientifiques, chez les physiciens en particulier. Selon lui, les scientifiques ont intérêt à développer un mouvement analogue pour ce qui concerne le matériel ; il invoque les exemples d'*Arduino* (une plate-forme libre et participative qui développe des micro-contrôleurs électroniques), et du projet *RepRap* d'imprimantes 3D libres.

Notamment, J. Pearce souligne qu'en utilisant le catalogue *Thingiverse* de fichiers 3D libres, on peut par exemple imprimer en 3D et à faible coût (de l'ordre de 30 fois inférieur à celui du commerce) du matériel nécessaire à des expériences d'optique (voir la photographie ci-dessous), tel que des supports de lentilles.

Enfin, l'impression 3D peut aussi aider les scientifiques dans leurs efforts intellectuels. Par exemple, l'impression 3D facilite beaucoup la réalisation de modèles moléculaires, grâce auxquels on visualise mieux les structures chimiques.



© Shutterstock.com / i g h p o e t