

VRAI OU FAUX

La météo se trompe-t-elle souvent ?

Pour le lendemain, non. Des évaluations a posteriori montrent que les prévisions sont exactes dans 90 pour cent des cas.

Joël Stein

Qui n'a jamais critiqué la météo, régulièrement accusée de se tromper ? Pourtant, les multiples évaluations réalisées indiquent que les prévisions sont plutôt fiables, au moins pour les échéances courtes.

Les prévisions météorologiques vont de quelques heures (par exemple pour anticiper les épisodes de pluie lors du tournoi de Roland Garros) à plusieurs années (pour l'étude du changement climatique). Elles se fondent sur des modèles numériques, où les équations de la mécanique des fluides décrivent l'évolution de l'atmosphère. On détermine d'abord son état initial, à partir des mesures réalisées par un réseau de capteurs et par des satellites. De multiples paramètres sont utilisés : température, pression, force et direction du vent, taux d'humidité, concentrations de certains éléments (l'ozone ou divers polluants par exemple). Les capteurs sont soit embarqués à bord de ballons ou d'avions de ligne, soit installés au sol (plus d'un millier de sites en France) ; des radars permettent aussi de détecter et de suivre les précipitations. Des supercalculateurs, parmi les plus puissants de la planète, résolvent ensuite les équations et calculent l'évolution des différents paramètres.

Pour quantifier la fiabilité des modèles, on évalue les différences entre l'état atmosphérique prévu et l'état observé. La méthode d'évaluation est définie par l'Organisation mondiale de la météorologie. Ainsi, l'une des analyses porte sur la prévision à 48 heures de l'altitude à laquelle la pression atmosphérique vaut 500 hectopascals, soit environ

la moitié de sa valeur au sol (cette altitude est d'environ 5 000 mètres et fluctue de quelques centaines de mètres). La performance est quantifiée en prenant en compte les relevés sur les 12 derniers mois et sur les 70 sites européens de mesures par ballon. Ces scores standardisés montrent que l'on gagne environ un jour tous les dix ans : les prévisions à quatre jours de 2014 sont de qualité équivalente aux prévisions à trois jours que l'on réalisait en 2004.

Quantifier le temps ressenti

La fiabilité est meilleure à plus d'un kilomètre au-dessus de la surface qu'au sol, car l'atmosphère y est régie par des mouvements de grande échelle, relativement faciles à analyser. Toutefois, ce qui compte pour les habitants, c'est la bande d'atmosphère au contact du sol. Et là, le temps est bien plus difficile à prévoir : il est influencé par nombre de phénomènes locaux, dus par exemple à des reliefs ou aux différences de rugosité entre la surface d'une forêt et celle d'une ville.

Outre les évaluations des erreurs moyennes, on cherche à répondre à la question : « La météo s'est-elle trompée ? ». Pour chaque paramètre du temps ressenti, on détermine si l'erreur est supérieure à un seuil qu'on estime pertinent : il est ainsi de 1 °C pour la température. On élabore ensuite un score de performance global, où chaque erreur sur un paramètre entraîne un malus retranché à une note de 10. On considère que la météo ne s'est pas trompée quand



le score est supérieur à 7. On montre ainsi que sur une année, en France, les prévisions pour le lendemain sont exactes dans près de 90 pour cent des cas. Sur une période plus courte ou une zone plus restreinte, le résultat varie notablement selon le type de situations rencontrées (une période orageuse ou une zone montagneuse donneront ainsi lieu à plus d'erreurs).

La fiabilité des prévisions se dégrade avec l'échéance : à trois jours, elle est d'environ 70 pour cent, et elle tombe à 50 pour cent à sept jours. En effet, le caractère turbulent des écoulements atmosphériques près du sol complique les calculs à longue échéance. (Cela ne s'applique pas aux prévisions climatiques, de très longue échéance, où les calculs portent sur des moyennes et obéissent par conséquent à des règles différentes.)

Dans le cadre des procédures de vigilance météorologique, les prévisions permettent aux pouvoirs publics de déclencher des alertes, notamment en cas de tempêtes, d'orages violents ou d'importantes chutes de neige. Les procédures sont lancées quand les paramètres concernés (température, vent, etc.) dépassent certains seuils. Comme on doit manquer le moins possible d'événements extrêmes, on tolère une part de fausses alertes, de l'ordre de 10 pour cent : les évaluations montrent que 97 pour cent des événements extrêmes sont alors anticipés. ■

Joël STEIN dirige la division COMPAS (Contrôle, monitoring, prévisibilité et adaptations statistiques) de la Direction de la prévision à Météo France.

L'impression 3d

Mathilde Berchon

Fabriquer un objet par ajout progressif de matière : tel est le principe général de l'impression 3D. Ces techniques, qui se développent rapidement et gagnent la sphère des particuliers, bouleversent déjà certains secteurs d'activité.

Ce soir, vous avez pour la première fois 15 convives à table, alors que votre vaisselle n'est prévue que pour 12 personnes. Qu'à cela ne tienne. Vous vous asseyez devant votre ordinateur, retrouvez les logiciels-patrons correspondant à vos modèles de couverts, d'assiettes et de verres. Vous allumez votre imprimante 3D, puis vous vérifiez qu'elle est connectée à votre ordinateur et que ses réservoirs de matières premières sont suffisamment remplis. Enfin, vous cliquez pour lancer l'impression. Quelques minutes plus tard, la vaisselle manquante apparaît, flambant neuve, sur le plateau de l'imprimante.

Scénario de science-fiction ? Pas tant que cela. Depuis quelques années, la fabrication d'objets par des techniques d'impression tridimensionnelle (3D) est un domaine en plein essor, au point que nombre de commentateurs parlent d'une nouvelle révolution industrielle. Née dans les années 1980 et

initialement cantonnée à certaines niches industrielles – en particulier la réalisation de pièces prototypes –, l'impression 3D intéresse des acteurs de plus en plus nombreux et commence à toucher le monde des particuliers. Ses applications se multiplient : au-delà de l'industrie, l'impression 3D a atteint l'architecture, la bijouterie, l'art et le design, la médecine, l'enseignement, etc. La recherche scientifique aussi fait partie des domaines qui commencent à en bénéficier (voir l'encadré page 27).

Le cabinet américain de conseil *Wohlers Associates* évalue le marché mondial de l'impression 3D à quelque deux milliards d'euros. Notamment, le nombre d'imprimantes 3D personnelles vendues a plus que triplé entre 2008 et 2011. Plus de 55 000 modèles ont été acquis par des particuliers en 2013, soit 49 pour cent de plus par rapport à 2012. De grandes entreprises prennent position dans ce secteur.

Ainsi, *Microsoft* a annoncé en août 2013 l'intégration du traitement automatisé des fichiers pour l'impression 3D dans son système d'exploitation *Windows 8* ; le transporteur *UPS* propose aux États-Unis un service d'impression 3D dans certains centres de distribution, ce que font en France les magasins *Top Office* ; le vendeur en ligne *Amazon* a ajouté imprimantes 3D et matériaux à son catalogue...

Fabrication par ajout de matière

En quoi consistent les techniques d'impression 3D ? Quelles sont leurs capacités et leurs limites actuelles ? À quels usages sont-elles dévolues ? Que vont-elles changer ?

L'impression 3D désigne un ensemble de techniques, dites de fabrication additive, développées depuis le milieu des années 1980. « Fabrication additive » signifie



L'ESSENTIEL

- L'impression 3D désigne des techniques de fabrication procédant par ajout de matière, couche par couche.
- Née il y a une trentaine d'années, l'impression 3D concerne aujourd'hui de nombreux secteurs d'activité et atteint les particuliers.
- Outre les performances qui restent à améliorer, se posent des questions juridiques sur le droit d'auteur lié aux objets.
- L'impression 3D pourrait entraîner une profonde mutation, où la production de masse laisserait place à la personnalisation de masse.

Francesco De Coni, Université Lille 1

1. DES MODÈLES DE SURFACES DÉFINIES MATHÉMATIQUEMENT, tel le modèle ci-dessus, peuvent être réalisés avec une relative facilité grâce à l'impression 3D.

que l'objet est créé par ajout de matière, couche par couche. Cette démarche s'oppose aux méthodes classiques de fabrication qui procèdent par retrait progressif ou déformation de matière (fraisage, découpe, pliage). Le matériau de base, qui peut être du plastique, du métal, du sable, etc., est déposé (ou non) par une tête d'impression sur un plateau horizontal. À chaque balayage horizontal de la tête d'impression, une couche, ou « tranche », est ainsi formée. Un déplacement vertical de la tête ou du plateau permet alors de passer à la couche suivante. L'objet est ainsi fabriqué couche par couche, avec deux avantages évidents : des pertes de matière minimales et la possibilité de réaliser des formes inaccessibles aux procédés habituels de fabrication en masse.

Trois principales familles de techniques d'impression 3D, et bien des variantes, coexistent (voir l'encadré pages 24 et 25). Chacune présente des avantages et des inconvénients en fonction des projets ; les choix de matériaux, la qualité d'impression et sa rapidité varient d'une technique à l'autre.

La méthode la plus simple, utilisée par la plupart des imprimantes 3D personnelles (souvent proposées en kit à monter soi-même), est celle du dépôt de filament fondu. Elle consiste à faire passer un filament de plastique – de l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) ou du PLA (acide polylactique) – dans une tête d'extrusion chauffante. La tête se déplace ensuite horizontalement et dessine l'objet désiré sur le lit d'impression. Un déplacement vertical permet de passer à la seconde couche de

l'objet, et ainsi de suite jusqu'à sa fabrication complète.

Le dépôt de filament fondu est l'une des techniques d'impression 3D les moins précises, mais elle a de nombreux avantages : faible coût, simplicité d'utilisation, machines compactes et faciles à réparer.

Cette technique, dont le brevet a été initialement déposé par l'entreprise américaine *Stratasys*, est devenue très populaire en grande partie grâce au mouvement du « matériel libre » (*open source hardware*). En 2005, l'ingénieur et mathématicien Adrian Bowyer, de l'Université de Bath au Royaume-Uni, a imaginé une imprimante à dépôt de filament fondu capable de se répliquer grâce à une structure elle-même partiellement imprimée en 3D. Il développa ainsi *RepRap Darwin*, la première imprimante 3D à source libre : toute la documentation technique correspondante est en accès libre sur Internet, et la machine est placée sous

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

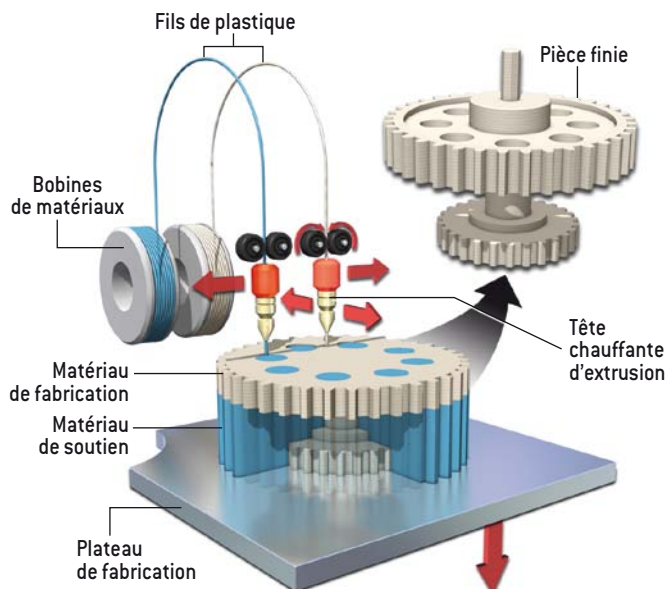
Les techniques existantes d'impression en trois dimensions se regroupent en trois principales familles, chacune fondée sur un principe différent. Dans tous les cas, l'objet est fabriqué couche par couche.

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.

❶ DÉPÔT DE FILAMENT FONDU

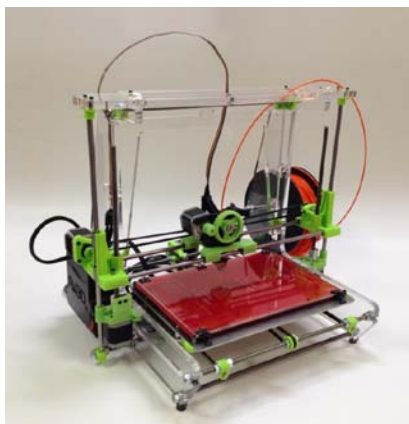


chocolat, etc. peuvent ainsi être déposés couche après couche pour constituer un produit comestible, avec la forme que l'on désire.

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).

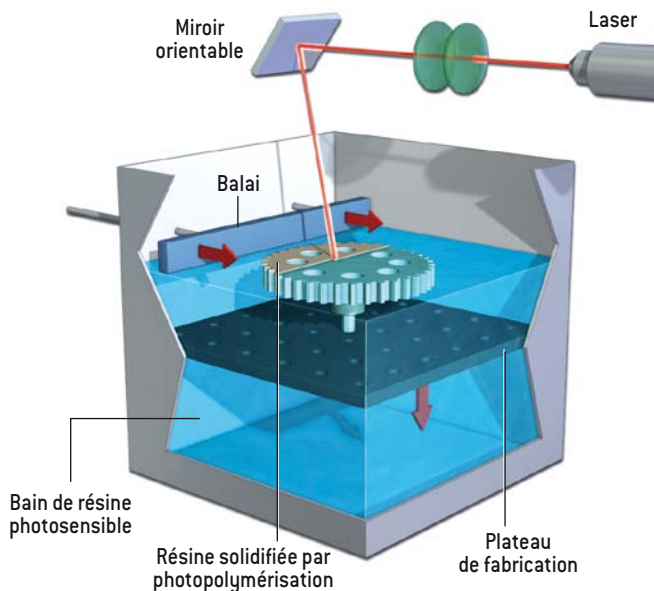
Citons aussi la technique *PolyJet*, apparentée à l'impression classique par jets d'encre. Elle a été développée par l'entreprise israélienne *Objet*, qui a fusionné en 2012 avec l'américain *Stratasys*, l'autre géant de l'impression 3D. Le procédé *PolyJet* permet d'imprimer plusieurs plastiques aux 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

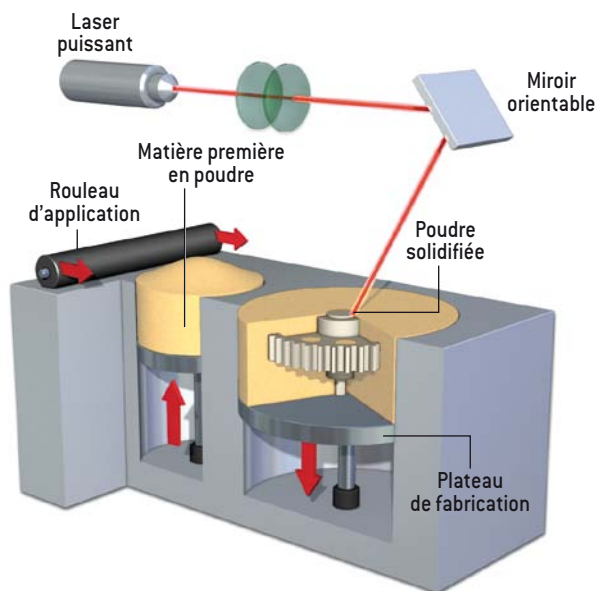
La qualité d'une impression 3D dépend de plusieurs paramètres, en particulier la résolution et l'épaisseur de couche. La résolution s'exprime souvent en points par pouce (dpi, pour *dots per inch*) et correspond au nombre de particules de matière que la machine est capable de déposer par unité de surface.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

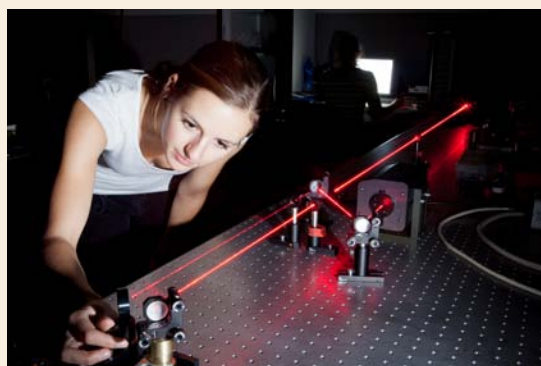
Le laboratoire de biologie dirigé par Jonathan Eisen, à l'Université de Californie à Davis, est un de ceux qui ont franchi le pas. Grâce à une imprimante 3D achetée environ 1 500 dollars et installée dans le laboratoire, ce dernier se confectionne notamment des peignes à électrophorèse en plastique pour 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

Il existe plusieurs façons d'obtenir un fichier 3D : créer un modèle à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D, scanner l'objet grâce à un scanner 3D ou télécharger et modifier un fichier 3D déjà existant.

La première méthode, la création d'un modèle à l'aide d'un logiciel, est celle qui donne le plus de liberté, mais c'est aussi la plus complexe. Les utilisateurs qui ne maîtrisent pas déjà un logiciel professionnel de modélisation (tels CATIA, SolidWorks ou Blender) peuvent toutefois se tourner vers des logiciels plus simples, utilisables directement en ligne et gratuitement (tels SketchUp, Tinkercad ou 123D).

La deuxième méthode, qui consiste à scanner en 3D un objet pour en obtenir le fichier 3D descriptif, se développe aussi. Il existe de nombreux modèles de scanners 3D – appareils permettant de recueillir les données géométriques d'un objet tridimensionnel et de les analyser pour en construire un fichier descriptif. Mais ils sont souvent coûteux, et des solutions alternatives sont proposées. Ainsi, la Kinect, capteur de mouvement qui équipe la console Xbox de Microsoft, est utilisée

dans de nombreux projets de scanners 3D domestiques. Dans d'autres projets, tels que *Structure Sensor* de la jeune pousse californienne Occipital, on élabore des solutions logicielles permettant à des téléphones ou des tablettes de jouer le rôle de scanner 3D.

Comme je l'ai mentionné, la troisième possibilité pour obtenir le fichier modélisant un objet est d'utiliser un fichier 3D déjà existant. De fait, les catalogues de fichiers 3D proposés en ligne se multiplient.

DANS QUELLE MESURE LA CIRCULATION des objets et de leurs fichiers 3D peut-elle être libre ? La question est encore sans réponse.

Le plus populaire d'entre eux est *Thingiverse*. Créé sous l'égide de *MakerBot-Stratasys*, ce catalogue regroupe plusieurs centaines de milliers d'objets dont le fichier 3D est téléchargeable.

Cela nous amène à l'une des grandes interrogations liées à l'impression 3D. Faciliter la reproduction des objets soulève en effet des questions d'ordre juridique. Qu'a-t-on le droit de fabriquer ? Comment protéger le droit de ceux qui ont créé ou inventé

un objet, si l'on peut copier ce dernier si facilement, que ce soit en se procurant son fichier 3D ou en scannant l'objet ? À titre d'illustration, on peut citer le cas de Cody Wilson. Ce jeune Américain libertaire a beaucoup fait parler de lui en mettant à disposition sur Internet les fichiers 3D d'une arme à feu entièrement imprimable, essentiellement en plastique. Ces fichiers ont été téléchargés plus de 400 000 fois avant d'être interdits par le gouvernement américain.

Dans quelle mesure peut-il y avoir libre circulation des objets et de leurs fichiers 3D ? Toutes ces questions n'ont pas encore de réponses et, sur le plan juridique, on peut s'attendre à de nombreux développements, sans doute accompagnés de vives batailles entre les différents camps.

Cependant, l'avenir de l'impression 3D se joue aussi et surtout sur le plan technique. Il s'agit de dépasser les limitations actuelles de la fabrication additive, tant en termes de coûts qu'en termes de performances (résolution, rapidité, qualité du produit, etc.). De nombreux travaux de recherche et développement portent sur l'extension de la gamme de matériaux se prêtant à l'impression 3D, en particulier afin de pouvoir imprimer avec des matériaux plus durables ou plus innovants que la résine ou l'ABS.

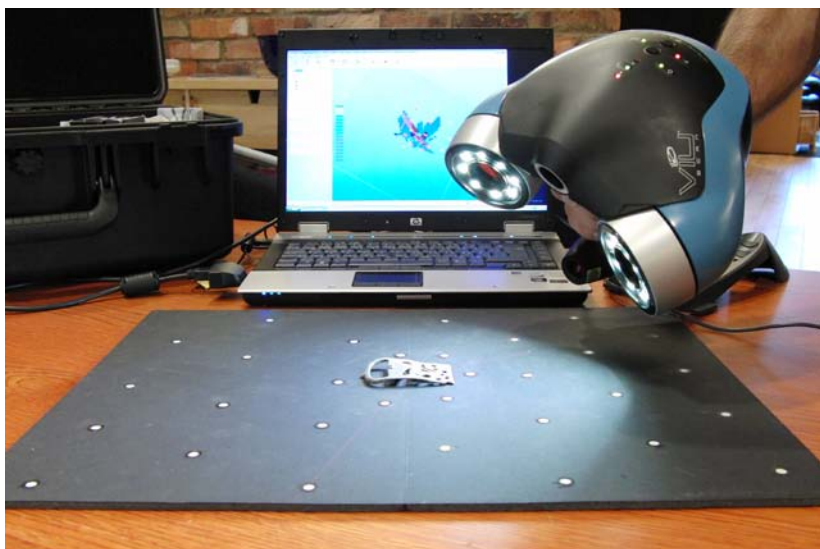
Des avancées attendues

L'impression 3D à base de métal est l'un des terrains d'expérimentation les plus avancés, mais certains laboratoires cherchent aussi à mettre au point des machines permettant d'imprimer en trois dimensions des circuits électroniques. À l'Université Stanford, un groupe d'étudiants a ainsi construit une machine *RepRap* capable d'imprimer de l'encre conductrice au sein d'une impression 3D plastique classique. Au MIT, le groupe de recherche *Mediated Matter* dirigé par Neri Oxman expérimente entre autres avec des matériaux « intelligents » capables de s'adapter à leur environnement. Un objet imprimé avec ce type de matériaux pourrait par exemple devenir plus souple ou plus résistant par endroits, en fonction des contraintes physiques qui s'exercent sur l'objet.

Le groupe de N. Oxman effectue aussi des expériences portant sur l'impression 3D de grands volumes, aspect qui reste l'un des points faibles des techniques de fabrication additive. La plupart des objets qui nous

DE L'OBJET À SON FICHIER 3D

Imprimer un objet en trois dimensions nécessite une description de l'objet dans un format informatique qui permet de commander l'imprimante. Le format de fichiers qui s'est imposé est le STL (*Standard Tessellation Language*). Pour créer le fichier 3D correspondant à un objet, il existe deux possibilités. La première est de modéliser l'objet en trois dimensions à l'aide d'un logiciel approprié. La seconde est de scanner l'objet, c'est-à-dire de recueillir à l'aide d'un appareil spécifique les données visuelles nécessaires à la description de l'objet dans ses trois dimensions. La photographie ci-contre montre ainsi un scanner portable à laser en action autour d'une boucle de ceinture viking datant d'un millier d'années. Le fichier 3D ainsi obtenu a permis de réaliser, par impression 3D, une copie de ce vestige archéologique.



© Creative Tools, Halmstad (Suède)

entourent ne peuvent pas être réalisés d'une seule pièce par impression 3D, les machines existantes ne pouvant imprimer que de faibles volumes. Cependant, le constructeur allemand *Voxeljet* s'est spécialisé dans les imprimantes 3D industrielles pour grands formats. L'un de ses modèles a un volume d'impression de $4 \times 2 \times 1$ mètre, ce qui représente environ huit fois la capacité moyenne des autres machines. Mais il fait encore exception.

Personnalisation de masse ?

Malgré ses limitations actuelles, l'impression 3D est porteuse de grandes promesses, relayées par les médias et par certains acteurs du domaine. Sa force, par rapport aux techniques de fabrication classiques, est d'offrir la possibilité d'inventer de nouvelles formes d'objets, plus complexes, que l'on peut de surcroît personnaliser et mieux optimiser.

Si l'expansion de l'impression 3D se poursuit, elle devrait entraîner de notables



4. UN MODÈLE DE LAMPE créé par le studio de design *Nervous System* (Massachusetts, États-Unis) à l'aide de l'impression 3D.

mutations industrielles, économiques et commerciales. Les designers et ingénieurs industriels doivent déjà penser en dehors des cadres de fabrication utilisés jusqu'ici. Par ailleurs, parce que l'impression 3D est mieux adaptée à une production locale, à l'unité et à la demande, d'aucuns pensent qu'elle pourrait enrayer le déclin industriel des pays occidentaux. Et si l'impression 3D se démocratise au point que la plupart des particuliers deviennent propriétaires d'une imprimante, toute la chaîne de production habituelle, avec ses nombreux intermédiaires (fabricants, distributeurs, transporteurs, stockeurs, vendeurs) risque d'être bouleversée et simplifiée à l'extrême. Les particuliers deviendraient créateurs et producteurs directs des objets qui les entourent.

L'impression 3D nous ferait alors entrer dans un monde où la production de masse serait remplacée par des objets fabriqués localement et à la demande par l'utilisateur final – un monde où la fabrication de masse des objets aura cédé la place à leur personnalisation de masse. ■



LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélie Luneau
14h-15h / chaque jeudi



franceculture.fr



Journée 2014. Photo: Marc Durand. © Philippe Bessière. Couverture: Jeanne Yvonne. ADAP. Paris 2013.

SCIENCE

Marco Polo, une source fiable ?

Hans Ulrich Vogel

Le marchand vénitien impressionnait ses contemporains avec ses récits sur la vie quotidienne en Chine, où il aurait passé une grande partie de sa vie. Aujourd'hui encore, certains doutent de l'authenticité de son témoignage. Mais c'est de moins en moins le cas chez les sinologues.



Marchand vénitien dans l'âme, Marco Polo (1254-1324) fut fasciné par la monnaie-papier chinoise : « Il est voirs que en ceste cité de Cambaluc [Pékin] est la seque [l'hôtel de la monnaie] du grant Sire ; [...] car il doit faire une telle monnoie comme je vous diray ; que il fait prendre escorces d'arbres : c'est de mouriers dont les vers qui manjuent les feuilles font la soie. [...] Et prennent une escorce soustil [subtile] qui est entre le fust [le bois] de l'arbre et l'escorce grosse dehors ; et est blanche. Et de ceste escorce soustil comme papier font tuite noires. Et quant ces chartretes sont faites, si les font tranchier en tel manière. [...] et toutes sont seelées du seel du Seigneur. Et ainsi en fait faire si grant quantité chascun an, qui riens ne li couste, que paieroient tout le trésor du monde. »

Cette description minutieuse du monnayage de l'empereur de Chine Kūbilāi Khān (1215-1294) – qui était aussi Grand Khān, c'est-à-dire chef de tous les Mongols, mais également... le maître de Marco

L'ESSENTIEL

■ **Les contemporains de Marco Polo nommaient *Il Milione* son récit de voyage, tant paraissaient fantaisistes ses descriptions de la richesse du Grand Khan.**

■ **Les sources chinoises ne le mentionnant pas, et Marco Polo omettant plusieurs aspects de la vie chinoise de l'époque, beaucoup l'ont considéré comme un plagiaire.**

■ **Ces accusations résistent de moins en moins aux analyses des sinologues, qui confirment un à un les détails relatés par Marco Polo dans son livre.**

Polo – est tirée du *Devisement du Monde*. Rédigé en français, langue très usitée à l'époque, ce livre connu aussi sous les titres de *Livre des Merveilles* ou de *Il Milione* (voir l'encadré page 36) fut dicté en prison par le Vénitien à un codétenu, à la toute fin du XIII^e siècle. Grand succès dès sa parution, il fut d'abord pris pour une sorte de récit fantastique plein d'exagérations. Aujourd'hui encore, certains le tiennent pour un tissu d'inventions. Nous allons voir qu'au contraire, l'étude des textes chinois et l'archéologie prouvent sa crédibilité et rendent à Marco Polo son statut de grand témoin historique du règne de Kūbilāi Khān.

Que les affirmations de Marco Polo aient semblé douteuses à ses contemporains n'a rien d'étonnant, tant les Européens de la seconde moitié du XIII^e siècle en savaient peu sur la Chine. Ce pays-continent était bien identifié comme la source de nombreuses marchandises exotiques, telles la soie ou la porcelaine, et l'on savait aussi qu'il était le siège d'une grande puissance mili-