

MATHILDE BERCHON

Avec la collaboration de Bertier Luyt

Préface de Joël de Rosnay

L'IMPRESSION

3D

2^e édition



Une nouvelle révolution industrielle ?

L'impression 3D, qui permet de créer des objets par superposition de fines couches de matière, est une technologie en plein essor. Longtemps réservée aux industries de pointe, elle s'est démocratisée avec l'arrivée sur le marché d'imprimantes moins onéreuses et plus rapides. Entièrement mise à jour, la deuxième édition de cet ouvrage en dresse un panorama complet, des différents procédés aux types de machines, des multiples champs d'application (design, architecture, médecine, agroalimentaire...) aux conseils pratiques pour les particuliers. Étoffé d'un nouveau chapitre sur l'impression 3D en France, ce livre de référence vous expliquera pourquoi ce mode de fabrication risque d'avoir un formidable impact sur notre société...

À qui s'adresse ce livre ?

- À tous les makers, bricoleurs, bidouilleurs, geeks, designers, artistes, inventeurs...
- Aux particuliers ou aux décideurs souhaitant utiliser l'impression 3D dans leur quotidien ou leur entreprise

Consultante en impression 3D et open hardware, **Mathilde Berchon** est la fondatrice de MakingSociety, agence conseil et média spécialisée sur ces thèmes. Elle a par ailleurs travaillé pour le service d'impression 3D Sculpteo et le distributeur d'imprimantes 3D personnelles CKAB.

www.makingsociety.com

Bertier Luyt est le fondateur du FabShop, atelier de modélisation 3D et de fabrication digitale qui distribue les imprimantes MakerBot et produit l'événement Maker Faire en France. Expert 3D, il a notamment coordonné la modélisation du château de Versailles pour Google Earth.

www.lefabshop.fr

Au sommaire

Qu'est-ce que l'impression 3D ? • L'impression 3D en bref • Les différents procédés • Les types d'imprimantes 3D • Les matériaux d'impression 3D • L'impression 3D en pratique • La phase de modélisation et de préparation • La phase d'impression • La phase de finition • Applications et perspectives • L'impression 3D pour les particuliers • L'impression 3D pour les professionnels • L'impression 3D en France • La troisième révolution industrielle ?

Sur www.serialmakers.com

- Téléchargez des fichiers 3D d'objets prêts à imprimer
- Consultez les compléments (liens utiles, news, etc.)

L'IMPRESSION 3D

MATHILDE BERCHON
Avec la collaboration de Bertier Luyt
Préface de Joël de Rosnay

L'IMPRESSION **3D**

Deuxième édition

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement le présent ouvrage, sur quelque support que ce soit, sans autorisation de l'éditeur ou du Centre Français d'Exploitation du Droit de Copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

Éditions Eyrolles
61 bd Saint-Germain
75240 Paris Cedex 05
www.editions-eyrolles.com

© Whitney Trudo pour la photo page 193
© Groupe Eyrolles, 2014
ISBN : 978-2-212-13946-4

SURFER LA GRANDE VAGUE MONDIALE DE L'IMPRESSION 3D

L'industrie classique transforme la matière en utilisant de l'énergie et de l'information. Elle est symbolisée par l'usine centralisée et les grandes entreprises capables de produire en masse des automobiles, des avions, des biens de consommation, des robots ménagers, des appareils électroniques ou encore des ordinateurs. La nouvelle industrie en train de naître s'inspire de celle établie sur Internet et les réseaux numériques : la *transformation de l'information* conduisant à l'explosion du Web 2.0 et aux contenus générés par les utilisateurs. Cette nouvelle vague de production industrielle sculpte la matière, grâce à de l'information et de l'énergie, pour fabriquer des quantités d'objets divers et personnalisés. Comme le disait très justement Nicolas Negroponte, ancien directeur du MIT Media Lab, la révolution Internet a contribué, avec la numérisation, à « transformer des atomes en bits ». Aujourd'hui, il devient possible de retransformer des bits en atomes, c'est-à-dire en objets physiques, chez soi, dans son atelier de bricolage ou dans une PME, grâce aux imprimantes 3D et aux machines de prototypage rapide. Ce mouvement a été prédit en France dès 2006 : « Les pronétaire ne vont pas se contenter de fabriquer des produits numériques (textes, musique, vidéos, jeux, etc.). D'étonnantes outils leur donnent désormais la possibilité de fabriquer des objets physiques à partir d'imprimantes 3D.¹ » « Une nouvelle révolution industrielle est en train de naître sous nos yeux avec l'irruption de ce que l'on pourrait appeler les MUP (Micro-Usines Personnalisées).² »

La nouvelle vague qui déferle actuellement sur le monde conduit à un mouvement qui s'amplifie, typique de la « société fluide » naissante : c'est le *Maker Movement*³. Autrement dit, un mouvement d'artisans, de briseurs et de « hobbyistes » qui créent, produisent et partagent des objets grâce à des outils accessibles : scanners, machines à découper, fraiseuses laser, imprimantes 3D... Un *maker*, traduit en français, est un « *faiseur* », un mot souvent interprété de manière péjorative. On pourrait donc franciser le terme de *maker* en créant le néologisme « *doueur* ». En anglais, un *doer* (prononcez « *doueur* »), du verbe *to do* (faire), est une personne qui agit, qui propose de nouveaux concepts, une théorie, des stratégies. Un *doueur* (ou une *doueuse*) est donc à la fois un fabricant, un artisan et un briseur qui invente, fabrique, échange et même vend des objets physiques provenant de créations personnelles ou collectives.

-
1. Joël de Rosnay, avec la collaboration de Carlo Revelli, *La Révolte du pronéariat. Des mass média aux média des masses*, Fayard, 2006.
 2. Joël de Rosnay, « Comment imprimer des objets chez soi. Après les TIC, voici les MUP ! », lemonde.fr, 9 novembre 2006.
 3. Chris Anderson, *Makers : La nouvelle révolution industrielle*, Pearson, 2012.



Le mouvement des doueurs, couplé à la baisse des prix des imprimantes 3D, va avoir une très grande portée mondiale. Les nouveaux artisans du numérique 3D, des TPE et des PME vont progressivement remplacer la culture de la consommation et du gaspillage par une culture de la création, de l'innovation et de la production décentralisée. Ce mouvement débouche aussi sur de nouvelles formes d'éducation, les « travaux pratiques » de nos écoles, lycées et universités faisant place à de la coéducation dans des ateliers ouverts à tous (hackerspaces, makerspaces, Fab Labs), qui se sont créés dans le monde entier en l'espace de quelques années. Un mouvement qui prend une ampleur considérable avec Facebook et Twitter, par l'échange en P2P, grâce au *crowdsourcing* et au *crowdfunding*.

Évidemment, l'avènement de ces MUP n'ira pas sans créer de graves difficultés industrielles, économiques et même juridiques. Nous allons sans doute connaître les mêmes problèmes liés aux droits d'auteur que ceux que l'on observe aujourd'hui pour la musique ou les textes imprimés, mais cette fois pour des objets sous « marques déposées ». Par ailleurs, de nouveaux conflits vont éclater entre les grands producteurs d'objets standardisés destinés à des consommateurs de masse, et des pronéaires, des micro-TPE ou des associations, capables de fabriquer des objets jusqu'alors produits en série dans des usines centralisées. Et que dire des applications issues des nanotechnologies, telles que les imprimantes moléculaires ou cellulaires ? Aujourd'hui, des bio-imprimantes 3D fabriquent en effet des tissus vivants, et même des organes implantables chez l'homme. Entre les mains de particuliers et sans contrôle, ces systèmes pourraient être détournés afin de fabriquer des drogues, des armes nanotechnologiques, voire des agents capables de modifier l'environnement.

D'où l'importance de l'information, de l'évaluation, du débat public et politique, en même tant qu'industriel et culturel, proposés par ce livre, annonciateur d'une révolution que le monde industriel n'avait peut-être pas connue depuis la machine à vapeur, les machines-outils à commande numérique ou les robots. Cet ouvrage prédit la naissance d'une démocratie industrielle : le « faites-le vous-mêmes » à la portée de tous, de groupes, de réseaux sociaux et même d'industries classiques si elles apprennent à surfer la grande vague mondiale de l'impression 3D.

Joël de Rosnay

*Conseiller de la présidente d'Universcience
Président exécutif de Biotics International
Auteur du livre Surfer la vie, 2012*

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier Antoine Derouin, mon éditeur, pour son suivi précieux et attentif tout au long de l'écriture de ce livre, ainsi que le directeur éditorial Éric Sulpice et toute l'équipe marketing d'Eyrolles pour leur engagement passionné à chaque étape de cette aventure.

Je tiens aussi à remercier Joël de Rosnay d'avoir accepté de préfacer l'ouvrage et de nous faire partager sa vision de la fabrication de demain.

Également Bertier Luyt, pour l'écriture du chapitre sur la modélisation, et son énergie sans pareil.

Clément Moreau et Marine Coré-Baillais de Sculpteo pour m'avoir offert la chance de me lancer dans ce projet.

Mes remerciements vont aussi à Oliver Tate et Benjamin Renaud de l'entreprise Work and Progress pour leur relecture attentive du chapitre sur les finitions, ainsi qu'à François Arnoul de 3D Avenir et Éric Bredin de Stratasys.

Enfin, un grand merci à mes proches, Jacques, Béatrice, Claire et Colin, pour leur enthousiasme et leurs excellents conseils.

Il n'y aurait bien sûr pas eu de deuxième édition sans lecteurs. Je voudrais donc vous remercier chaleureusement de vous être procuré le livre, de l'avoir lu, aimé et partagé autour de vous.

Mathilde Berchon

TABLE DES MATIÈRES

PARTIE 1

QU'EST-CE QUE L'IMPRESSION 3D ?

Chapitre 1. L'IMPRESSION 3D EN BREF	3
Un procédé par ajout de matière	3
Petit historique	5
Que peut réaliser l'impression 3D ?	8
Des formes géométriques complexes et imbriquées	9
Des pièces mécaniques d'un seul tenant	9
Des objets uniques très travaillés	9
Des pièces d'avions ou de voitures	10
Des organes humains	11
Les matériaux utilisés	11
Les plastiques	12
Les métaux	13
La céramique	13
Les autres matériaux	13
Que va changer l'impression 3D ?	14
Rendre la fabrication accessible à tous	14
Fabriquer des objets sans assemblage	15
Réduire les coûts de production	15
Réaliser des pièces uniques à la demande	15
Imaginer les objets de demain	16
Chapitre 2. LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS	17
Les principes de base	17
Une technique de fabrication additive	17
Un procédé à commande numérique	17
Pas d'impression 3D sans fichier 3D	17
L'impression 3D par photopolymérisation	18
La stéréolithographie	18
Le procédé DLP	20

La technologie PolyJet	22
La 2PP : l'impression 3D à échelle nanoscopique	23
L'impression 3D par liage de poudre	24
Le frittage laser	24
Le procédé E-Beam.....	28
La technique 3DP	29
Les techniques à jet d'encre	31
L'impression 3D par dépôt de matière fondu	31
La technique FDM	31
Avantages et limites	33
L'impression 3D par encollage de papier	33
En résumé	35
 Chapitre 3. LES TYPES D'IMPRIMANTES 3D	 37
 Les critères de choix d'une imprimante 3D	38
 Les imprimantes 3D personnelles	39
RepRap, l'imprimante qui s'imprime elle-même	39
Anatomie d'une imprimante personnelle.....	41
Fab@Home	42
MakerBot Industries.....	43
Ultimaker	45
Solidoodle.....	46
Printrbot jr	47
Micro M3D	47
Cube	48
Imprimantes n'utilisant pas la FDM	49
Et toutes les autres...	51
 Les imprimantes 3D professionnelles	51
Les modèles ProJet de 3D Systems	52
Les Objet24 et Objet30 d'Objet.....	53
Les uPrint SE de Stratasys	54
La Perfactory P3 Mini Multi Lens d'EnvisionTEC.....	55
La série ProJet X60	55
 Les imprimantes 3D de production	56
Les EOS P	56
La gamme ProJet 7000 de 3D Systems.....	57
La gamme Objet Connex	57

Les séries Dimension et Fortus de Stratasys	58
Les imprimantes grands volumes.....	58
Les imprimantes de matière alimentaire	59
Les imprimantes de dentisterie.....	60
Les imprimantes de bijouterie.....	61
Les imprimantes de métal	61
Les imprimantes à circuit électronique	64
Chapitre 4. LES MATÉRIAUX D'IMPRESSION 3D	65
Les plastiques	66
Les ABS et simili-ABS	66
Le PLA	67
Le PET	68
Les polyamides	69
Les plastiques composites multicolores	69
Les résines	70
Les plastiques transparents	71
Les plastiques résistant à la chaleur.....	72
Les plastiques flexibles et les caoutchoucs	72
Le polypropylène et les simili-polypropylènes	74
L'alumide.....	75
Les métaux	76
L'aluminium et ses alliages.....	76
Le cobalt-chrome et ses alliages.....	76
L'acier inoxydable.....	77
L'acier d'outillage maraging	77
Le titane et ses alliages	77
Les métaux précieux	78
Céramiques, sables et bétons	79
Les matériaux organiques	80
Les cires	80
Le bois	81
Le papier.....	82
Les matières alimentaires	82
Les tissus biologiques.....	83
Les matières conductrices	84
Vers des matériaux d'impression 4D ?.....	85

PARTIE 2

L'IMPRESSION 3D EN PRATIQUE

Chapitre 5. LA PHASE DE MODÉLISATION ET DE PRÉPARATION	89
Création ou récupération d'un modèle 3D	90
La modélisation 3D.....	90
L'acquisition par scan 3D	92
L'utilisation d'un fichier 3D existant	96
Exportation au format STL	97
Réparation et préparation du fichier STL	98
Conseils et astuces	98
Les solutions logicielles	99
Les solutions en ligne	101
Tranchage du fichier STL.....	101
Résolution, densité et épaisseur	101
Raft et support.....	102
Les logiciels de tranchage	103
Exportation pour l'impression	103
Chapitre 6. LA PHASE D'IMPRESSION	105
Le choix du matériau	105
Caractéristiques d'un matériau	106
Quel matériau pour quel objet ?	106
Réaliser une impression.....	107
Le logiciel de contrôle d'impression.....	107
Préparer l'imprimante	109
Lancer l'impression.....	112
Optimiser l'impression	113
Optimiser les coûts.....	113
Optimiser la qualité de la pièce.....	117
Optimiser le temps d'impression.....	119
Chapitre 7. LA PHASE DE FINITION	121
Le nettoyage de la pièce	121

La solidification de la pièce	123
La préparation de la pièce	124
Le ponçage	124
Le polissage	125
Le masticage	127
Le dépôt d'apprêt de charge	127
La finition de la pièce	128
La peinture	128
Les autres finitions	129
Le vieillissement de la pièce	131

PARTIE 3

APPLICATIONS ET PERSPECTIVES

Chapitre 8. L'IMPRESSION 3D POUR LES PARTICULIERS	135
Comment imprimer en 3D ?	135
Les imprimantes 3D personnelles	135
Les services en ligne	136
Les lieux de fabrication	137
Quels objets imprimer en 3D ?	138
Des objets personnels	139
Des objets utiles	139
Des objets réparés ou améliorés	141
Des objets ouverts et modifiables	142
Comment se procurer des fichiers 3D d'objets ?	143
Un accès facilité à la création 3D	143
Les sites de partage de modèles 3D	143
Qu'entreprendre à l'aide de l'impression 3D ?	145
Présenter ou monétiser ses créations	145
Proposer son service d'impression 3D à la maison	146
Commercialiser son modèle d'imprimante 3D	147
Lancer une campagne de financement collaboratif	147
Qu'a-t-on le droit d'imprimer en 3D ?	148
Cas d'une création originale	148

Cas d'une copie	149
En conclusion : créez !	149
Chapitre 9. L'IMPRESSION 3D POUR LES PROFESSIONNELS	151
Architecture	151
Art	154
Design	156
Cinéma	157
Patrimoine	159
Mode	159
Bijouterie	162
Industrie lourde	163
Aérospatiale	163
Automobile	163
Défense	164
Électronique	165
Agroalimentaire	165
Santé	166
Prothèses et aides auditives	166
Tissus humains, organes, implants et médicaments	169
Humanitaire	170
Éducation	170
Recherche scientifique	171
Chapitre 10. L'IMPRESSION 3D EN FRANCE	173
L'écosystème entrepreneurial français	173
Les constructeurs	174
Les distributeurs	177
Les prototypistes	178
Les plates-formes de partage et de vente de fichiers	179
La recherche sur l'impression 3D en France	179
L'offre en France pour le grand public	180
Où découvrir et pratiquer l'impression 3D ?	180

Où acheter une imprimante 3D personnelle ?	182
Chapitre 11. LA TROISIÈME RÉVOLUTION INDUSTRIELLE ?	185
Vers la customisation de masse	185
Des objets cocréés avec l'utilisateur final	185
Une meilleure adaptabilité aux souhaits du consommateur....	187
Une chaîne de production bouleversée	188
L'impression 3D dans les nuages....	189
...ou à la maison	190
Relocalisation et réindustrialisation.....	190
Écologie et développement durable	191
Des objets au design optimisé	192
Des pertes de matière minimes.....	193
La question du recyclage.....	193
Oui, mais.....	193
Une fabrication encore trop lente	194
Des matériaux chers et peu variés	194
Des formes difficilement reproductibles et parfois instables ...	194
Pas toujours de contrôle qualité	195
Conclusion.....	195
Annexe A RESSOURCES UTILES AUTOUR DE L'IMPRESSION 3D EN FRANCE.....	197
Constructeurs d'imprimantes 3D	197
Distributeurs d'imprimantes 3D	198
Lieux de fabrication numérique	199
Prototypistes.....	201
Laboratoires de recherche et centres techniques.....	202
Annexe B GLOSSAIRE.....	205
INDEX.....	209

PARTIE 1

QU'EST-CE QUE L'IMPRESSION 3D ?

D'où vient l'impression 3D et comment fonctionne-t-elle ?

Avec quelles machines et quels matériaux peut-on imprimer ?

Cette première partie pose les bases de ce nouveau procédé,
pas si nouveau d'ailleurs...

L'IMPRESSION 3D EN BREF

« Troisième révolution industrielle » pour *The Economist*, technologie « plus importante que le Web » pour Chris Anderson, l'ancien rédacteur en chef de *Wired*, une explosion des ventes d'imprimantes 3D de 75 % en 2014 selon le cabinet d'études Gartner..., l'impression 3D n'en finit plus de connaître une croissance éblouissante.

Mais d'où vient-elle ? Est-ce une technique nouvelle, comme le laisse à penser l'engouement du grand public ? En quoi diffère-t-elle des modes traditionnels de fabrication ? Quelles sont ses applications aujourd'hui et que va-t-elle changer demain ? Dans ce premier chapitre, nous allons dresser un bref état des lieux de l'impression 3D, en remontant à ses origines.

Un procédé par ajout de matière

Jusqu'à peu, tous les objets étaient fabriqués selon trois grandes techniques : en soustrayant peu à peu la matière jusqu'à former la pièce (sculpture, découpe, fraisage, forage...), en combinant plusieurs matériaux (tissage, collage...) ou en déformant la matière pour lui donner la forme souhaitée (moulage, pliage...). La fabrication d'un objet combinait en général ces trois procédés, ce qui nécessitait le recours à de nombreux outils et l'emploi de différents matériaux.

Avec l'impression 3D, c'est totalement différent puisque la pièce est créée en un seul passage, couche après couche, au rythme moyen d'un à deux centimètres de hauteur par heure. Cet objet peut même comporter des mécanismes internes (comme un roulement à billes), des formes tissées et entrelacées, ou encore des creux et des courbes.

S'il existe de nombreux procédés d'impression 3D, ils ont tous pour point commun de réaliser un objet l'une couche après l'autre. Cette technique relève de la fabrication dite « additive », car elle fonctionne par ajout de matière : l'objet prend forme au fur et à mesure de la solidification des couches.



Étapes de l'impression 3D d'une hélice. (Source : Stratasys via CSC)

L'impression 3D est réalisée grâce à une imprimante 3D. Cette machine, qui peut être de taille et d'aspect très divers, est toujours associée à plusieurs logiciels informatiques, qui sont d'une grande importance dans le processus puisqu'ils permettent de préparer le fichier 3D de l'objet à fabriquer, puis de contrôler l'imprimante pendant toute la durée de l'impression. Une imprimante 3D est donc une machine capable de fabriquer un objet physique à partir d'un modèle 3D.



Orbicural Lamp 1, lampe imprimée en 3D par le studio de design Nervous System. (Source : Nervous System, www.n-e-r-v-o-u-s.com)

Petit historique

La popularité actuelle des imprimantes 3D personnelles et le relais récent des médias laissent supposer que l'impression 3D en est à ses balbutiements. Il n'en est rien.

L'impression 3D existe en réalité depuis environ 30 ans. Elle est longtemps restée cantonnée à un usage industriel très spécialisé, employée à des fins de prototypage et d'outillage rapide. Cette entrée par la petite porte lui a permis de faire ses preuves, tranquillement mais sûrement.

La toute première imprimante 3D, la SLA-250, a été lancée fin 1988 par ce qui était alors une très jeune entreprise, 3D Systems, fondée en 1986 par l'ingénieur Chuck Hull, auteur d'une soixantaine de brevets dans le domaine du prototypage rapide. Le procédé utilisé était la stéréolithographie, technique qu'il a mise au point et brevetée le 8 août 1984 (trois semaines plus tôt, les Français Alain Le Méhauté, Olivier de Wiite et Jean-Claude André avaient déposé un brevet similaire, mais qui est tombé car les frais de maintien de dossier n'ont pas été renouvelés...). À cette époque, l'expression « impression 3D » n'existe pas encore. Chuck Hull parle de *stereolithography apparatus*, qui désigne un système de fabrication par couches successives utilisant un matériau sensible aux rayons ultraviolets. L'imprimante remporte d'emblée un franc succès dans le monde industriel. 3D Systems est d'ailleurs à l'origine du STL (*Standard Tessellation Language*), un format de fichier devenu depuis le standard pour l'impression 3D.

À la même époque, comme souvent dans l'histoire des techniques, d'autres inventeurs mettent au point des procédés de fabrication additive. En 1988, Scott et Lisa Crump créent l'entreprise Stratasys. Ils sont alors en plein développement du procédé FDM (*Fused Deposition Modeling*) qui sera breveté l'année suivante. La société lance sur le marché ses premières imprimantes basées sur cette technique, qui permet de déposer le matériau liquéfié couche par couche grâce à une tête d'extrusion qui se déplace. La FDM donnera plus tard naissance aux imprimantes personnelles.

Il faut ensuite attendre 1993 pour voir apparaître le procédé 3DP (*Three Dimensional Printing*), mis au point au MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). Il est assez proche de la technique employée pour les imprimantes 2D à jet d'encre : une glue est projetée sur une surface de poudre pour former peu à peu l'objet. En 1995, l'entreprise Z Corporation obtient du MIT le droit d'utilisation exclusif du procédé 3DP et débute le développement de ses imprimantes, destinées uniquement au monde industriel.

Fabrication additive ou impression 3D ?

Ces deux expressions synonymes qualifient l'ensemble des techniques de fabrication couche par couche. La dénomination « fabrication additive » (*additive manufacturing* ou AM), utilisée par les grands noms historiques du secteur, est aujourd'hui principalement associée au monde industriel. Elle désigne l'ensemble des procédés de fabrication par ajout de matière, qui regroupe sept types de techniques : l'extrusion de matière, la projection de matière, la projection de liant, la lamination de papier, la photopolymérisation, la fusion de lit de poudre et le dépôt d'énergie dirigée.

Plus récente, la formulation « impression 3D » a été popularisée par les médias avec l'émergence d'acteurs comme MakerBot ou Bits from Bytes, et de services d'impression 3D en ligne comme Sculpteo ou Shapeways. Elle est plutôt réservée aux applications grand public.

1996 est une année charnière pour le monde naissant de l'impression 3D. Trois imprimantes majeures sont alors lancées sur le marché : la Genisys de Stratasys, l'Actua 2100 de 3D Systems et la Z402 de Z Corporation. Pour la première fois, elles sont qualifiées d'« imprimantes 3D », et l'expression commence à entrer dans le langage courant pour parler de ce type de machine de prototypage rapide. Puis en 2005, la Spectrum Z510 de Z Corporation voit le jour. C'est la première imprimante 3D capable de fabriquer des objets directement en couleurs.

Pendant dix ans, de 1996 à 2006 environ, les constructeurs vont mettre au point d'autres modèles, améliorer et développer de nouveaux procédés. Les imprimantes 3D sont de plus en plus utilisées pour le prototypage rapide et la production de petites séries, mais tout en restant cantonnées au domaine industriel.

Dates clés de l'histoire de l'impression 3D

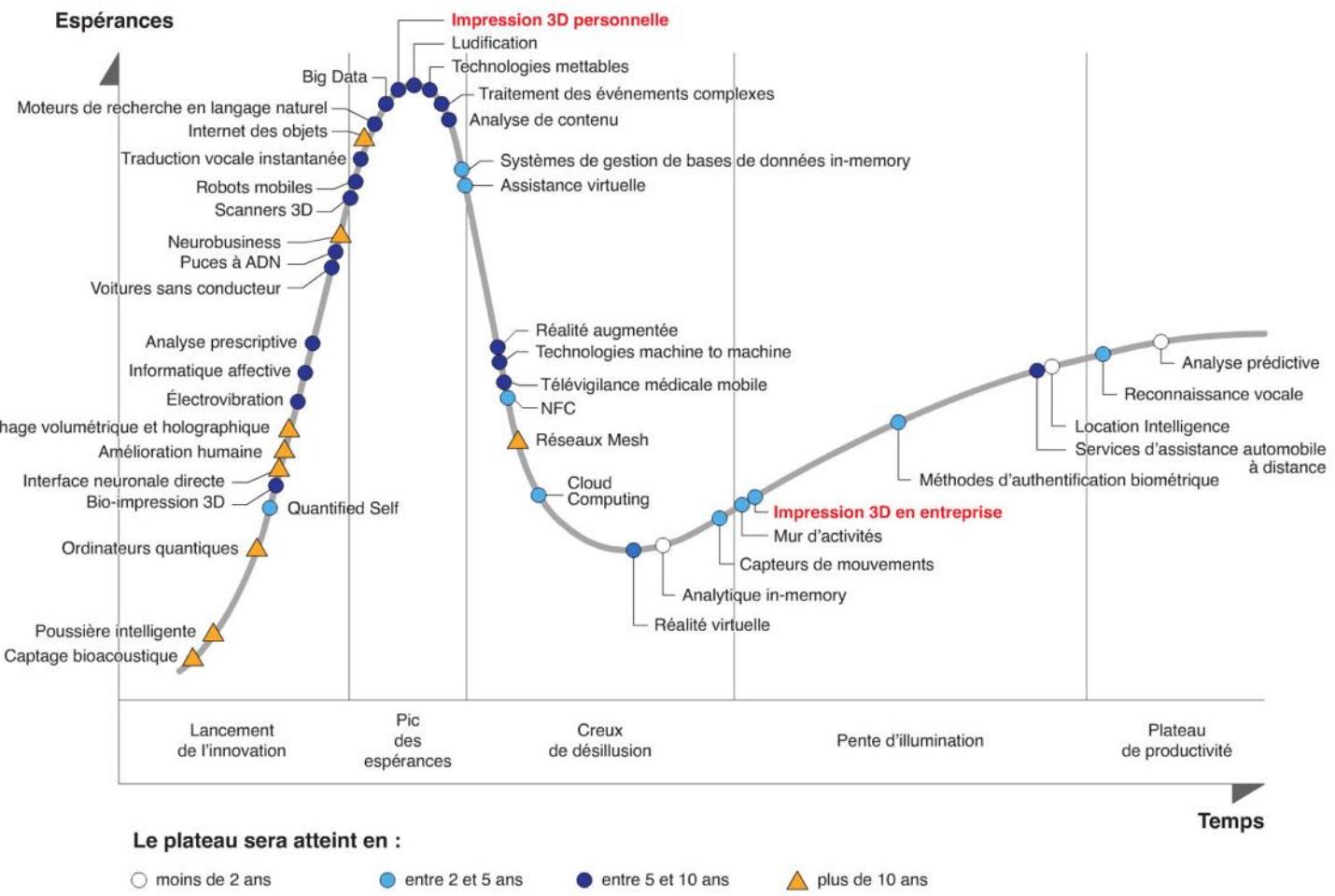
- 1952 : Kojima démontre les avantages de la fabrication par couches superposées.
- 1967 : Swainson dépose un brevet aux États-Unis pour un système de durcissement de résine par double rayon lumineux.
- 1981 : Kodama publie trois méthodes de solidification holographique.
- 1982 : Recherches sur la stéréolithographie menées parallèlement en France et aux États-Unis.
- 1984 : Chuck Hull dépose le brevet 4575330 d'utilisation de la stéréolithographie.
- 1986 : Création de 3D Systems. D'autres acteurs entrent en jeu.
- 1987 : Le prototypage rapide devient une réalité commerciale.
- 1989 : Lancement de Stratasys et des premières imprimantes FDM.
- 1990 : La fabrication additive est utilisée pour la réalisation de moules.
- 1995 : Z Corporation lance les premières imprimantes 3DP.
- 1996 : Premières mentions des machines industrielles comme « imprimantes 3D ».
- 2000 : La fabrication additive est utilisée pour des pièces de production.
- 2007 : Création de Shapeways aux Pays-Bas.
- 2009 : Création de MakerBot Industries et lancement de la MakerBot Cupcake CNC. Lancement de Sculpteo en France.
- 2011 : 15 000 imprimantes 3D sont vendues (environ 40 modèles disponibles).
- 2012 : 45 000 nouvelles machines sont vendues.
- 2013 : Stratasys rachète MakerBot Industries pour 400 millions de dollars.

Source partielle : « Putting 3D Printing into the Value Stream », *Econolyst*, octobre 2012.

L'idée de rendre accessible cette technologie aux particuliers fait peu à peu son chemin chez certains acteurs. Plusieurs entreprises émergent de cette vision, principalement en Europe. En 2007, les Néerlandais Peter Weijmarshausen, Robert Schouwenburg et Marleen Vogelaar créent Shapeways, un service en ligne d'impression 3D ouvert aux particuliers. En France, Éric Carreel, Clément Moreau et Jacques Lewiner fondent Sculpteo en 2009 et développent des outils web qui simplifient l'ensemble du processus d'impression 3D pour l'utilisateur amateur.

En parallèle, d'autres acteurs s'investissent dans le domaine des imprimantes 3D personnelles. Né dans le monde de la recherche et de l'open source, le projet RepRap mené par Adrian Bowyer voit le jour en 2005 à l'université de Bath au Royaume-Uni. Il s'agit de la première imprimante 3D autoréplicante – elle peut imprimer ses propres pièces –, qui s'appuie sur une technologie très similaire au procédé FDM. Le premier modèle opérationnel, la Darwin, est disponible en 2007. Il est entièrement open source, ce qui permet à beaucoup d'utilisateurs passionnés de le reproduire et de l'améliorer.

Aujourd'hui, le marché de l'impression 3D est en pleine expansion et entre dans une phase de transition historique. En avril 2012, les entreprises Stratasys et Objet ont fusionné, devenant le *pure player* de l'impression 3D le plus coté au monde, à 1,4 milliard de dollars, puis ont racheté en juin 2013 la société MakerBot, le principal constructeur d'imprimantes 3D personnelles. Autre chiffre saisissant, le marché des imprimantes 3D personnelles est passé de 355 unités vendues en 2008 à 23 265 en 2011 et 35 508 en 2013 ! Les médias se sont aussi emparés du phénomène et parlent régulièrement de cette technologie, désormais bien connue du grand public. Les procédés d'impression s'améliorent, les matériaux disponibles se multiplient et le prix des machines chute drastiquement. Pour 400 € environ, il est maintenant possible de s'équiper d'une imprimante 3D personnelle relativement performante.



Que peut réaliser l'impression 3D ?

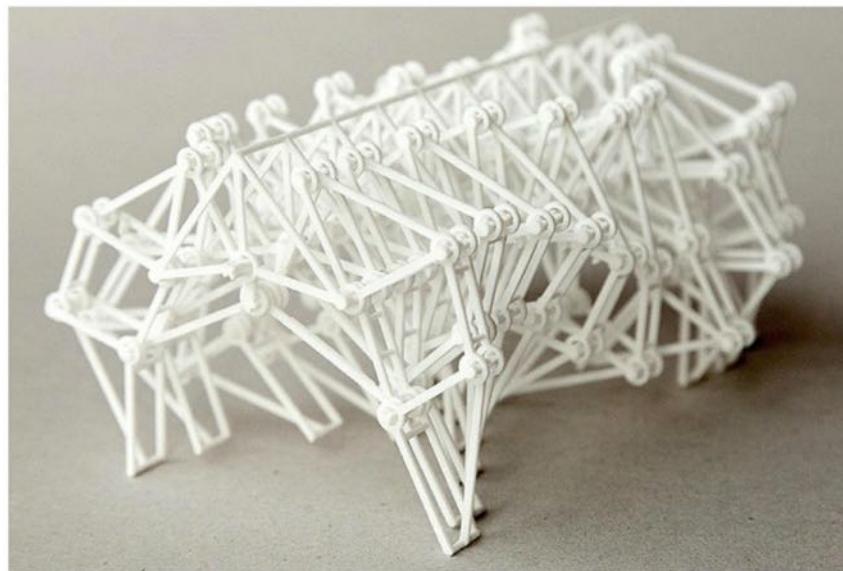
L'impression 3D est une technique à fort potentiel. Elle offre des possibilités encore jamais imaginées et remet en question l'ensemble des procédés industriels. Voici un rapide tour d'horizon de ce dont elle est capable.



Drape Dress. Robe maillage imprimée en 3D, conçue par le studio de design Freedom of Creation.
(Source : Freedom of Creation – 3D Systems)

DES FORMES GÉOMÉTRIQUES COMPLEXES ET IMBRIQUÉES

L'impression 3D est capable de réaliser des pièces aux formes géométriques très complexes. Par exemple, il est possible d'imprimer en une seule fois un tissage. La robe ci-contre a été ainsi entièrement créée par une imprimante 3D. Les anneaux n'ont pas été assemblés a posteriori, mais fabriqués directement sous forme de maillage.



Standbeast, une sculpture mobile articulée, imprimée en 3D d'une seule pièce, de l'artiste Theo Jansen. (Source : Theo Jansen)

DES PIÈCES MÉCANIQUES D'UN SEUL TENANT

Des pièces mécaniques peuvent être fabriquées sans aucun assemblage : l'objet sort de la machine tel quel. Les clés à molette ci-contre illustrent parfaitement les capacités de l'impression 3D pour la fabrication de pièces mobiles. Chaque clé est entièrement fonctionnelle, sortant de la machine prête à l'emploi.



Clés à molette imprimées en 3D. (Source : Objet)

DES OBJETS UNIQUES TRÈS TRAVAILLÉS

La précision exceptionnelle de certains procédés d'impression 3D permet de fabriquer des objets uniques très petits qui offrent beaucoup de détails. Deux secteurs spécialisés emploient déjà grandement ces techniques.

■ La bijouterie : les plus grands noms de la bijouterie de luxe internationale utilisent aujourd'hui l'impression 3D, qui facilite la phase de fabrication tout en assurant une grande finesse de détail. Il est ainsi possible de réaliser des modèles sur mesure à partir de métaux précieux. Des imprimantes spécialisées ont été conçues pour ce corps de métier.

■ La dentisterie : de nombreux laboratoires sont maintenant équipés d'imprimantes 3D spécialisées pour fabriquer des pièces sur mesure qui nécessitent une finition parfaite (couronnes, bridges, dentiers, bagues...).



Modèle d'orthodontie imprimé en 3D par une imprimante dentaire Objet3D OrthoDesk. (Source : Objet)

DES PIÈCES D'AVIONS OU DE VOITURES

Les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile utilisent l'impression 3D pour fabriquer un grand nombre de pièces spécialisées. Cette technique permet de réaliser des éléments de très petite taille, mais aussi de très grande. Elle réduit en outre les coûts de prototypage et de fabrication tout en optimisant le design.



Moteur d'avion Rolls Royce comportant des pièces imprimées en 3D. (Source : Rolls Royce)

Aujourd’hui, les avions des lignes commerciales, par exemple, contiennent presque tous des pièces en métal imprimées en 3D, qui se trouvent entre autres dans les systèmes de ventilation ou dans certaines parties du fuselage. Pour l’instant, le secteur automobile emploie l’impression 3D principalement pour le prototypage des pièces et la décoration intérieure des véhicules. Il est possible que le tableau de bord de votre voiture contienne des pièces imprimées en 3D.

DES ORGANES HUMAINS

L’impression 3D est une technique versatile qui touche désormais des domaines très divers. Ainsi, la recherche médicale explore activement les possibilités de la fabrication additive pour réaliser des implants sur mesure et même des organes humains. À l’heure actuelle, il est en effet possible de créer un tissu organique vivant grâce à une imprimante 3D (voir pages 83 et 169).



Oreille imprimée en 3D par le Wake Forest Institute Regenerative Medicine. (Source : WFIRM)

Les matériaux utilisés

Ces techniques d’impression 3D ne seraient rien sans les matériaux qui les accompagnent, qui se sont beaucoup diversifiés ces dernières années. À l’heure actuelle, les plus employés sont les plastiques et les métaux, auxquels il faut ajouter les céramiques et les matières organiques. Chaque procédé de fabrication additive a son propre matériau de prédilection (voir tableau page suivante avec l’exemple des plastiques).

LES PLASTIQUES

La résine, le polyamide et l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène), trois plastiques aux propriétés différentes, ont longtemps été les matériaux phares de l'impression 3D et demeurent encore très populaires. Utilisés très souvent en prototypage rapide, ils interviennent également dans la production d'objets finis.

Les principaux plastiques utilisés en impression 3D et leur technique de préférence respective.

PLASTIQUE	ÉTAT AVANT IMPRESSION	TECHNIQUE
Résine	Liquide	Stérolithographie
Polyamide	Poudre	Frittage laser
ABS	Filament	Dépôt de filament fondu

Avec les imprimantes Objet, il est aussi possible d'imprimer plusieurs matériaux simultanément : ces machines peuvent combiner plastiques souples et durs, résistant à la chaleur et transparents.

Impression polychrome en plastique

Les imprimantes X60 sont capables d'imprimer directement en plusieurs couleurs. Le matériau utilisé, un plastique composite, n'est pas le plus adapté pour la production d'objets finis, mais il permet de produire des maquettes et des prototypes très satisfaisants, pour des présentations professionnelles par exemple.



Maquette d'architecture imprimée en 3D en couleurs par une imprimante X60.
(Source : The Realization Group – Z Corporation/3D Systems)

LES MÉTAUX

Les techniques d'impression de métal connaissent actuellement une très forte croissance. Elles intéressent particulièrement les industriels pour des raisons de coût économique. En effet, l'impression 3D de métal engendre beaucoup moins de pertes de matière et se révèle capable de réaliser des formes à la fois plus solides et plus légères, tout en réduisant l'impact énergétique. Par exemple, le secteur de l'aérospatiale investit massivement en recherche et développement dans ce domaine.

Le titane et l'acier inoxydable sont les deux principaux métaux employés aujourd'hui dans la fabrication additive d'outillage industriel et de pièces de production. Quant aux métaux précieux, ils sont fondus à partir de moules à cire perdue imprimés en 3D. Or, argent, bronze et platine servent généralement à la réalisation de petits modèles finis (bagues, bracelets, broches...).



Pièce d'avion réalisée par fabrication additive de métal.
(Source : Arcam)



Metatron, une sculpture imprimée en bronze de Bathsheba Grossman. (Source : Bathsheba Grossman)

LA CÉRAMIQUE

La céramique est un matériau de plus en plus employé en impression 3D. Même si la technologie utilisée s'avère relativement fastidieuse et requiert de nombreuses étapes, elle permet de fabriquer des pièces qu'il aurait été impossible de réaliser avec une méthode traditionnelle.

LES AUTRES MATERIAUX

Si les plastiques et les métaux sont les matériaux les plus utilisés, des expérimentations poussées ont été menées avec d'autres composants, notamment dans les domaines architectural, alimentaire et médical. Certaines imprimantes permettent de fabriquer des formes en chocolat ou en fromage, d'autres sont capables d'imprimer du tissu humain ou du cuir de vache, et d'autres encore ont été testées avec des matériaux de construction comme le béton.

Que va changer l'impression 3D ?

RENDRE LA FABRICATION ACCESSIBLE À TOUS

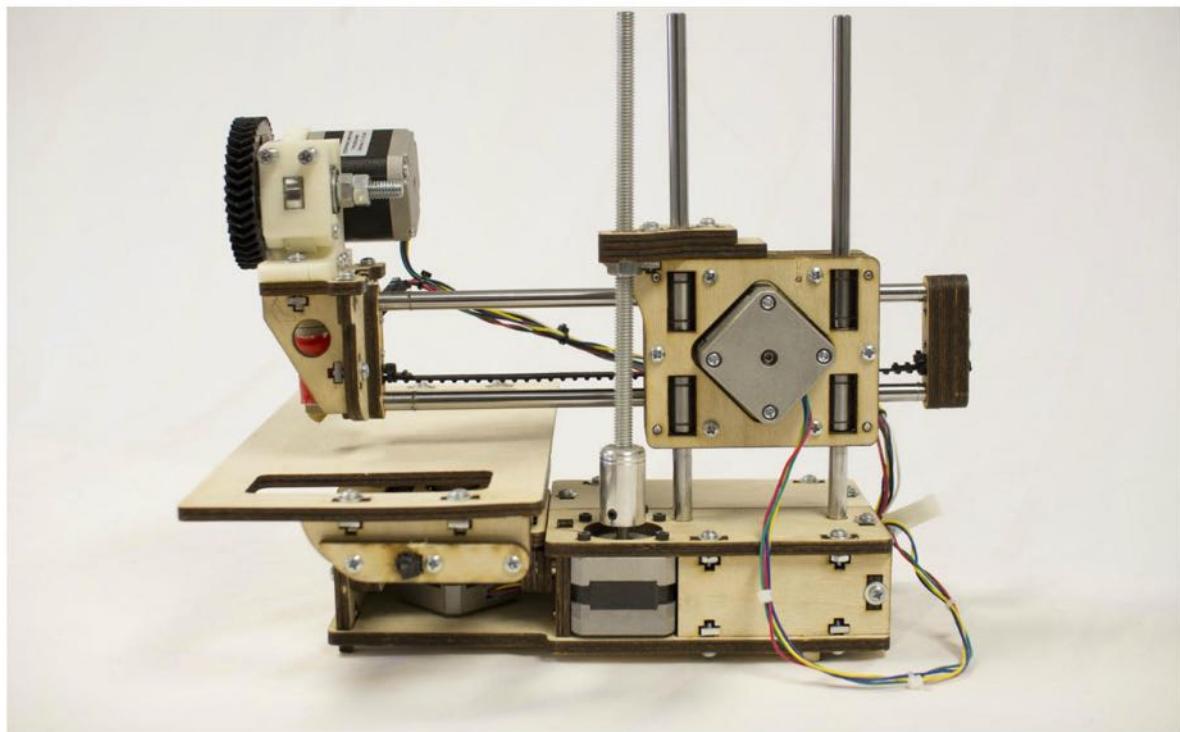
Le succès actuel des imprimantes 3D personnelles et des services d'impression 3D va de pair avec la naissance d'un écosystème complet autour de la fabrication digitale pour les particuliers. Désormais, il est très facile de se procurer sur Internet des fichiers d'objets prêts à imprimer, ou de customiser un design avant de l'envoyer en impression (ou de l'imprimer soi-même).

Un marché très prometteur

Terry Wohlers, spécialiste de la fabrication additive, estime que le marché de l'impression 3D devrait atteindre 3,7 milliards de dollars en 2015, et plus de 6 milliards en 2019 !

L'impression 3D ouvre ainsi le champ à un nouveau mode de production des objets usuels, qui devient l'affaire de tous. Les particuliers peuvent s'équiper de « machines à fabriquer » ou opter pour un service en ligne d'impression qui leur assurera un résultat de qualité professionnelle. Par ailleurs, des lieux de fabrication essaient un peu partout en France et dans le monde. Équipées d'imprimantes 3D, ces usines de quartier (comme les Fab Labs) sont des espaces où chacun peut trouver aide et soutien pour ses projets.

L'impression 3D porte en elle l'idée de redonner au consommateur un pouvoir sur les objets qui l'entourent. Avec l'accès aux fichiers de ces objets et à un moyen de production, il peut mieux les comprendre, les reproduire ou les modifier.



La Printrbot jr de Printrbot, une imprimante 3D personnelle à moins de 350 €. (Source : Printrbot)

FABRIQUER DES OBJETS SANS ASSEMBLAGE

Comparée aux techniques de fabrication actuelles, l'impression 3D est un bouleversement complet.

Actuellement, pour fabriquer un objet de manière industrielle, un ensemble d'actions sont nécessaires, telles que broyer, forger, plier la matière, réaliser des moules, couper, souder, coller ou assembler. Une grande quantité de matière est souvent perdue lors de cette phase, sans compter la masse d'énergie nécessaire pour la production. De plus, les machines utilisées ont généralement une fonction unique, chacune ayant sa place dans une chaîne de production longue et complexe. Cela implique de produire l'objet en grande quantité pour réduire les coûts et de concevoir son design de façon standardisée pour qu'il soit réalisable par la chaîne de production existante. Ce n'est donc pas l'usine qui s'adapte à l'objet, mais l'inverse.

En revanche, un objet créé par fabrication additive est généralement réalisé en un seul passage, avec une seule machine, ne requiert pas ou peu d'assemblage, et peut contenir des éléments mobiles. Cependant, un post-traitement est souvent nécessaire pour assurer, par exemple, la solidité ou l'étanchéité de la pièce.

RÉDUIRE LES COÛTS DE PRODUCTION

De véritables économies sont possibles grâce à l'impression 3D, car elle n'utilise que la matière nécessaire à la fabrication de l'objet ; celle qui ne sert pas peut être alors recyclée pour la réalisation d'un nouvel objet. Cet avantage concerne notamment l'impression 3D de métal, à la différence de l'usinage traditionnel où les pertes estimées de métal représentent 80 à 90 %, et la matière perdue n'est pas réutilisable.

Contrairement aux idées reçues, l'impression 3D permet aussi de gagner du temps en production. En effet, si le processus d'impression est généralement beaucoup plus lent que les autres méthodes de fabrication, le temps moyen de prototypage est en revanche considérablement réduit.

RÉALISER DES PIÈCES UNIQUES À LA DEMANDE

La customisation et la fabrication à la demande sont facilitées grâce à l'impression 3D. Alors qu'auparavant, la production de masse était nécessaire pour rentabiliser l'usinage d'un produit, il devient possible de créer des objets uniques, sans coût prohibitif.

Grâce à l'impression 3D, de nombreuses industries pourraient donc entrer dans l'ère de la customisation à grande échelle. Les objets seront fabriqués à la demande, en prenant en compte les goûts particuliers du consommateur. La technologie ira de pair



Un exemple d'objet personnalisé imprimé en 3D : les poupées personnalisées Makie. (Source : MakieLab)

avec le développement d'outils de customisation, en ligne ou hors ligne, qui permettront au consommateur de modifier les formes ou d'ajouter ses propres paramètres à l'objet.

IMAGINER LES OBJETS DE DEMAIN

Avec l'impression 3D, les designers et les ingénieurs peuvent inventer de nouvelles formes qui n'étaient jusqu'alors pas envisageables avec les procédés de fabrication traditionnels. Angles, frictions, formes complexes, etc., il est désormais possible de penser en dehors des standards. Les objets peuvent ainsi gagner en légèreté, en solidité et en rapidité d'assemblage.

Les 9 avantages de l'impression 3D

- Customisation à coût accessible.
- Design mieux optimisé.
- Production d'une grande variété de produits avec une seule imprimante.
- Possibilité de réaliser des objets très petits.
- Peu de pertes de matière.
- Pas de corrélation entre la complexité d'un objet et son coût.
- Production à la demande.
- Raccourcissement de la chaîne de production.
- Accès nouveau et facilité à la fabrication d'objets.

(Source : CSC)

LES DIFFÉRENTS PROCÉDÉS

Il n'existe pas une seule technique d'impression 3D, mais plusieurs en réalité, qui comportent chacune de nombreuses variantes. Elles ne nécessitent ni les mêmes équipements, ni les mêmes matériaux, et donnent des résultats sensiblement différents. Elles peuvent être classées grossièrement en trois grandes familles : les procédés basés sur la photopolymérisation (un matériau liquide est solidifié grâce à la lumière), ceux fonctionnant par liage de poudre (un liant vient encoller des particules) et ceux fonctionnant par dépôt progressif de matière.

Les principes de base

Avant d'expliquer le fonctionnement de ces différentes techniques, il convient de rappeler quelques principes de base qui sous-tendent toute impression 3D.

UNE TECHNIQUE DE FABRICATION ADDITIVE

L'impression 3D fonctionne toujours par ajout de matière, et non par soustraction comme la plupart des techniques traditionnelles de fabrication (fraisage, découpe...). Toutes les imprimantes 3D construisent l'objet en travaillant la matière couche après couche, selon le tracé indiqué par l'ordinateur relié à la machine. Ce qui varie d'un procédé à l'autre, c'est généralement la façon dont les couches sont créées.

UN PROCÉDÉ À COMMANDE NUMÉRIQUE

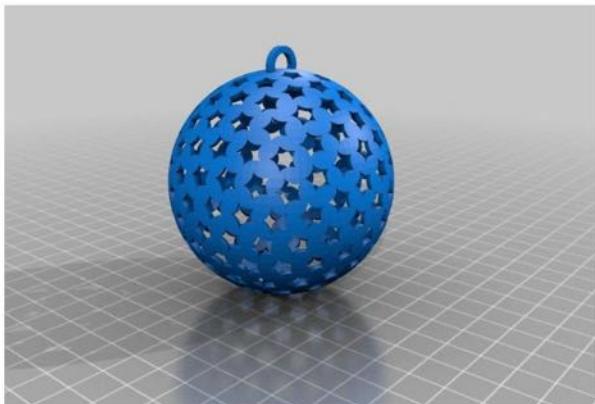
L'impression 3D est rendue possible grâce à une imprimante 3D. Cette machine, qui peut être de taille et d'aspect très divers, est toujours reliée à un ordinateur. Elle va de pair avec un ensemble de logiciels informatiques, qui permettent de préparer le fichier 3D pour l'impression et de positionner la pièce dans l'imprimante. Le processeur et le firmware présents dans l'imprimante reçoivent ensuite ces données et contrôlent toute la phase d'impression.

PAS D'IMPRESSION 3D SANS FICHIER 3D

Le fichier 3D est le prérequis indispensable à toute impression 3D : pour imprimer un objet, il faut son modèle 3D. Celui-ci doit être créé à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D ou généré à partir d'un scanner 3D (voir page 92), à moins qu'il existe déjà sur Internet, sur un site de partage de fichiers comme Thingiverse.

N'importe quel modeleur 3D peut convenir pour créer un fichier utilisable par une imprimante 3D. Certains sont simples d'emploi (SketchUp, Tinkercad, Autodesk 123D, 3DTin), tandis que d'autres sont mieux adaptés aux particularités de l'impression 3D (OpenSCAD, FreeCAD, Blender). Mais dans tous les cas, le format final de ce fichier doit être du STL, le seul accepté actuellement par toutes les imprimantes 3D (voir page 97).

À ce jour, une imprimante 3D ne peut donc en aucun cas fabriquer un objet à partir d'un simple croquis ou d'une illustration en 2D.



À gauche, fichier 3D d'une boule de Noël, mis à disposition par l'utilisateur pmoews sur le site Thingiverse.com.
À droite, boules de Noël imprimées en 3D à partir de ce fichier. (Source : pmoews)

L'impression 3D par photopolymérisation

La photopolymérisation est un procédé d'impression 3D qui utilise des polymères liquides capables de se solidifier à la lumière. Elle est à la base de la plus ancienne technique d'impression 3D, la stéréolithographie. Elle est aussi employée dans les technologies DLP (*Digital Light Processing*) et PolyJet.

LA STÉROLITHOGRAPHIE

Solidification d'un liquide par rayon laser

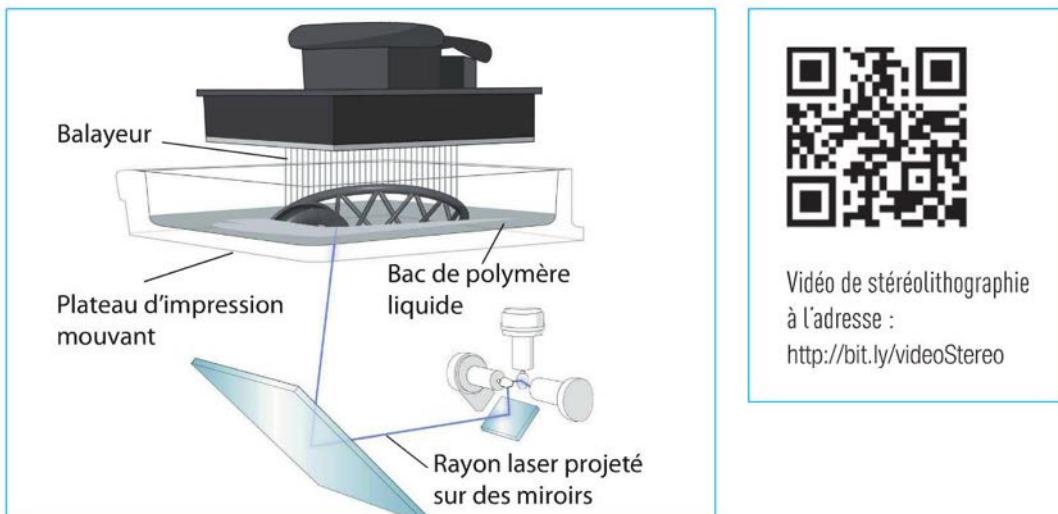
La stéréolithographie (ou SLA) est la première technique d'impression 3D à avoir vu le jour, mise au point en 1986 par l'entreprise 3D Systems. Elle est équipée d'un rayon laser ultraviolet permettant de solidifier couche par couche des photopolymères liquides.

Qu'est-ce qu'un photopolymère ?

Les photopolymères sont des substances synthétiques dont les propriétés physiques se modifient au contact de la lumière. Les photopolymères liquides sont sensibles aux rayons ultraviolets et durcissent au contact du laser.

Les imprimantes SLA sont pourvues d'un réservoir rempli de plusieurs litres de photopolymères liquides, d'une plate-forme mobile immergée dans ce réservoir, d'un laser à rayon ultraviolet, et d'un ordinateur qui commande le laser et la plate-forme mobile.

À l'instar de tout procédé d'impression 3D, le logiciel de la machine vient d'abord analyser le fichier CAO et le découpe en tranches très fines, de 0,05 à 0,1 mm d'épaisseur. Il prépare aussi le fichier pour qu'il devienne un véritable objet physique, en ajoutant un socle et des attaches provisoires pour les parties qui pourraient tomber. Ces supports ne sont nécessaires que durant le temps de l'impression et seront ensuite dissous.



L'impression 3D par stéréolithographie. (Source : James Delaney, Form Labs Inc.)



Vidéo de stéréolithographie
à l'adresse :
<http://bit.ly/videoStereo>

La qualité du fichier et de son découpage est essentielle à la réussite de l'impression. Puis intervient le laser, qui dessine la première tranche selon les indications envoyées par l'ordinateur de l'imprimante. En passant sur la surface du bac, le rayon laser solidifie les photopolymères liquides exposés à la surface, créant la première tranche de l'objet. La plate-forme mobile descend ensuite d'une fraction de millimètre pour que le laser puisse tracer la tranche suivante.

Le procédé est répété, couche après couche, jusqu'à obtention complète du modèle. À la fin de l'impression, la plate-forme remonte et il est alors possible de récupérer l'objet.

Vient alors la phase de finition. L'objet est rincé dans un solvant, puis placé dans un four ultraviolet qui permet de le nettoyer entièrement, de dissoudre toutes les attaches de support et de renforcer sa solidité.

Avantages et inconvénients

La stéréolithographie présente des avantages certains en termes de précision d'impression, de qualité des détails et de finition. C'est l'une des technologies les plus abouties du marché, mais aussi l'une des plus coûteuses (matériaux, complexité du dispositif).

La SLA permet la fabrication de pièces de grande qualité, avec une tolérance par rapport au design initial de 0,005 mm. La finition au four solidifie durablement l'objet mais peut aussi le déformer très légèrement. La SLA permet également de réaliser de très grandes pièces,

ce qui est rare parmi les procédés actuels. Certaines imprimantes SLA, comme les modèles Mammoth, peuvent réaliser des objets de plus de 2 mètres de diamètre.

L'un des inconvénients majeurs de la stéréolithographie est le choix très limité de matériaux d'impression disponibles et l'impossibilité d'imprimer en couleurs. Les polymères liquides utilisés pour l'impression se traduisent par un rendu semi-transparent, qui se révèle fragile et souvent inadapté à la production d'objets. Les pièces fabriquées à partir de la SLA nécessitent donc presque toujours un travail de finition (vernissage, peinture, chromage, enduit...) et sont pour l'instant principalement utilisées à des fins de prototypage et de présentation.



Prototype d'une cafetière Alessi (deux types de plastiques), réalisé en stéréolithographie à l'aide d'une imprimante professionnelle ProJet HD 3000. (Source : 3D Systems)

lération est obligatoire en raison des fumées toxiques qui s'échappent des polymères et des solvants. C'est pourquoi, à l'heure actuelle, la stéréolithographie n'est surtout employée que par les grands groupes industriels capables d'investir dans ce procédé (dans l'aéronautique, l'automobile, la défense) et par de rares services d'impression 3D.

De nouveaux acteurs, comme Formlabs ou B9Creator, cherchent pourtant à rendre la stéréolithographie accessible aux plus petites entreprises et aux particuliers. Ils proposent désormais de petites imprimantes à stéréolithographie qui peuvent fonctionner sur un bureau.

L'impression par SLA s'avère assez lente. Selon la taille et le nombre d'objets créés, le laser peut mettre jusqu'à 1 ou 2 minutes par tranche. Le temps moyen d'impression est généralement compris entre 6 et 12 heures. Pour les objets les plus gros, elle peut même se dérouler sur plusieurs jours. En revanche, une fois lancée, la machine ne demande aucune surveillance particulière et peut fonctionner la nuit sans aucun risque.

Le procédé demeure très coûteux. En effet, les imprimantes SLA et les polymères utilisés sont parmi les plus chers du marché. Par ailleurs, les machines nécessitent des équipements adaptés. Un système de ventilation

LE PROCÉDÉ DLP

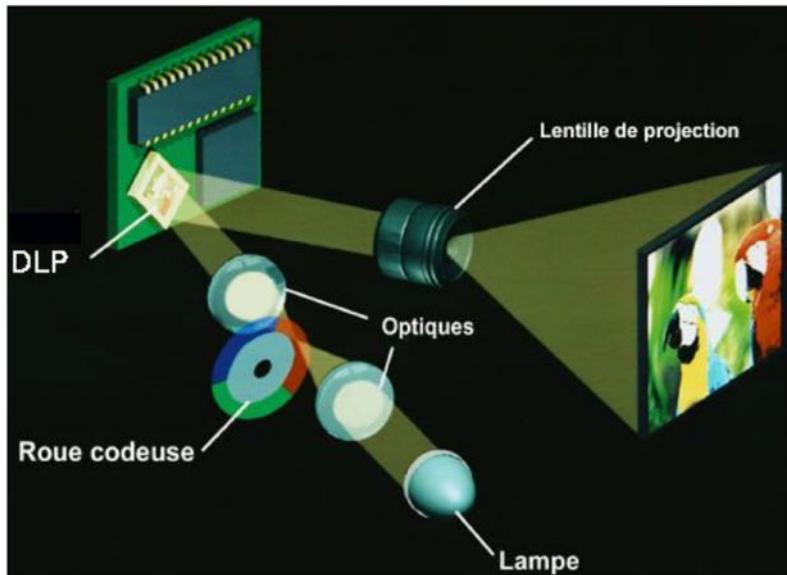
Du projecteur à l'objet solide

Tout comme la stéréolithographie, la DLP (*Digital Light Processing*) fonctionne aussi par exposition de polymères liquides à la lumière. Ce procédé a été utilisé pour la première fois par la société EnvisionTEC, un équipementier allemand spécialisé dans le prototypage rapide, qui voulait s'en servir pour investir les marchés de la prothèse dentaire, de la bijouterie et des aides auditives.

Ici, la lumière qui permet le processus de photopolymérisation vient d'une minuscule puce qui balaye très rapidement la surface du réservoir – elle a été développée par le Dr Larry Hornbeck de Texas Instruments en 1987. Cette puce contient jusqu'à deux millions de miroirs microscopiques (de la taille du cinquième d'un cheveu humain) qui assurent un rendu extrêmement précis. On la retrouve sur la plupart des projecteurs en salles de conférence.

Une imprimante DLP est donc équipée de ce même type de projecteur, la lumière étant orientée en direction de l'objet sur la plate-forme. Les rayons UV passent à travers la puce et les miroirs, qui sont contrôlés par un système électronique complexe et font ou non filtrer la lumière en fonction du tracé de l'objet prévu par l'ordinateur.

À la différence de la SLA, la DLP n'implique aucun déplacement de lumière sur l'axe horizontal, mais seulement un abaissement progressif de la plate-forme sur l'axe vertical. Grâce à ce fonctionnement spécifique, ce type d'impression est 2 à 5 fois plus rapide que la SLA.



Vidéo du procédé DLP
à l'adresse :
<http://bit.ly/videoDLP>

Fonctionnement du projecteur DLP. (Source : EreNumerique.fr)

Avantages et limites

Le principal avantage de la DLP est de réduire d'un tiers les coûts d'impression par rapport à la SLA. Elle permet de fabriquer des pièces en plastique très solides avec une finition de surface capable de rivaliser avec les technologies de moulage par injection. La précision moyenne d'une imprimante DLP comme la ZBuilder est de 0,2 mm.

Le micromètre (μm)

Le micromètre (symbole μm) est un sous-multiple du mètre qui fait partie des unités de longueur du système international d'unités (SI). 1 μm vaut 0,001 millimètre. Jusqu'en 1968, le micromètre était appelé micron ; aujourd'hui, on emploie indifféremment les deux termes.

Les matériaux utilisés par la DLP sont aussi plus variés que pour la SLA, avec une résine de base aux performances proches de l'ABS. D'autres matériaux ont été développés comme la résine claire ou les cires de moulage, et la recherche avance à grands pas dans ce domaine.

La DLP est bien plus rapide et précise que le procédé FDM (voir page 31). Elle permet de produire des modèles de haute précision en un temps record : il ne faut ainsi que 8 secondes pour solidifier une couche de 0,1 mm.



Aides auditives imprimées par DLP sur une machine EnvisionTEC. (Source : EnvisionTEC)

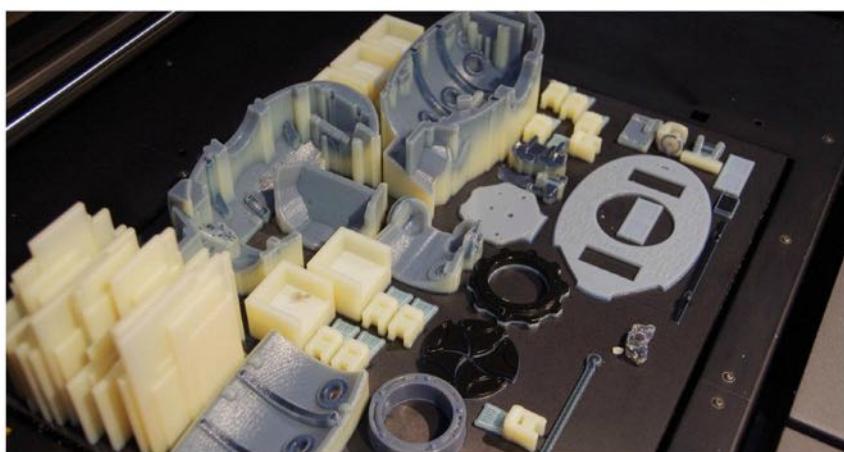
LA TECHNOLOGIE POLYJET

Mise en œuvre en 1999 par l'entreprise Objet, la technologie PolyJet emploie elle aussi la technique de photopolymérisation, mais d'une façon tout à fait différente de la SLA et de la DLP. Là encore, le logiciel de la machine vient diviser la modélisation 3D en tranches très fines et prévoit les attaches de support qui seront nécessaires au bon déroulement de l'impression.

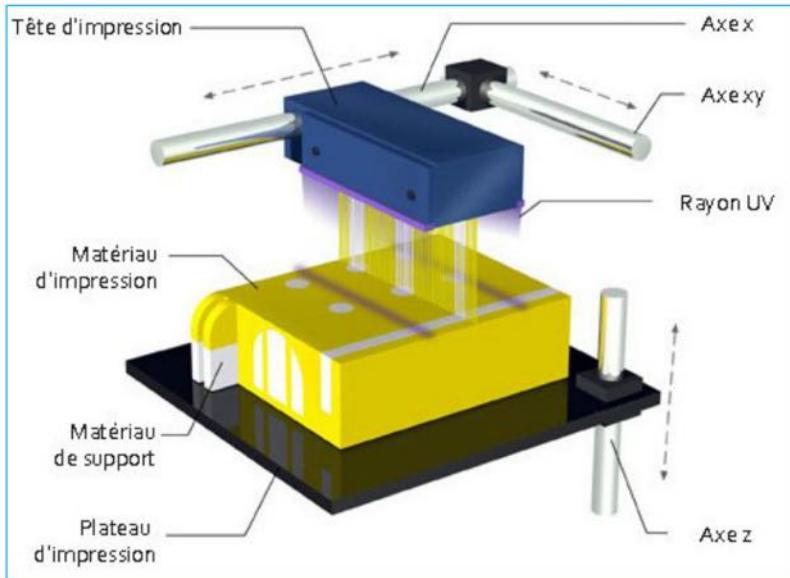
L'objet est alors fabriqué par jets successifs de photopolymères sur une surface, couche après couche, jusqu'au résultat final. La matière est projetée sur la plate-forme en respectant avec précision le tracé de la pièce. Un traitement ultraviolet est appliqué dès qu'une couche est déposée, ce qui permet de durcir immédiatement le matériau.

La pièce est ensuite passée à l'eau pour la débarrasser de ses attaches de support, puis elle est nettoyée. Le matériau de support étant un gel soluble à l'eau, c'est là l'un des avantages majeurs de la technologie PolyJet puisqu'elle ne nécessite aucune phase longue de finition.

Dans la variante PolyJet Matrix, il est possible d'imprimer simultanément plusieurs types de matériaux aux propriétés physiques et mécaniques différentes. L'utilisateur peut même concevoir ses propres matériaux composites, appelés Digital Materials. Ce procédé de double jet permet, par exemple, de combiner matériaux souples et rigides, ou transparents et opaques, entre autres.



Pièces réalisées par le procédé PolyJet. (Source : Stratasys-Objet)



Vidéo du procédé PolyJet
à l'adresse :
<http://bit.ly/videoPolyJet>

Fonctionnement de la technologie PolyJet. (Source : Objet)

Chacun des matériaux a alors son système de stockage dédié. Parmi les huit têtes d'impression généralement disponibles sur la machine, deux sont désignées pour chaque matériau. Chaque tête d'impression est équipée de 96 embouts.

La force de la technologie PolyJet Matrix réside en grande partie dans le logiciel Objet Studio qui rend possible le contrôle minutieux de l'ensemble du procédé, et notamment la gestion des fichiers .stl combinant plusieurs matériaux.

L'impression multimatériaux

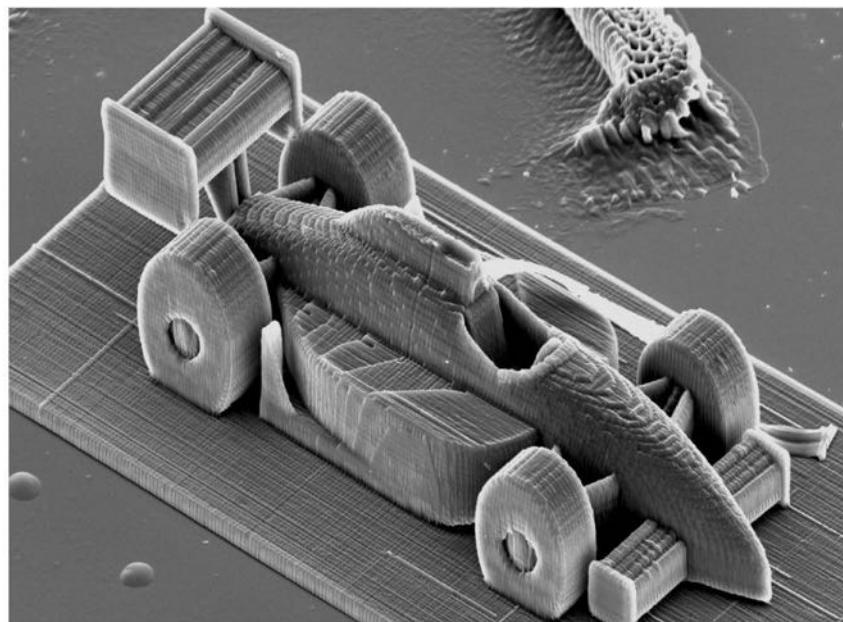
Les techniques PolyJet et PolyJet Matrix ont pour principal atout d'offrir un large choix de matériaux d'impression, aux caractéristiques très différentes. La possibilité de créer à la demande son propre matériau composite offre un avantage certain en cas de besoins très spécifiques. Par leurs particularités (résistance à l'étirement, point de cassage...), les Digital Materials permettent d'envisager des prototypes aux propriétés quasi similaires au design final.

LA 2PP : L'IMPRESSION 3D À ÉCHELLE NANOSCOPIQUE

La 2PP (*Two-Photon Polymerization*) est une technique qui permet de fabriquer des objets à échelle nanoscopique (1 nanomètre = 1 milliardième de mètre), avec des résolutions pouvant atteindre 100 nm. Un laser à lumière pulsée, émettant habituellement à 800 nm, est concentré sur une solution photopolymère. La polymérisation intervient uniquement à l'endroit où la lumière est la plus intense. Avec cette technique, il devient possible d'imprimer des objets uniquement visibles au microscope. Aucune attache de support n'est nécessaire.

Jusqu'à présent, la 2PP était limitée par les temps de préparation et d'impression qui pouvaient s'avérer très longs (100 µm/s). Grâce au développement de nouveaux matériaux photopolymères et d'une nouvelle machine, l'université de Vienne a annoncé en mars 2012 qu'elle avait réussi à augmenter considérablement la vitesse d'impression en 2PP, passant à 5 µm/s.

Une voiture de course de $330 \times 130 \times 100 \mu\text{m}$, composée de 100 couches avec une moyenne de 200 lignes de polymères, a pu être ainsi imprimée en quatre minutes avec une précision d' $1 \mu\text{m}$ par rapport au fichier CAO initial.



Prototype de voiture de course réalisé avec le procédé 2PPL, de l'ordre du dizième de millimètre ! (Source : TU Wien)

L'impression 3D par liage de poudre

L'impression 3D par liage de poudre regroupe les procédés de frittage laser SLS et DMLS, ainsi que les techniques E-Beam, EBF³ et 3DP. Leur particularité est d'utiliser la poudre comme matériau de base, qui est fusionnée selon des techniques variées. Le principal avantage de la poudre est d'offrir une grande diversité de matériaux pouvant être imprimés, le métal étant l'une des grandes avancées du domaine.

LE FRITTAGE LASER

Un laser pour fusionner les particules de poudre

La technologie SLS (*Selective Laser Sintering*), appelée aussi frittage laser, a été mise au point par la société EOS, basée en Allemagne. Grâce à un laser très puissant, elle permet de fusionner de fines particules de poudre. Comme pour les autres techniques d'impression 3D, un logiciel découpe tout d'abord le fichier CAO en tranches fines. L'impression 3D peut alors commencer.

Le bac de poudre est préchauffé dans la machine, à une température se situant juste sous le point de fusion. Un rouleau vient étaler une couche très fine de poudre (0,1 mm d'épaisseur) sur la plate-forme d'impression. Le laser passe alors sur la poudre en suivant le tracé déterminé par l'ordinateur, et fait fondre les particules jusqu'au point où elles fusionnent entre elles.

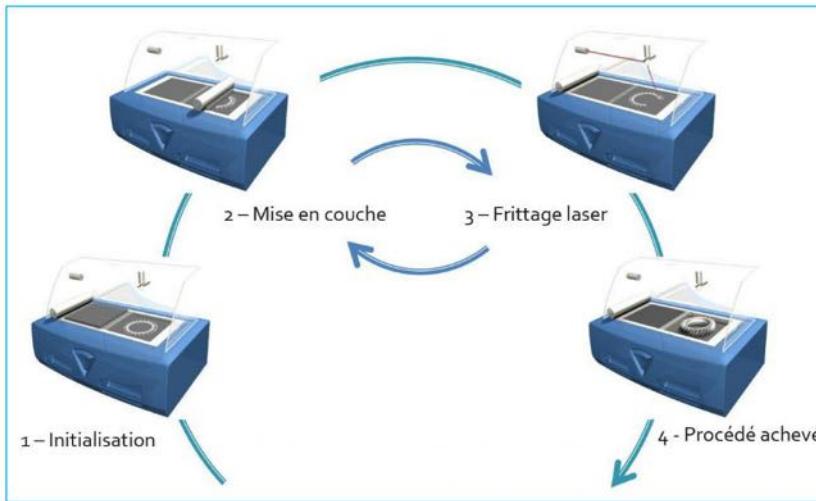
Une fois la tranche fusionnée, le rouleau passe une nouvelle couche de poudre et le laser passe à nouveau. Le processus se poursuit jusqu'à la fabrication complète de l'objet. La pièce doit être enfin retirée du bac de poudre et nettoyée pour la débarrasser des particules qui n'ont pas fusionné.

Le matériau de base du procédé de frittage laser n'est donc pas liquide mais poudreux. Il peut s'agir de poudre de plastique, de céramique, de verre ou de métal – on parle alors de *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS). La plupart des imprimantes utilisent cependant des poudres mêlant deux composants, la seule contrainte étant d'obtenir des particules uniformes et très fines, de l'ordre de 50 µm. Le matériau le plus courant est le polyamide, qui permet de réaliser des prototypes et des objets finis. La poudre est de couleur blanche, mais elle peut être colorée après impression.

Dans le procédé DMLS, le rayon laser passe également sur un bac de poudre, mais de métal cette fois. Avec un laser à fibre optique de 200 watts, on peut fabriquer un objet avec une épaisseur de couche de 20 µm.



Modèle conceptuel de chaussure imprimé par frittage laser de poudre de polyamide sur une imprimante EOS.
(Source : Janina Alleyne)

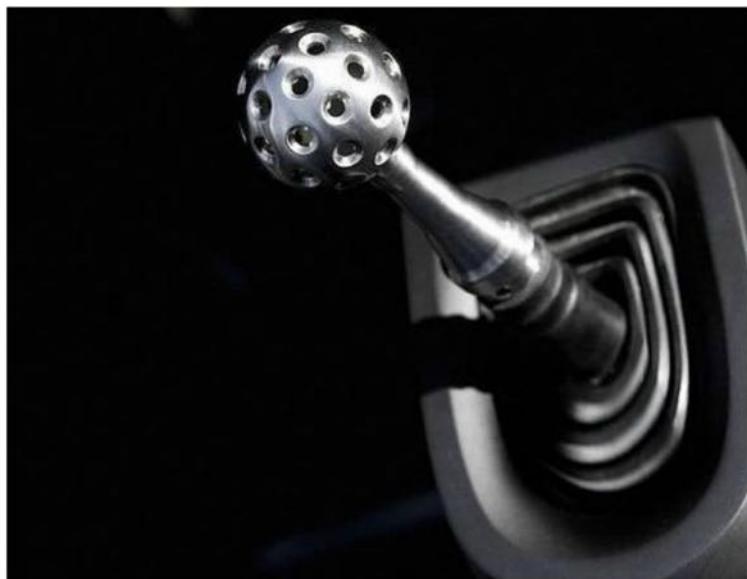


Vidéo du procédé SLS
à l'adresse :
<http://bit.ly/videoSLS>

Schéma explicatif du procédé d'impression 3D par frittage laser.

(Source : Phenix Systems)

Les métaux utilisables en DMLS sont l'acier inoxydable, l'acier d'outillage maraging (type d'acier à caractéristiques mécaniques élevées), le cobalt-chrome, l'Inconel 625, l'Inconel 718 et le titane Ti6AlV4. Théoriquement, presque tous les métaux sont compatibles avec ce procédé, à condition d'être convenablement préparés, c'est-à-dire rendus à l'état de poudre homogène.



Levier de vitesse Volkswagen en acier inoxydable, réalisé par frittage laser de poudre de métal sur une imprimante EOS. (Source : EOS Automotive)

Une technique rapide et économique en matériaux

La précision standard du frittage laser est de 0,1 mm : cette technique est donc moins précise que la SLA. L'épaisseur minimale des parois est de 0,7 mm et la taille des pièces ne peut être supérieure à 700 × 580 × 380 mm. Il s'agit d'un procédé plutôt économique en matériaux puisque la poudre non employée pendant l'impression n'est pas affectée par la proximité du laser et peut être réutilisée lors de la prochaine impression.



Moule de balle de golf en acier inoxydable, imprimé en 3D par DMLS. (Source : Incept 3D)

La surface des impressions 3D à base de poudre est généralement d'apparence sableuse et assez rugueuse au toucher, contrairement à la stéréolithographie qui produit des pièces plus douces et uniformes. Les possibilités de finition sont variées : les pièces peuvent notamment être poncées ou peintes pour un fini plus lisse et uniforme. Selon le matériau, le résultat peut s'avérer assez poreux.

Grâce au frittage laser, il est possible de fabriquer des pièces à partir de matériaux comme le métal ou la céramique, ce qui reste encore très rare avec les autres procédés d'impression 3D. Les applications de la SLS sont très variées : outils, dentisterie, aéronautique, industrie automobile, architecture, décoration, design...

Les conditions à réunir pour aboutir à une impression de grande qualité sont assez complexes : régularité des grains, choix de la longueur d'onde du laser, qualité du logiciel de fabrication, etc. Beaucoup de paramètres sont donc à prendre en compte pour fabriquer des objets d'une grande précision.

Les constructeurs d'imprimantes SLS

Les principales entreprises du secteur sont européennes. Citons notamment la société EOS, fondée en 1989 et implantée en Allemagne, qui fut la première à commercialiser un procédé d'impression DMLS pour du titane. Ayant comme clients BMW, Mercedes-Benz ou encore Electrolux, ce constructeur a vendu plus de 1 000 imprimantes à frittage laser dans le monde.

Autre entreprise spécialisée dans ce domaine, Phenix Systems a été créée en 2000 au sein de l'École nationale supérieure de céramique industrielle, spécialiste du frittage laser de poudre. Grâce à son catalogue de brevets et son savoir-faire très particulier sur l'utilisation de poudres fines (dont la granulométrie moyenne se situe entre 6 et 9 μm), cette société française est devenue un acteur important dans le secteur des équipements de production par ajout de matière.

LE PROCÉDÉ E-BEAM

Fusionner le métal avec un laser à électrons

La technologie E-Beam, ou EBM (*Electric Beam Melting*), a été mise au point par la société suédoise Arcam. L'impression est réalisée à partir d'une poudre de métal, fondu par un laser à électrons dans une chambre à vide, à une température comprise entre 700 et 1 000 °C. Les électrons, projetés à très grande vitesse à travers un faisceau étroit, permettent de faire fondre et de fusionner les particules de métal, couche après couche.

L'EBF³, aussi appelée EBDM (*Electron Beam Direct Manufacturing*), est une variante de l'E-Beam. Elle permet d'imprimer en 3D dans des environnements zéro gravité. Le procédé a été développé par une équipe d'ingénieurs de la NASA. Là encore, un faisceau d'électrons passe dans un câble sur une plate-forme de positionnement enfermée dans un caisson en aluminium. Conçue spécialement pour fabriquer des pièces en métal, l'EBF³ permet de travailler une grande variété de métaux (titane, aluminium, nickel, acier inoxydable...). Il est aussi possible de réaliser des pièces mêlant différents alliages.

Avantages et limites

Ces nouveaux procédés de prototypage rapide visent à dépasser en qualité, en vitesse et en rentabilité les techniques classiques de fabrication soustractive. L'EBF³ y parvient en réduisant les coûts des matériaux (réutilisation de ceux non imprimés) et en augmentant la solidité des pièces fabriquées. À la différence des techniques DMLS, le métal employé n'est pas une version dégradée. Le Ti6Al4V (titane, aluminium, vanadium, fer et oxygène) et l'Al 2219 (cuivre et aluminium) sont les alliages recommandés, réputés pour leur grande robustesse et leurs propriétés thermiques.

Autre avantage, les matériaux non fusionnés lors du procédé EBF³ sont immédiatement réutilisables pour une prochaine impression. Ce n'est pas le cas de la technique E-Beam, qui exige de certifier à nouveau les résidus avant de les imprimer.

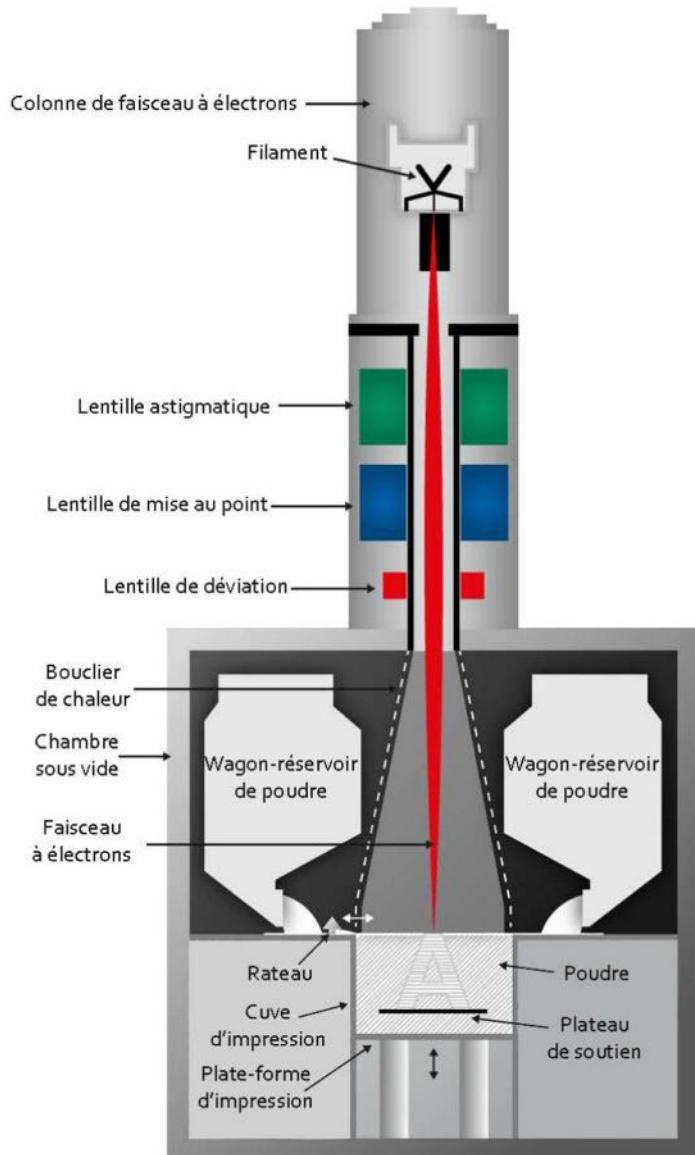


Schéma de fonctionnement d'une imprimante E-Beam. (Source : Arcam)

LA TECHNIQUE 3DP

Des impressions 3D polychromes

3DP, ou *Three-Dimensional Printing*, est le nom de la technologie inventée au MIT et dont la licence est détenue par la société Z Corporation, rachetée par 3D Systems en janvier 2012. La gamme d'imprimantes ProJet X60 est équipée de ce procédé, qui est à ce jour le seul au monde, avec la technique SDL de laminage papier par dépôt sélectif, à permettre des impressions 3D simultanées de plusieurs centaines de milliers de couleurs.

La technologie 3DP fonctionne par abaissements successifs d'une plate-forme sur laquelle un rouleau étale une très fine couche de poudre. Une tête d'impression dépose ensuite de minuscules gouttes de glue qui viennent encoller le matériau en poudre. La coloration est réalisée grâce à l'utilisation de glues teintées : il faut en combiner quatre pour arriver à la couleur désirée. Ce processus par dépôts successifs de poudre et de glue est renouvelé à chaque abaissement de la plate-forme d'impression, jusqu'à obtention de l'objet. Un traitement de finition est enfin appliqué : la pièce imprimée est chauffée et la poudre excédentaire supprimée.

Les possibilités de ce procédé sont très variées dans la mesure où de nombreux matériaux peuvent être utilisés (céramique, métal, polymères, composites). La 3DP permet par ailleurs d'exercer un contrôle localisé sur certains aspects de l'impression : composition des matériaux, microstructures ou encore texture de la surface.



Un objet sort de la poudre après impression par 3DP. (Source : 3D Systems)

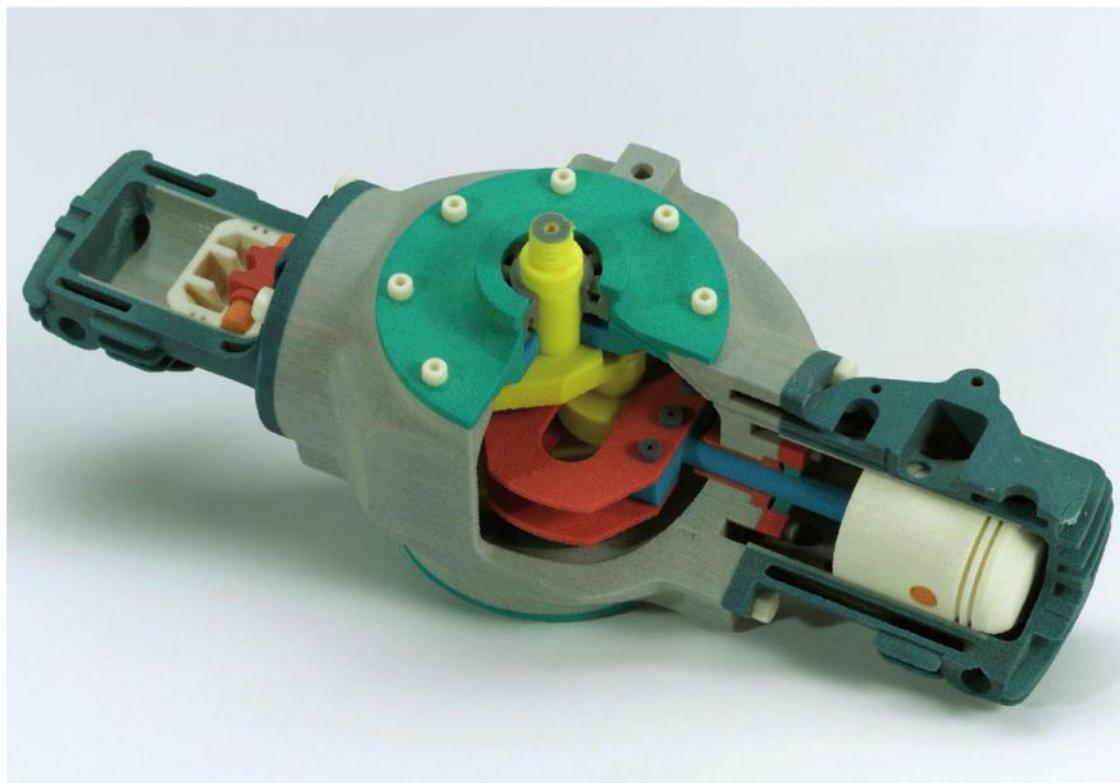
Grâce aux têtes d'impression, des matériaux liquides ou mous peuvent être utilisés. Il est aussi possible de créer des designs contenant des formes en surplomb, en filet et des volumes internes, la seule contrainte étant qu'il y ait l'espace suffisant pour enlever la poudre en surplus.

Avantages et limites

La 3DP comporte de nombreux avantages, notamment en termes de précision et de choix de matériaux. Elle a été la première à permettre l'impression en céramique, et elle est l'une des technologies pionnières pour l'impression 3D en métal.

La force principale de la 3DP est son coût de revient. En effet, le prix des imprimantes 3DP peut descendre jusqu'à 1/6^e de celui des machines à stéréolithographie. Mais en contrepartie, la qualité d'impression est souvent moindre, avec un degré de précision variable.

Six entreprises seulement possèdent les droits d'utilisation de la technologie 3DP : ExtrudeHone, Soligen, Specific Surface Corporation, TDK Corporation, Therics et Z Corporation-3D Systems. Elles sont réparties dans des domaines de production très variés.



Prototype de moteur réalisé par procédé 3DP sur une imprimante X60. (Source : Undo Prototipos/3D Systems)

La principale limite de la 3DP porte sur la fragilité des pièces fabriquées, qui se révèlent plus cassantes que celles réalisées avec d'autres procédés comme la SLA ou la DLP. Par ailleurs, leur texture est plutôt rugueuse.

LES TECHNIQUES À JET D'ENCRE

Les techniques à jet d'encre sont moins employées que le frittage laser ou la 3DP, avec lesquels elles ont quelques similitudes. Les constructeurs 3D Systems, avec ses modèles ProJet, et Stratasys, qui a racheté l'entreprise spécialisée Solidscape, se partagent le marché. Appelées aussi MJM (*Multi-Jet Modeling*), les imprimantes à jet d'encre utilisent la cire fondu comme matière première, ce qui les rend très adaptées à la fabrication de moules.

Comme une imprimante papier classique, l'imprimante 3D à jet d'encre propulse la matière couche par couche, tandis qu'une glue spéciale est déposée de façon à solidifier l'objet au fur et à mesure. Ce procédé présente l'inconvénient de nécessiter des matériaux aux propriétés physiques particulières (faible viscosité tout en présentant une tension suffisante sur la plate-forme d'impression). Par ailleurs, il requiert l'utilisation d'une grande quantité de matière.

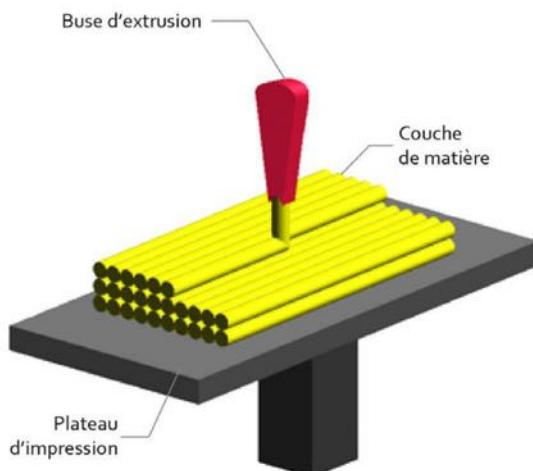
L'impression 3D par dépôt de matière fondu

Les techniques que nous venons de présenter se servent de la lumière ou d'un liant pour solidifier la matière, liquide ou en poudre. La matière est contenue dans un bac et le lit d'impression se déplace pour laisser apparaître la partie à solidifier. Il existe un autre type d'impression 3D, consistant à déposer la matière au fur et à mesure. Il s'agit de la technique du dépôt de filament fondu ou FDM (*Fused Deposition Modeling*).

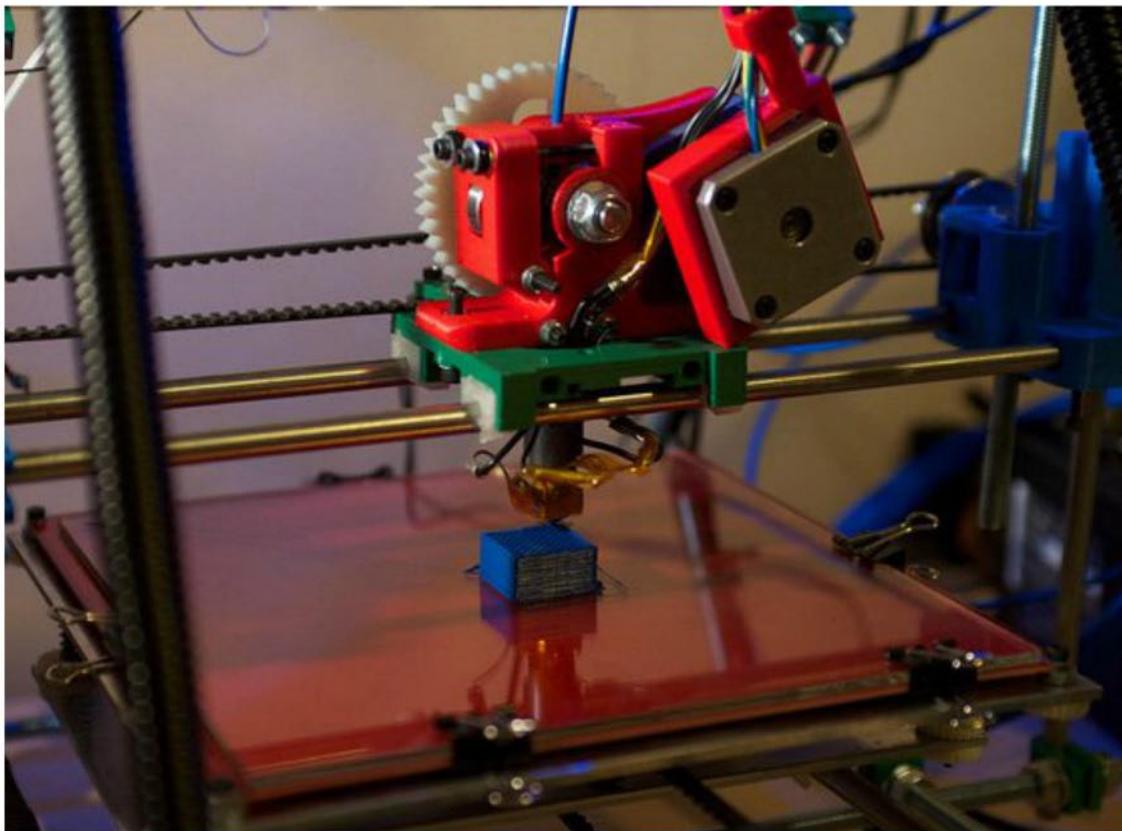
LA TECHNIQUE FDM

La FDM a été développée à la fin des années 1980 par S. Scott Crump, cofondateur de la société Stratasys, et commercialisée dans les années 1990. Après la stéréolithographie, c'est le procédé d'impression 3D le plus ancien. Il a été récemment popularisé par l'arrivée des imprimantes 3D personnelles menées notamment par le projet RepRap et la société MakerBot.

Cette technique fonctionne par dépôts successifs d'un filament de plastique ou de métal. Une buse d'extrusion, par laquelle passe ce filament, vient déposer la matière en suivant le chemin défini par le fichier CAO. Elle est chauffée à plus de 185 °C, faisant fondre le matériau au fur et à mesure de l'impression. La matière est déposée en couches très fines (0,04 mm d'épaisseur en moyenne). L'objet est donc construit couche après couche, de la base à son sommet.



Fonctionnement de l'impression 3D par dépôt de filament fondu. (Source : Zureks)



RepRap Prusa Mendel en action. Le filament de PLA (abréviation de *polylactic acid*, acide polylactique en français) fondu passe par la tête d'impression chauffante et se dépose petit à petit sur le lit d'impression. (Source : John Biehler)

Les matériaux utilisés par la FDM sont généralement des thermoplastiques de type ABS ou PLA. Certaines imprimantes acceptent aussi les polycarbonates (PC), les polycaprolactones, les polyphénylsulfones (PPSF), l'ULTEM 9085 (un type de plastique connu pour sa résistance au feu et particulièrement adapté à l'aéronautique) et des cires. La tête d'impression peut être remplacée, dans certains cas, par une seringue qui permet alors de déposer d'autres types de composants comme des aliments (les imprimantes Fab@Home peuvent ainsi imprimer du fromage) ou des cellules (les imprimantes Organovo sont spécialisées dans ce domaine).

Pour les structures temporaires de support, on se sert d'un matériau soluble à l'eau, qui se dissout rapidement grâce à un équipement dédié utilisant une solution d'hydroxyde de sodium.

FDM, une marque déposée

L'appellation *Fuse Deposition Modeling* et son abréviation FDM sont des marques déposées de Stratasys. Les créateurs du projet RepRap, ainsi que toutes les entreprises nées de ses dérivés, ne peuvent donc pas employer le terme FDM même si leur technique est strictement la même.

L'équipe RepRap parle donc de *Fused Filament Fabrication* (FFF), sous licence GNU/GPL. D'autres dénominations existent, comme *Molten Polymer Deposition* (MPD). En français, on appelle ce procédé « dépôt de filament fondu » ou « dépôt de fil fondu ».

AVANTAGES ET LIMITES

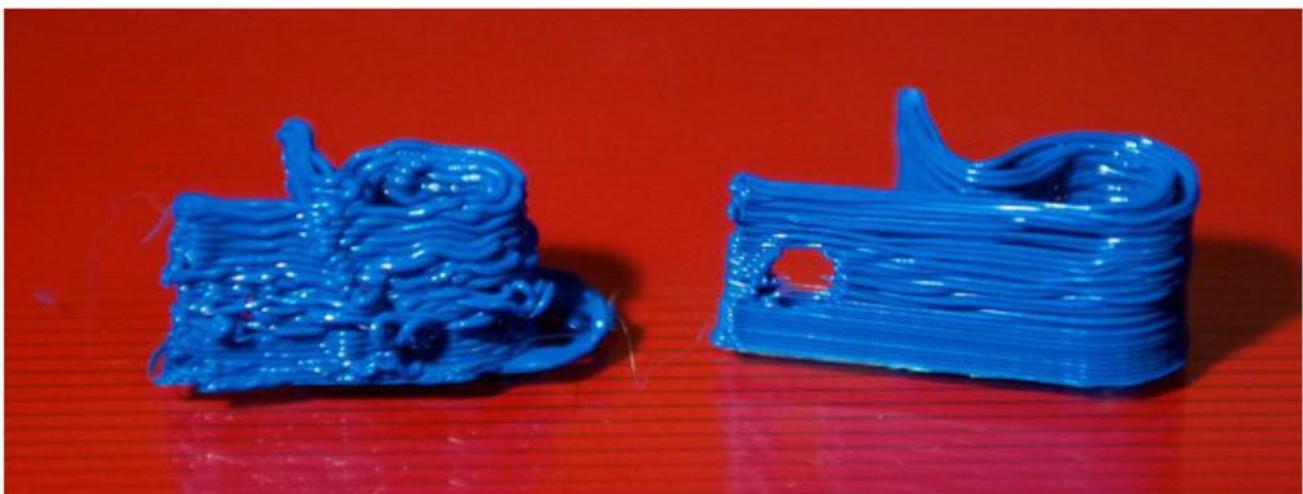
La FDM est une technologie utilisée par une grande variété d'imprimantes 3D. La qualité de l'impression, le coût et le choix des matériaux varient donc énormément selon le type de machine.

Avec la FDM, de nombreux matériaux sont envisageables. Les plastiques de type ABS ou PLA sont généralement privilégiés, avec un large choix de coloris (rouge, jaune, vert, bleu, gris, blanc, noir, entre autres).

Le principal avantage de la FDM réside dans sa simplicité d'utilisation et la variété des usages possibles. Elle est aussi plus rapide que d'autres techniques d'impression, mais la précision n'est pas toujours au rendez-vous, notamment pour les imprimantes personnelles fournies en kit qui nécessitent de paramétriser soi-même la configuration en fonction du matériau. Par ailleurs, le filament est parfois difficile à maîtriser.



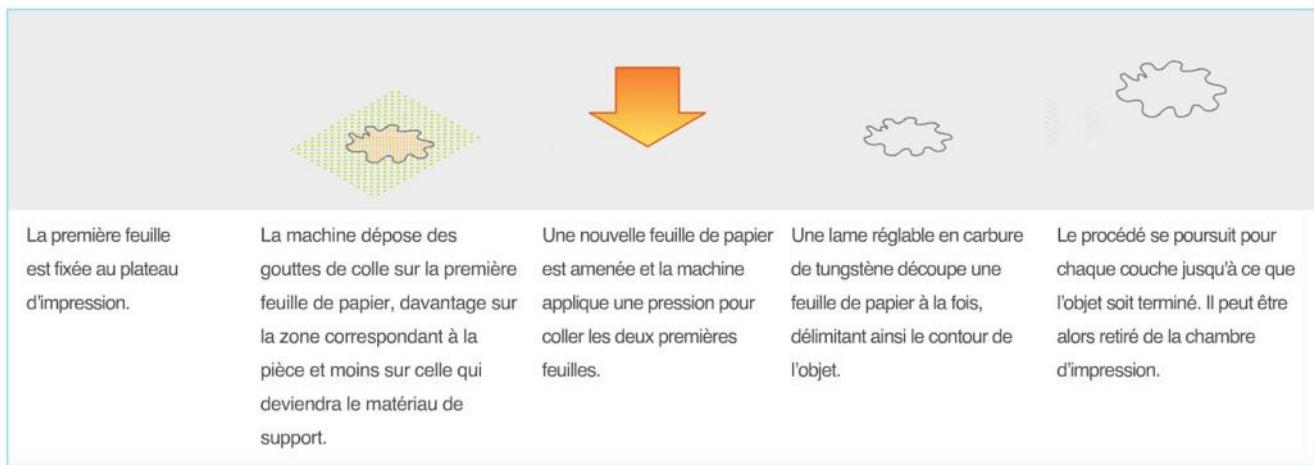
Vidéo du procédé FDM
à l'adresse :
<http://bit.ly/videoFDM>



Exemples de pièces imprimées sur la même imprimante personnelle (une RepRap Prusa Mendel) : à gauche, la pièce avant configuration de la machine ; à droite, le résultat après. (Source : John Biehler)

L'impression 3D par encollage de papier

Le laminage par dépôt sélectif, ou SDL (*Selective Deposition Laminated*), diffère de tous les autres procédés de fabrication additive. Il fonctionne par découpe progressive de feuilles de papier, qui sont encollées les unes aux autres à l'aide d'une substance adhésive déposée de manière sélective. Une plus grande densité de colle est ainsi placée sur la zone qui deviendra l'objet, et une densité moindre sur les zones de support. À chaque nouvelle feuille de papier, un lit d'impression chauffant vient coller les couches entre elles en les pressant. Une fois la feuille encollée, une lame vient la découper.



Fonctionnement de la technique SDL. (Source : Mcor Technologies)

Le principal avantage de ce procédé est de pouvoir imprimer avec le matériau d'impression 3D le moins cher du marché, le papier. Il permet aussi de fabriquer des pièces multicolores et d'obtenir de très bonnes résolutions. En revanche, le résultat final nécessite un important travail de finition. Les pièces creuses, complexes ou avec des volumes internes sont aussi moins faciles à exécuter, le papier pouvant être difficile, voire impossible à ôter dans certaines zones. En outre, les attaches de support se révèlent toujours fastidieuses à retirer : un marteau et des ciseaux sont parfois nécessaires pour les enlever.



Nettoyage d'objets imprimés par SDL. (Source : OINKFROG)

Outre le papier, les principaux matériaux compatibles avec ce procédé sont certains thermoplastiques de type PVC et des composites (métaux ferreux et non ferreux, céramique).



L'entreprise irlandaise Mcor Technologies, fondée en 2005 par les frères Conor et Fintan MacCormack, s'est spécialisée dans l'impression 3D papier multicolore. Elle affiche des ventes spectaculaires, annonçant une croissance de 600 % pour l'année 2013 ! L'imprimante Mcor Iris permet d'imprimer plus d'un million de couleurs avec une résolution de l'ordre de 5 760 × 1 440 × 508 dpi (voir encadré page 54).

Tête imprimée par SDL avec une imprimante Mcor Iris.
(Source : Mcor Technologies)

En résumé

Actuellement, la stéréolithographie et le frittage laser sont les procédés les plus employés dans l'industrie, tandis que la technique FDM est la plus populaire auprès des particuliers.

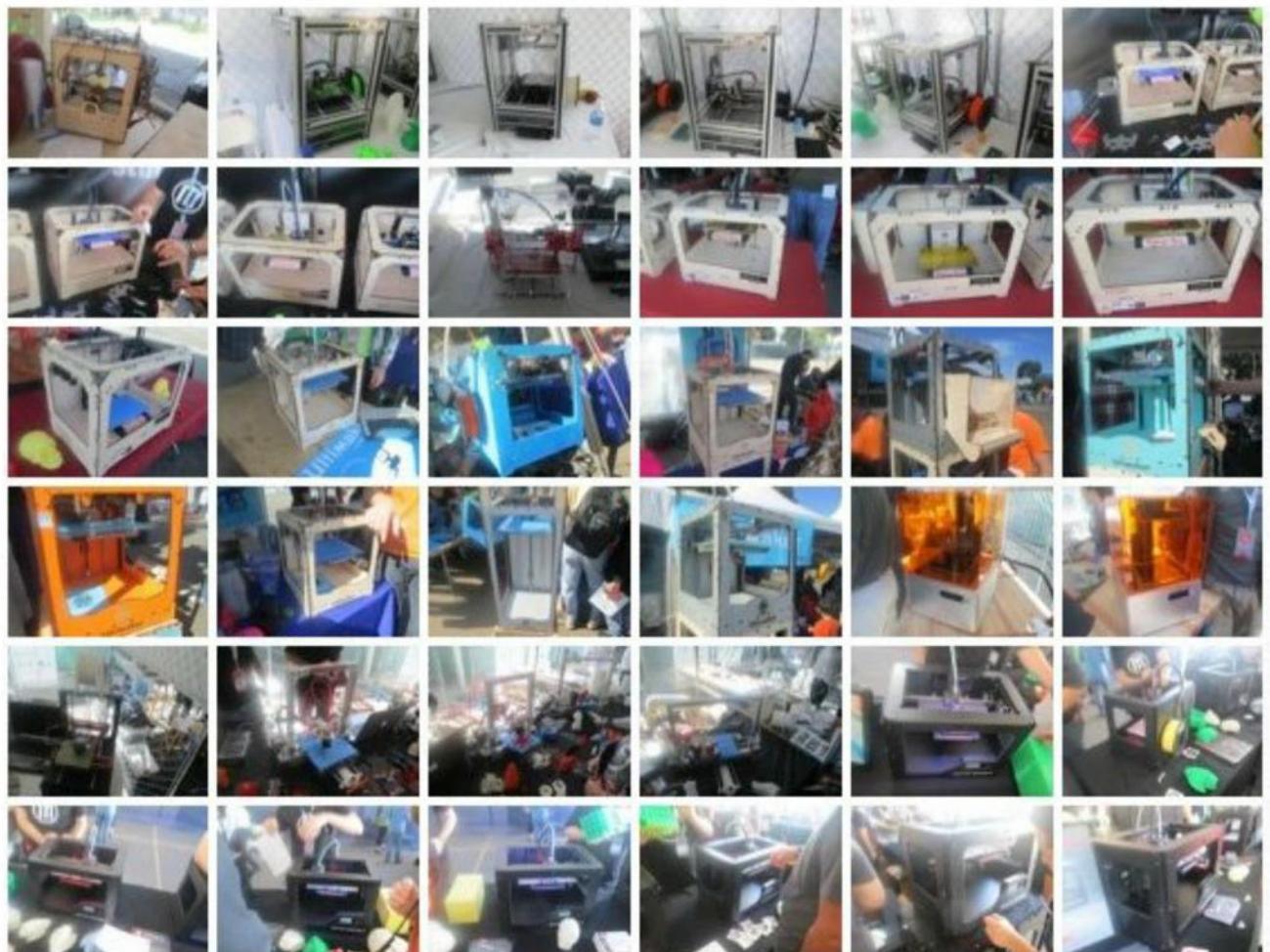
Principaux constructeurs industriels d'imprimantes 3D et techniques associées.

ENTREPRISE	ANNÉE DE CRÉATION	TECHNIQUE	CATÉGORIE
3D Systems	1986	Stéréolithographie (SLA)	Photopolymérisation
Stratasys	1989	<i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM)	Dépôt de filament fondu
Z Corporation	1995	<i>Three-Dimensional Printing</i> (3DP)	Frittage de poudre
Arcam	1997	<i>Electron Beam Melting</i> (EBM)	Frittage de poudre (métal)
Objet	1999	PolyJet et PolyJet Matrix	Photopolymérisation
EnvisionTEC	2002	<i>Digital Light Processing</i> (DLP)	Photopolymérisation

CHAPITRE 3

LES TYPES D'IMPRIMANTES 3D

À l'heure actuelle, il existe toutes sortes d'imprimantes 3D, allant d'une centaine d'euros au demi-million, avec des propriétés et des usages très divers. Elles peuvent être réparties principalement en trois grandes familles : les imprimantes 3D personnelles, coûtant généralement moins de 4 000 €, qui s'adressent aux particuliers souhaitant fabriquer chez eux leurs propres pièces ; les imprimantes 3D professionnelles, d'un prix moyen de 50 000 €, qui sont utilisées en entreprise pour prototyper et produire en série limitée ; enfin, les imprimantes 3D de production, valant plusieurs centaines de milliers d'euros, employées dans l'industrie pour réaliser des pièces fonctionnelles.



Quelques-unes des 70 imprimantes 3D présentées lors du Maker Faire 2012 à San Mateo, Californie. [Source : Shawn Wallace, Make Magazine]

Les critères de choix d'une imprimante 3D

De nombreux critères sont à prendre en compte pour déterminer le modèle le mieux adapté à ses besoins et se repérer au sein de ce marché très évolutif. En voici les principaux.

- **La technique utilisée.** Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, chaque technique d'impression possède ses particularités de rendu et diffère par ses applications.
- **La précision de l'impression.** D'une imprimante à l'autre, la finesse des détails et l'épaisseur de couche sont très variables.
- **Les matériaux.** À chaque modèle d'imprimante correspond une certaine gamme de matériaux, qui diffèrent par leur type (plastiques, céramiques, métaux...), leurs propriétés physiques (matériaux souples, durs, transparents...) et leurs coloris. Il convient donc de bien identifier ceux qui sont compatibles avec la machine choisie, afin d'éviter toute mauvaise surprise après l'achat de l'imprimante.
- **La taille maximale d'impression.** Le plateau d'impression peut aller de quelques centimètres à plusieurs mètres.
- **Le coût de revient.** Il est très variable, allant d'une centaine d'euros pour une imprimante open source en kit à monter soi-même à 500 000 € pour certains modèles spécifiques imprimant du métal. Le prix de la machine doit être corrélé au coût du matériau, qui peut être lui aussi important.
- **L'installation et la mise en service.** Le temps d'installation et les besoins spécifiques à chaque imprimante (chambre d'aération, alimentation électrique puissante) jouent aussi un rôle dans le choix du modèle. Les imprimantes 3D nécessitent trois types de branchements : une alimentation électrique, une prise réseau (câble Ethernet) et la connexion à un ordinateur. Dans certains cas, des systèmes de refroidissement ou de nettoyage sont également nécessaires.

Caractéristiques d'une imprimante 3D

Avant de faire l'acquisition d'une imprimante, il est important d'obtenir un relevé complet de ses caractéristiques, qui figurent généralement sur les spécificités techniques fournies par le constructeur. En particulier, il faut noter :

- la taille hors emballage. Toujours indiquée en longueur × largeur × hauteur, elle donne une idée de l'encombrement de la machine, à condition de tenir compte de la hauteur de son couvercle et de son système de réapprovisionnement des matériaux (porte à ouvrir à l'avant, tiroir latéral à coulisser). Certaines imprimantes comme les X60 ont été conçues afin de pouvoir passer par une porte standard de bureau ;
- la taille avec emballage. Elle importe pour des questions de livraison et de logistique ;
- le poids à vide. Il s'agit du poids de l'imprimante sans son matériau d'impression ;
- le poids à plein. Il est à anticiper, surtout pour les imprimantes de bureau posées sur une table ou un autre support ;
- le poids des cartouches de matériau. Une cartouche pèse en moyenne un kilo, voire un peu plus.

Les imprimantes 3D personnelles

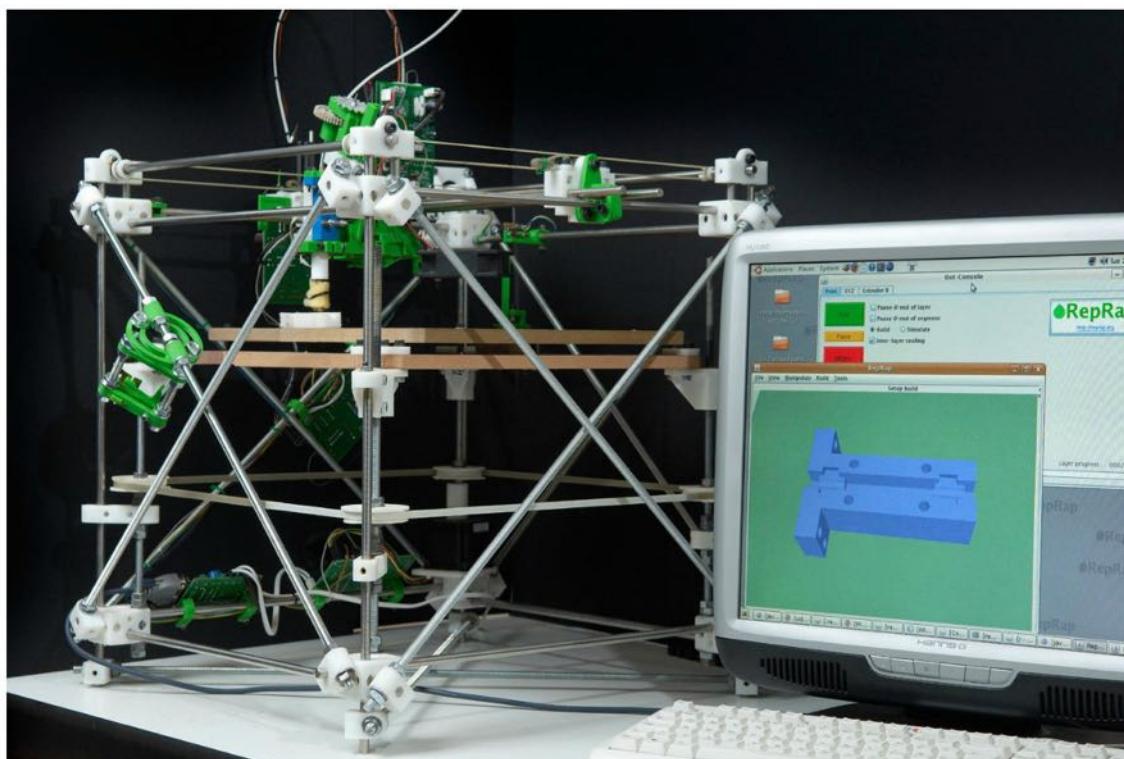
Longtemps utilisées exclusivement par les industriels, les imprimantes 3D sont restées quasi inconnues du grand public pendant les vingt années qui ont suivi le lancement du premier modèle à stéréolithographie par 3D Systems en 1986. Mais l'arrivée du projet RepRap (*Replicating Rapid Prototyper*), une imprimante autoréplicante, a permis d'amorcer un mouvement d'ouverture sans précédent. Les imprimantes 3D personnelles étaient nées.

Aujourd'hui, leur marché est très fragmenté, dominé par la société MakerBot, même si un nombre grandissant d'acteurs indépendants proposent des imprimantes personnelles commerciales, rejoints depuis peu par les grands noms du secteur. À l'heure actuelle, les machines les plus populaires sont les imprimantes MakerBot, Ultimaker, Solidoodle, Printrbot, Cube et, plus récemment, Formlabs.

REPRAP, L'IMPRIMANTE QUI S'IMPRIME ELLE-MÊME

Le projet RepRap, consistant à créer une machine capable de se fabriquer elle-même, a vu le jour à l'université de Bath au Royaume-Uni en 2005. Initié par Adrian Bowyer, maître de conférences en ingénierie mécanique, il est depuis supporté par une large communauté internationale de contributeurs passionnés.

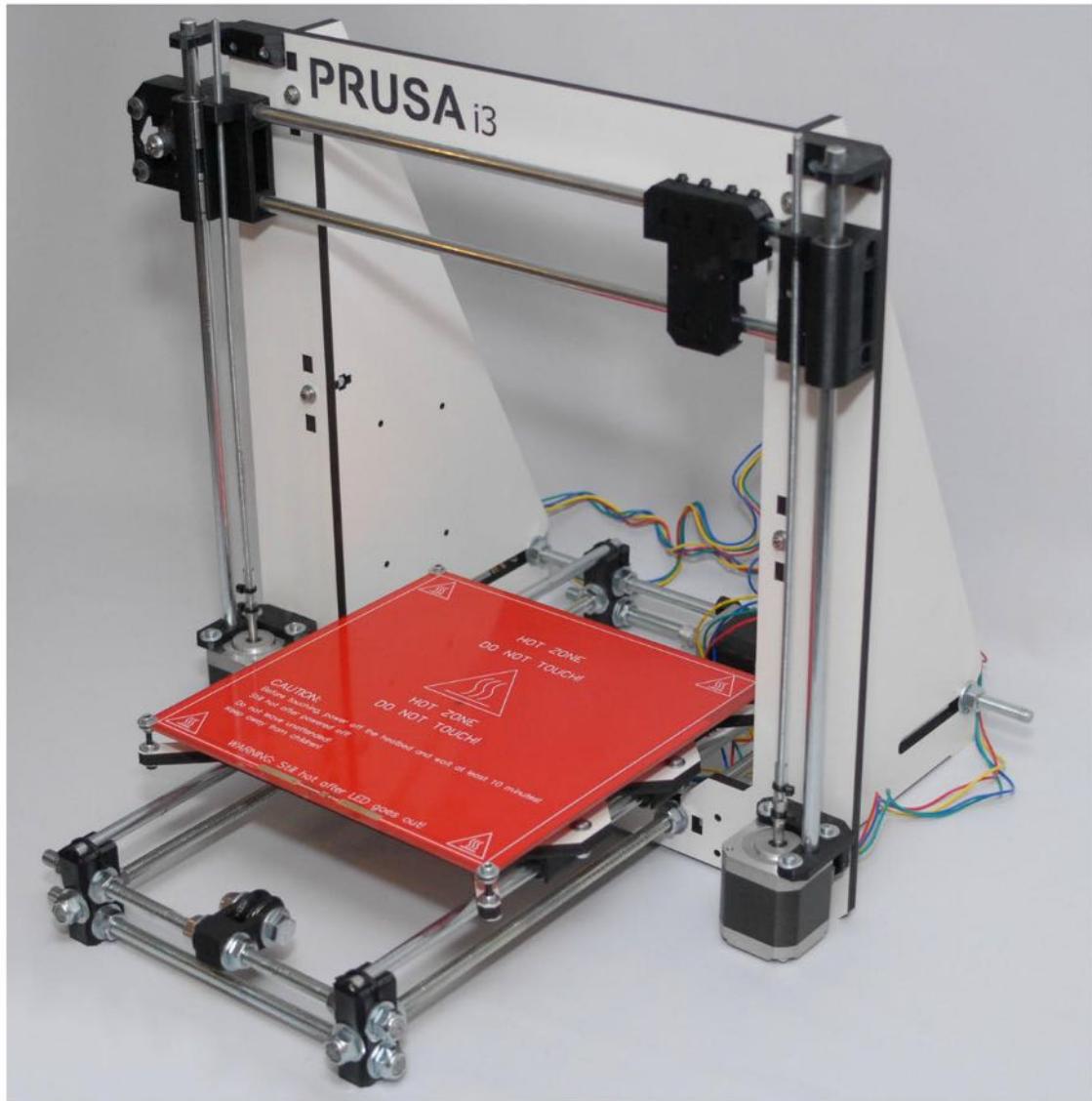
Placée dès ses débuts sous licence libre (GNU-GPL), cette machine est une imprimante 3D personnelle compacte, dont la structure peut être entièrement imprimée en 3D. Seules les pièces électroniques ne sont pas encore répliquables, mais l'équipe y travaille. Le premier modèle fonctionnel, appelé RepRap Darwin, a été fabriqué en 2007.



La RepRap Darwin. (Source : RepRap.org)

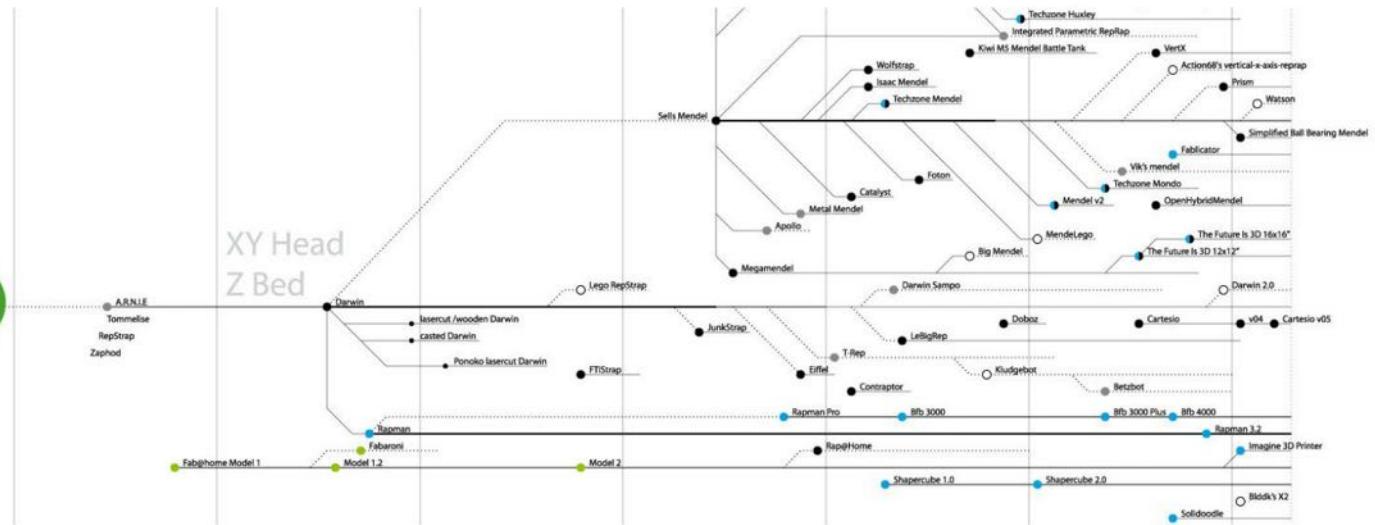
La RepRap a permis de faire sortir les imprimantes 3D du cadre industriel et universitaire, mais sans entrer en concurrence avec les acteurs historiques du secteur car ses performances sont bien moindres : sa précision d'impression n'est en effet que de 2 mm pour une épaisseur de couche moyenne de 0,30 mm. Son plateau d'impression est aussi souvent moins grand que celui d'une imprimante professionnelle compacte (environ 20 × 20 × 14 cm). Une RepRap est généralement petite, légère et mobile (7 kg, 50 × 40 × 35 cm pour la RepRap Mendel), mais ses dimensions peuvent différer fortement d'un modèle à l'autre.

À l'heure actuelle, la RepRap la plus populaire est la Prusa Mendel, notamment sa dernière déclinaison Prusa i3. Elle améliore le modèle Mendel en simplifiant les phases de construction et d'impression, tout en facilitant les modifications et les réparations ultérieures de la machine. Elle s'adresse cependant à l'utilisateur expérimenté qui doit rassembler lui-même sa liste de pièces détachées, imprimer ou faire imprimer les pièces de la structure et monter l'ensemble. Le coût de fabrication est donc très variable, mais s'élève généralement à moins de 500 €. La communauté est active : de nombreux groupes d'entraide se créent et des événements locaux sont organisés pour monter ensemble les machines.



La RepRap Prusa i3. (Source : RepRap.org, CC-by-SA)

Dès 2008, le projet RepRap a donné naissance à de nombreux dérivés, dont MakerBot, Ultimaker, Printrbot, UP!, Cube, Fabbster, Solidoodle, MakiBot pour les plus connus. Ces imprimantes ne sont qu'un petit échantillon des modèles réalisés par la communauté. Emmanuel Gilloz, contributeur français actif du projet RepRap – et créateur de la FoldaRap, une RepRap pliable de voyage – a dessiné l'arbre généalogique de la RepRap, disponible librement sur le wiki.



Extrait de l'arbre généalogique des machines dérivées de la RepRap. (Source : Emmanuel Gilloz, CC-by-SA)

L'éthique RepRap

En choisissant de monter une imprimante RepRap, l'utilisateur accepte la philosophie du projet, motivé par des valeurs liées au monde du logiciel libre. Ainsi, selon l'éthique RepRap, chaque RepRap doit en produire au moins deux autres, gratuitement ou à prix coûtant.

ANATOMIE D'UNE IMPRIMANTE PERSONNELLE

Les imprimantes 3D personnelles, héritées en très grande majorité du projet RepRap (l'autre modèle d'origine étant la Fab@Home, voir page suivante), sont proposées en kit à assembler soi-même ou bien déjà prêtées à l'emploi. Utilisant généralement la technologie du dépôt de filament fondu, elles se composent de quatre éléments indispensables : un lit d'impression, un extrudeur (par lequel passe peu à peu le filament), une tête chauffante et un filament de plastique. Ces quatre pièces sont montées sur une structure solide et contrôlées par un système de positionnement 3D.

Les différentes variantes de ces quatre éléments ont une grande influence sur les caractéristiques techniques de la machine. Selon les modèles, l'imprimante pourra être ainsi plus rapide, plus compacte, ou encore plus précise.

Les différents systèmes de positionnement 3D

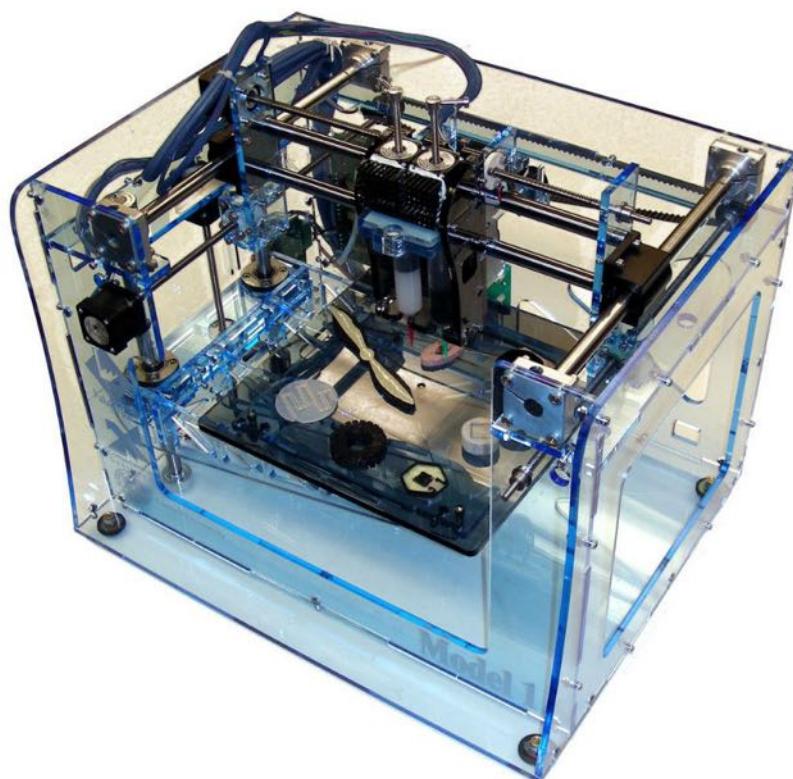
Le système de positionnement 3D définit la façon dont la tête d'impression va venir positionner le filament fondu sur le lit d'impression. Les axes x et y correspondent au déplacement latéral du système, l'axe z au déplacement vertical.

Trois types de systèmes sont principalement utilisés par les imprimantes personnelles actuelles.

- Grue : l'extrudeur se déplace sur les axes x et y, le lit d'impression que sur l'axe z. L'Ultimaker et la Replicator de MakerBot utilisent ce système, mais les similarités s'arrêtent là.
- Lit mobile : c'est lui qui se déplace et non plus l'extrudeur. Ce type de modèle, adopté par Printrbot, a l'avantage d'être plus simple mécaniquement. La maintenance est facilitée et les coûts sont moins élevés. En contrepartie, l'impression est plus lente, car le lit d'impression est lourd.
- DeltaBot : trois tiges de commande mobiles contrôlent la tête d'impression. Ce type de modèle permet d'augmenter la vitesse et la précision de l'impression, mais nécessite un moteur plus complexe. La Rostock est un exemple de modèle DeltaBot.

FAB@HOME

Fab@Home est un projet collaboratif open source né en 2006 à l'université de Cornell, au sein du Computational Synthesis Laboratory. Hod Lipson et Evan Malone sont les deux acteurs principaux de ce projet d'imprimante 3D personnelle multimatière, développé en parallèle du projet RepRap. Il ne se concentre pas sur l'idée de machines autoréplicantes, mais plutôt sur la fabrication personnelle polyvalente.



La Fab@Home Model 1. (Source : Fab@Home)

Les imprimantes 3D issues du projet Fab@Home ont été baptisées Model 1 et Model 2. Leur particularité est d'être équipées d'une seringue interchangeable en guise de tête d'impression, ce qui leur permet d'imprimer à partir d'une grande variété de matériaux (silicone, ciment, acier, chocolat, glaçage au sucre, fromage, pâte à modeler...) et non plus seulement en ABS.

À l'instar d'une RepRap, l'assemblage d'une imprimante Fab@Home Model 1 ou Model 2 demande du temps, de la motivation et quelques outils (pinces, clés à molette, fer à souder). Il faut compter environ 2 000 € pour rassembler l'ensemble des pièces. Le volume d'impression est de 20 × 20 × 20 cm, avec une précision d'impression d'environ 0,10 mm.

MAKERBOT INDUSTRIES

Fondée par trois amis bricoleurs passionnés, Zachary Smith, Adam Mayer et Bre Pettis, MakerBot Industries a été la première entreprise à fabriquer et à distribuer des imprimantes 3D personnelles. Habitués du hackerspace new-yorkais NYC Resistor, ils construisent ensemble un prototype d'imprimante commercialisable. Aujourd'hui, l'entreprise connaît une croissance fulgurante et détiendrait 55 % du marché des imprimantes 3D grand public, selon ses dirigeants. Elle a été rachetée en 2013 par Stratasys.

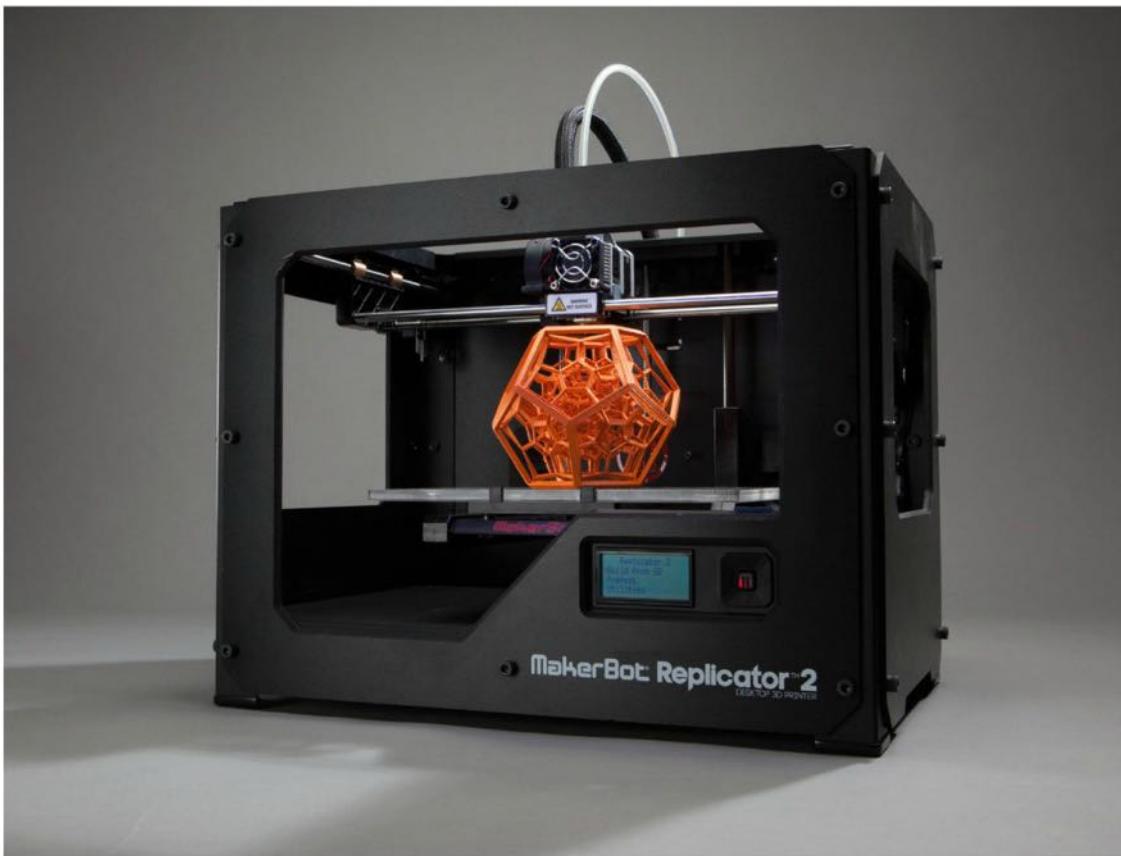


L'équipe fondatrice de MakerBot aux côtés de leur premier modèle, la Cupcake CNC. [Source : MakerBot Industries]

La MakerBot Cupcake CNC a été le premier modèle à être lancé sur le marché, en 2009. À l'origine, elle était fournie uniquement en kit à monter soi-même. L'enveloppe de l'imprimante est une structure légère, composée de fines plaques de bois découpées au laser et de tiges de métal.

Autre modèle sorti en septembre 2012, la MakerBot Replicator 2 s'adresse davantage au designer professionnel qu'à l'utilisateur amateur. Vendue à moins de 2 000 €, elle est préassemblée et sa structure n'est plus en bois mais en acier. Sa résolution de 0,1 mm est l'une

des meilleures du marché pour ce type de machine. Le volume d'impression est lui aussi plus gros que la plupart des autres modèles existants : environ 30 % de plus que le modèle précédent, la Replicator. La MakerBot Replicator 2 est optimisée pour le filament de PLA (acide polylactique), un plastique dérivé du maïs, recyclable mais plus difficile à travailler que l'ABS.



La MakerBot Replicator 2. [Source : MakerBot Industries]

La polémique

Suite au succès commercial du modèle Cupcake CNC, MakerBot Industries effectue en août 2011 une levée de fonds de 10 millions de dollars auprès de différents investisseurs. Mais, en avril 2012, Zachary Smith, l'un des trois fondateurs et par ailleurs contributeur actif du projet RepRap, quitte l'entreprise en raison de nombreux désaccords sur la stratégie à suivre. Quelques mois plus tard, la polémique enfle, avec le lancement de la MakerBot Replicator 2, un modèle qui n'est plus tout à fait open source. Une partie de la communauté qui a contribué à la réussite de la société crie au scandale. Accusé d'avoir renoncé à leur éthique pour céder au mercantilisme, MakerBot Industries indique vouloir commercialiser ses imprimantes à un large public sans risquer d'être copié.

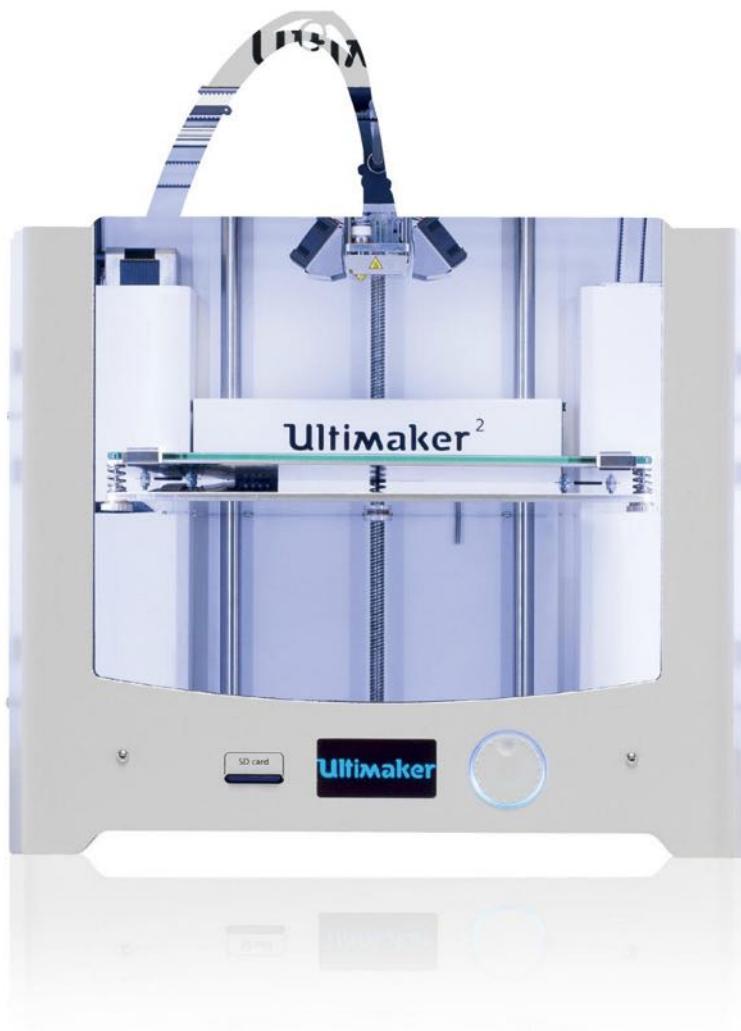
Lors du *Consumer Electronics Show* de 2013, MakerBot a lancé son imprimante Replicator 2X, une variante de la Replicator 2. Ce nouveau modèle, dont l'ergonomie du double extrudeur a été améliorée, est doté d'un caisson de protection du filament.

Aujourd'hui, MakerBot propose cinq modèles d'imprimantes, dont trois nouveaux depuis début 2014 : la Replicator Mini, la Replicator 5^e génération et la Replicator Z18. La Replicator

Mini est la moins chère : vendue à 999 €, elle s'adresse au grand public souhaitant imprimer de petits objets sur une machine simple d'utilisation. La Replicator 5^e génération est la plus rapide et la plus précise des imprimantes MakerBot. Enfin, avec son grand volume d'impression, la Replicator Z18 s'adresse en priorité aux petites et moyennes entreprises.

ULTIMAKER

La société Ultimaking Ltd. a été fondée en 2011 par les Néerlandais Erik de Brujin, Martijn Elserman et Siert Wijnia, collaborateurs actifs du projet RepRap depuis 2008 et membres du Fab Lab ProtoSpace d'Utrecht.



L'imprimante Ultimaker 2. (Source : Ultimaking Ltd)

Lancé la même année, le modèle Ultimaker a rapidement conquis la communauté des passionnés d'impression 3D. Aujourd'hui, la nouvelle génération Ultimaker 2 se démarque par la vitesse de déplacement de son extrudeur (30 à 300 mm/s), son grand volume d'impression (230 × 225 × 205 mm) et sa précision (jusqu'à 20 microns d'épaisseur de couche).

L'extrudeur de l'Ultimaker 2 présente la particularité d'être séparé de la tête chauffante, si bien que cette dernière, allégée, peut se déplacer rapidement. L'ABS et le PLA sont tous

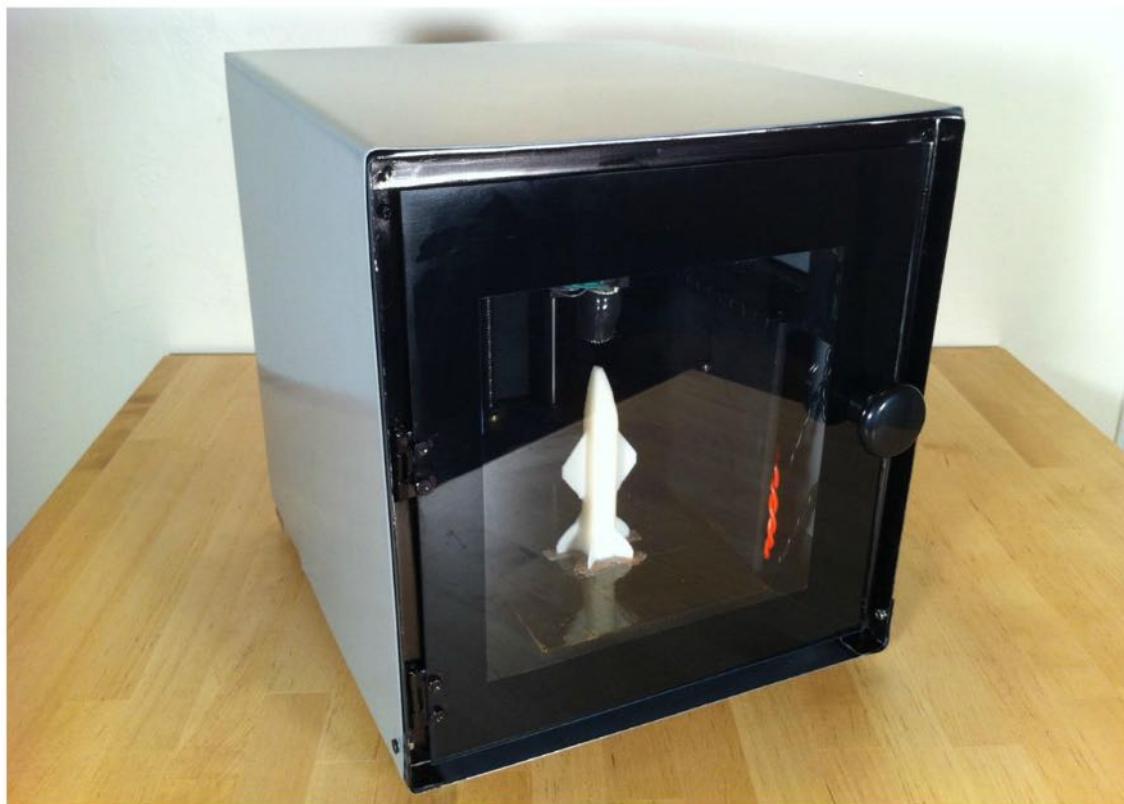
deux acceptés par cette imprimante, qui est désormais équipée d'un plateau d'impression chauffant, contrairement aux premiers modèles. L'Ultimaker 2 est vendue prête à l'emploi pour environ 1 900 €.

Par ailleurs, le modèle est mis à jour très régulièrement. L'utilisateur peut ainsi faire évoluer sa machine, que ce soit pour la partie logicielle comme pour la partie mécanique et électronique. L'Ultimaker est en open hardware : les plans, codes sources et designs utilisés sont donc librement reproductibles.

SOLIDOODLE

L'entreprise Solidoodle, basée à Brooklyn, a été fondée par Sam Cervantes, un ancien contributeur de MakerBot. Ses imprimantes sont destinées en priorité aux bricoleurs et autres passionnés d'impression 3D. Elles sont vendues préassemblées ou en kit, mais la plupart de leurs pièces sont également disponibles séparément afin de pouvoir mettre à jour son ancien modèle par soi-même.

La quatrième génération d'imprimantes est disponible à l'achat sur le site de Solidoodle, pour 730 € environ. Plus solide et plus fiable que la précédente, elle est aussi plus simple à prendre en main et comporte désormais une vitre protectrice. Son volume d'impression est de $20 \times 20 \times 20$ cm, donc plus important que celui des anciens modèles ($15 \times 15 \times 15$ cm), pour une précision équivalente comprise entre 0,1 et 0,4 mm par couche. La force de la Solidoodle est sa modularité et sa fiabilité.

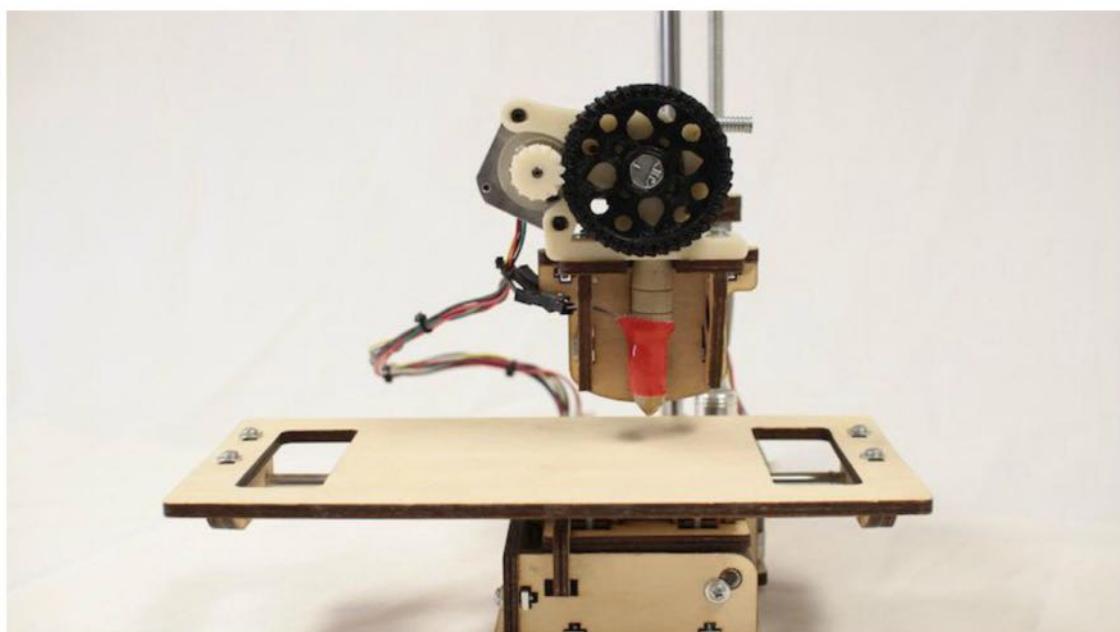


Solidoodle 4^e génération, préassemblée à 730 € environ. (Source : Solidoodle)

Par ailleurs, il faut noter que la communauté Solidoodle est très active. Au fil des années, elle s'est considérablement étoffée, si bien qu'un solide groupe d'utilisateurs sera toujours là pour soutenir l'acquéreur d'un de ces modèles.

PRINTRBOT JR

Mise au point par Brook Drumm (voir page 147), la machine Printrbot jr est parmi les imprimantes 3D personnelles les plus petites, portables et bon marché qui soient. Ce projet a connu un grand succès sur le site de financement participatif Kickstarter en levant plus de 830 000 \$. Il a donné naissance à l'entreprise Printrbot, qui commercialise maintenant différents modèles d'imprimantes.



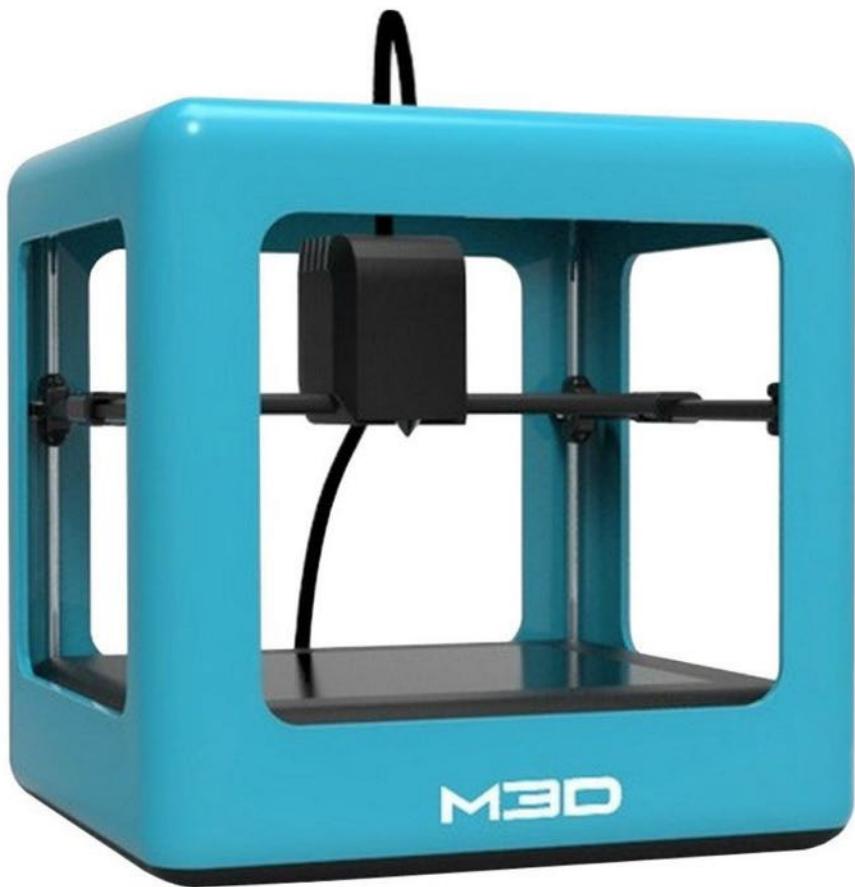
Printbot jr, le modèle le moins cher de Printrbot. (Source : Printrbot)

La Printrbot jr est une imprimante simple, de très petite taille (elle pèse moins de 3 kg) et très abordable (300 € environ). Son plateau d'impression est de 10 × 10 × 10 cm. Elle est pliable et peut tenir dans un sac à dos. Ce modèle a aussi la particularité d'accepter une batterie au lithium (LiPo). Le nombre de pièces a été réduit au minimum et la grue a été très simplifiée. La Printrbot jr ayant été conçue initialement pour le PLA, son plateau d'impression n'est pas chauffant. La taille et le prix de cette imprimante en font un modèle particulièrement adapté aux débutants, étudiants et utilisateurs ponctuels.

MICRO M3D

Micro M3D est la toute dernière-née des imprimantes très compactes qui demeurent abordables. Lancée sur Kickstarter en avril 2014 avec un besoin initial de 36 000 €, la campagne a connu un succès fulgurant puisque son objectif a été dépassé seulement 11 minutes après la mise en ligne du projet ! Petit cube coloré (18,5 × 18,5 × 18,5 cm), cette machine utilise,

comme beaucoup d'autres modèles, le dépôt de filament fondu et imprime en PLA ou en ABS. L'épaisseur de couche est annoncée entre 50 et 350 µm. La force de la Micro M3D tient à son design compact, sa facilité de prise en main pour le débutant et son prix très attractif, de l'ordre de 200 €. Les premiers modèles seront disponibles à partir d'août 2014.



La Micro M3D. (Source : M3D LLC)

CUBE

L'entreprise 3D Systems a été le premier acteur industriel à lancer en 2012 une imprimante facile d'emploi pour les particuliers, le Cube. Aujourd'hui, ce modèle en est à sa troisième génération, depuis l'annonce en janvier 2014 de la Cube 3. Fournie prête à l'emploi pour un peu moins de 1 000 €, cette machine dotée d'une interface tactile répond aux normes d'utilisation pour un enfant de 7 ans. L'une de ses spécificités est de fonctionner en Wi-Fi, ce qui permet de lancer des travaux d'impression à distance, par exemple à partir de son smartphone via une application dédiée. Il est aussi possible d'y brancher une clé USB.

Le volume d'impression de cette imprimante est de 15,25 × 15,25 × 15,25 cm, pour une épaisseur de couche de 75 µm. Le système permet une installation facile du filament grâce à des cartouches conçues pour la Cube. Dix couleurs sont disponibles, et la Cube 3 accepte aussi bien l'ABS que le PLA. La machine offre de bonnes performances pour une utilisation familiale, mais s'avère peu adaptée à un usage professionnel. Les impressions sont fiables, et le design entièrement fermé de l'imprimante protège les composants d'éventuels chocs extérieurs.



L'imprimante Cube 3 de 3D Systems. (Source : 3D Systems)

FDM, la technique de prédilection des imprimantes personnelles

À ce jour, il existe plusieurs centaines de modèles d'imprimantes 3D personnelles à dépôt de filament fondu. De nombreuses start-up ont ainsi lancé leur campagne de *crowdfunding* pour financer la production d'une première série de machines. Parmi les cas les plus populaires, on peut notamment citer Buccaneer, une imprimante 3D protégée par un châssis en acier inoxydable. En précommande pour moins de 300 €, elle annonce une résolution de 85 µm. Mais d'autres modèles font aussi parler d'eux, comme récemment 3DMonstr (dotée d'un grand volume d'impression de 60 × 60 × 60 cm), BI V2.0, Printxel, Hyrel ou encore RoBo.

IMPRIMANTES N'UTILISANT PAS LA FDM

Après s'être focalisés sur la technique FDM, de nouveaux constructeurs s'intéressent désormais aux autres procédés d'impression 3D et proposent des modèles d'imprimantes 3D de bureau utilisant la stéréolithographie, la DLP ou même le frittage laser. Ces acteurs se heurtent néanmoins aux détenteurs des brevets initiaux déposés par 3D Systems et Stratasys. Voici deux imprimantes emblématiques de ce nouveau courant.

FormLabs

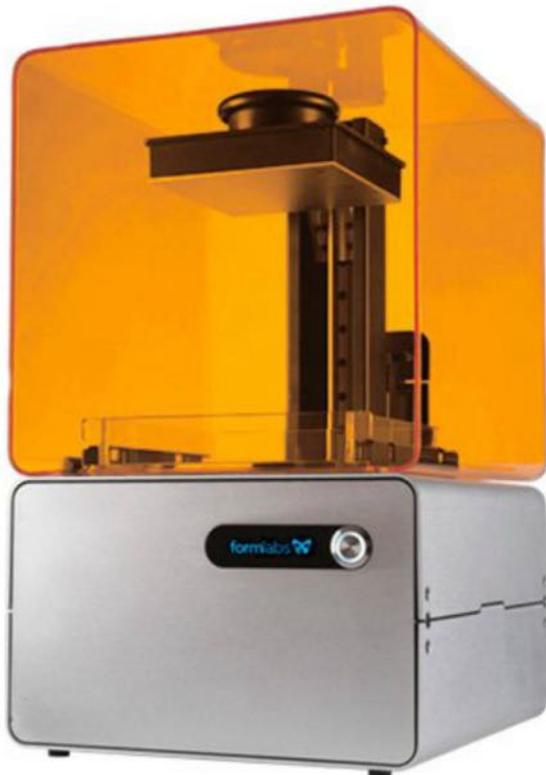
La société Formlabs a été fondée par David Cranor, Maxim Lobovsky et Natan Linder du MIT Media Lab. Ils ont été les tout premiers à proposer une imprimante 3D compacte et accessible (environ 2 500 €) utilisant la technique de stéréolithographie, un procédé d'impression jusque-là réservé à des usages industriels de haute précision. Tous leurs modèles s'adressent essentiellement aux designers.

La première imprimante commercialisée, Form 1, a fait l'objet d'une attention sans précédent après son lancement sur le site Kickstarter. Presque 3 millions de dollars ont pu ainsi être récoltés auprès des particuliers. Ce modèle permet d'imprimer en résine transparente ou blanche, à une résolution de 300 µm pour une épaisseur de couche de 25 µm. L'équipe développe aussi le logiciel PreForm qui permet d'orienter automatiquement la pièce et de générer des zones de support.

Peu après le lancement de la campagne de crowdfunding pour la Form 1 mi-2012, 3D Systems a attaqué FormLabs en justice, estimant que la jeune entreprise avait commis une infraction au brevet 520 protégeant la méthode de stéréolithographie, accusation suivie ces derniers mois de huit nouvelles plaintes de 3D Systems pour violation de brevet. À ce jour, un accord n'a pas encore été trouvé et les discussions sont toujours en cours. Pour le moment, FormLabs continue ses activités et livre ses premiers modèles depuis mai 2013, à la suite notamment d'une levée de fonds de près de 14 millions d'euros.

B9Creator

Porteuse de nombreux espoirs, la B9Creator est une imprimante 3D personnelle open source, disponible en kit, qui emploie un procédé similaire à la DLP. Préfinancée par ses utilisateurs grâce à deux campagnes de crowdfunding sur le site Kickstarter, elle permet d'imprimer à partir de résine. L'image de la couche est projetée sur le plateau d'impression, solidifiant alors une résine liquide. La résolution obtenue est très fine, de l'ordre de 50 µm sur les axes x et y, et de 10 µm sur l'axe z. La taille de l'objet imprimé n'a pas d'incidence sur la vitesse moyenne de l'imprimante, qui est de 20 mm par heure.



Form 1, première imprimante de bureau utilisant la stéréolithographie. (Source : Formlabs)



L'imprimante B9Creator. (Source : B9Creator)

Autres imprimantes personnelles à DLP

Il existe d'autres modèles d'imprimantes 3D personnelles utilisant la DLP, mais encore expérimentaux, parmi lesquels on peut citer la MiiCraft, une imprimante 3D compacte taïwanaise, la Sedgwick, vendue pour environ 1 200 €, ou encore la Lunavast XG2, projet open source dérivé de la RepRap.

ET TOUTES LES AUTRES...

Les imprimantes présentées précédemment sont parmi les plus populaires du marché, mais ne représentent qu'un échantillon de tous les modèles disponibles à ce jour, qu'on estime à plus de 200 rien que pour les commercialisés. Afinia H-Series et Type A Series 1 sont ainsi deux autres imprimantes de qualité et à prix abordable, mais on peut également citer les modèles SeeMeCNC, MendelMaxPro, MakerGear, LulzBot, Felix ou encore BukoBot.

Les acteurs de l'impression 3D sur les marchés grand public et industriel.

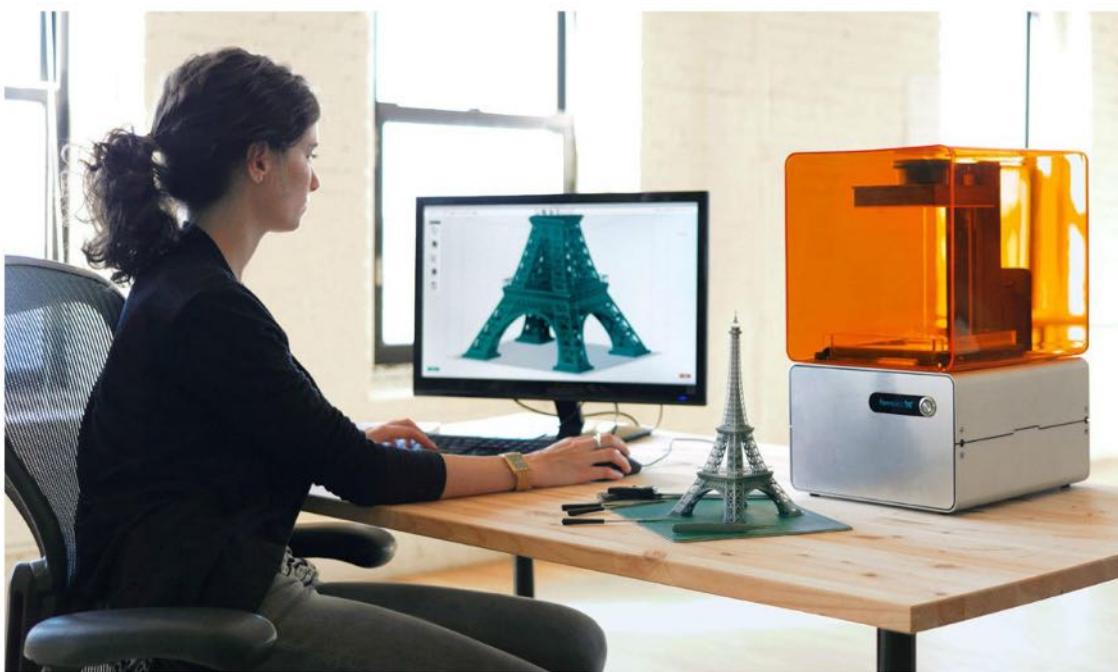
PROCÉDÉ	MARCHÉ GRAND PUBLIC	MARCHÉ INDUSTRIEL
Dépôt de filament fondu	RepRap, MakerBot, Ultimaker, Printbot	Stratasys
Stéréolithographie ou DLP	Formlabs, B9Creator	3D Systems, EnvisionTEC
Frittage Laser (SLS)	Andreas Bastian	EOS, 3D Systems
MultiJet/PolyJet	–	3D Systems, Objet
3DP	–	Z Corporation (3D Systems), Voxeljet

Les imprimantes 3D professionnelles

Les imprimantes 3D professionnelles s'adressent aux bureaux d'études, cabinets d'architecte, entreprises de R&D, studios de design, prestataires de prototypage ou d'outillage, départements de prototypage des entreprises de production de biens de consommation et, plus globalement, à toute entreprise ayant des besoins de prototypage et de production. Écoles et hôpitaux sont aussi de plus en plus équipés.

Existant depuis une petite vingtaine d'années, elles sont plus chères (entre 5 000 et 15 000 €, sans compter le consommable) et plus volumineuses que les imprimantes personnelles, mais aussi plus fiables. Elles ne nécessitent pas d'assemblage et sont livrées prêtes à l'emploi.

Toutes ces imprimantes sont produites par les acteurs historiques de la fabrication additive. Deux groupes dominent le marché : 3D Systems (qui a racheté Z Corporation et Bits from Bytes) et Stratasys-Objet (qui a absorbé MakerBot). Ces deux géants ont adopté une stratégie active de rachat des autres acteurs du secteur, proposant donc aujourd'hui des modèles pour des publics et des usages très différents. Mais d'autres constructeurs existent, comme EOS, EnvisionTEC ou encore Arcam.



Imprimante 3D Form 1 utilisée dans un studio de design. (Source : FormLabs)

Imprimante professionnelle ou personnelle ?

La frontière est parfois mince entre imprimantes professionnelles et imprimantes personnelles. Ainsi, une machine comme la MakerBot Replicator 2X peut être utilisée dans les deux contextes. Par ailleurs, les constructeurs d'imprimantes industrielles proposent eux aussi souvent des modèles d'entrée de gamme. Pour moins de 10 000 €, une entreprise ayant des besoins sommaires en prototypage rapide peut en effet y trouver son compte, même si les améliorations rapides des machines personnelles rendent ces gammes d'imprimantes 3D de bureau de plus en plus obsolètes.

LES MODÈLES PROJET DE 3D SYSTEMS

Les ProJet 1000 et 1500 sont des imprimantes 3D compactes de bureau éditées par 3D Systems pour les petites et moyennes entreprises. À la différence des machines Cube qui s'adressent à l'utilisateur amateur et n'ont pas la prétention de réaliser des pièces d'une grande qualité, ces imprimantes s'utilisent plutôt en prototypage, même si elles s'avèrent relativement limitées en raison de leur petit plateau d'impression et de l'aspect de la surface imprimée. Une ProJet 1500 coûte aux environs de 11 500 €, sans compter les recharges de matériel à 180 € le litre environ.



La ProJet 3510 HD. (Source : 3D Systems)

Pour réaliser du prototypage, des tests fonctionnels et des modèles de haute précision, les entreprises de petite et moyenne taille ont tout intérêt à investir dans un modèle ProJet de la gamme supérieure. La série des ProJet 3510 est ainsi réputée pour sa versatilité, pouvant imprimer en cire perdue, en plastique et pour le médical. Ces imprimantes fonctionnent selon la technique MJM (*Multi-Jet Modeling*), proche de la stéréolithographie. Elles sont moins compactes (elles ne se posent pas sur un bureau), mais demeurent silencieuses. Avec un volume de fabrication allant jusqu'à 298 × 185 × 203 mm pour une épaisseur de couche de 32 µm, la ProJet 3510 SD est ainsi une machine parfaite pour un petit laboratoire ou un centre de recherche et développement.

3D Systems, un mastodonte de l'impression 3D

3D Systems a été fondée en 1986 par Chuck Hull, ingénieur à l'origine de la stéréolithographie (SLA). L'entreprise s'est ensuite diversifiée en acquérant différentes solutions de frittage laser (SLS) et de jets (ProJet), détenant aujourd'hui sept procédés d'impression et plus de 1 300 brevets. En 2012, ses revenus ont été estimés à plus de 49 millions d'euros, avec une croissance des ventes d'imprimantes 3D de 29 %.

3D Systems a acquis 33 entreprises ces trois dernières années, dont Z Corporation, Bits from Bytes, Bespoke Innovations, Paramount Industries, My Robot Nation ou encore Coweb, société française commercialisant des figurines personnalisées. Ces rachats correspondent à une vision partagée par de nombreux acteurs du domaine : le besoin de fabrication à la demande.

L'entreprise propose une gamme très diversifiée de machines, aussi bien personnelles (Cube, CubeX, Cube 3, Cube Pro, ProJet 1000, ProJet 1500) que professionnelles (ProJet 3510 à 7000, série X60) et de production (séries iPro, sPro, ProX et VX). Avec Stratasys, il s'agit de l'offre la plus complète du marché à l'heure actuelle.

LES OBJET24 ET OBJET30 D'OBJET

Les Objet24 et Objet30 sont les imprimantes 3D compactes commercialisées par la société Objet. De l'ordre de 15 000 €, ces deux modèles sont de taille (82,5 × 62 × 59 cm), de poids (93 kg) et de précision (28 µm) semblables. Ils utilisent la technique brevetée PolyJet qui assure une grande finesse de résultat, d'une qualité comparable à celle obtenue par stéréolithographie ou DLP.

Les imprimantes Objet24 et Objet30 ont une résolution de 600 × 600 × 900 dpi, avec un détail minimal de 0,1 mm pour une épaisseur de couche de 28 µm. La différence entre les deux machines tient essentiellement aux matériaux disponibles : plastique blanc opaque pour la Desktop24, plastiques blanc, bleu, noir, gris et simili-polypropylène pour la Desktop30. Toutes deux répondent bien aux besoins des agences de publicité, cabinets de conseil ou studios de design.

La dernière-née, lancée en mai 2012, est l'Objet30 Pro Desktop. Cette nouvelle imprimante compacte est la toute première à permettre l'impression multimatériaux (plusieurs matériaux au sein d'un même objet au cours d'une seule impression) : sept matériaux simultanés sont ainsi acceptés. Ce modèle est la version compacte de l'Objet30 Pro, mais son volume maximal d'impression est néanmoins plus grand que celui toléré par certaines imprimantes similaires : 300 × 200 × 150 mm.

La résolution d'une imprimante 3D

La précision d'une imprimante 3D se définit principalement à partir de deux paramètres : l'épaisseur de couche et sa résolution. En frittage laser par exemple, cette dernière correspond à la densité des particules 3D sur les axes x et y (et parfois aussi sur l'axe z). Elle se mesure en dpi (*dots per inch*). Une résolution de 1 024 × 768 dpi correspond donc à 1 024 particules par pouce sur l'axe x et 768 particules par pouce sur l'axe y. La résolution sur l'axe z, correspondant à la hauteur, est une donnée importante, car plus la précision sera élevée, moins l'objet présentera cet « effet d'escalier » propre aux imprimantes de basse résolution.

LES UPRINT SE DE STRATASYS

La uPrint SE et la uPrint SE Plus, vendues respectivement à 12 500 et 16 500 € environ, sont des imprimantes 3D compactes de bureau commercialisées par Stratasys, qui exploitent la technologie FDM à partir d'un plastique de type ABS. Elles utilisent un matériau de support stocké séparément, qui s'enlève facilement à l'eau. Leur précision d'impression est bien moindre que celle des Objet Desktop, puisqu'elle est d'environ 254 µm. Quant au volume maximal d'impression, il est de 20,3 × 15,2 × 15,2 cm pour la uPrint SE et de 20,3 × 20,3 × 15,2 cm pour la uPrint SE Plus, donc inférieur aux possibilités des modèles Desktop de Objet. Stratasys propose aussi ses machines en location pour un peu plus de 300 €/mois, ce qui permet d'accéder à une solution complète pour un besoin de prototypage ponctuel. Le pack comporte un système de nettoyage et des bobines de filament.



uPrint SE, une imprimante compacte à louer. (Source : Stratasys)

Depuis l'acquisition de MakerBot par Stratasys, cette série uPrint n'est donc plus la seule à s'adresser aux petites et moyennes entreprises désireuses de se mettre à l'impression 3D. Si les deux gammes MakerBot et uPrint sont pour l'instant développées indépendamment, il ne serait pas surprenant d'assister à un ralentissement de la seconde dans un futur proche.

LA PERFACTORY P3 MINI MULTI LENS D'ENVISIONTEC



La Perfactory P3 Mini Multi Lens d'EnvisionTEC. (Source : EnvisionTEC)

Les imprimantes 3D compactes d'EnvisionTEC sont la référence en matière d'impression de très grande précision pour une machine de petite taille. Utilisant la technologie DLP, elles sont particulièrement adaptées pour la réalisation de figurines et d'objets très précis tels que des moules de bijouterie ou du matériel médical (aides auditives, par exemple).

Le modèle Perfactory P3 Mini Multi Lens possède une résolution unique de $2\,800 \times 2\,100$ dpi pour une épaisseur de couche de 15 µm, ce qui en fait une machine très performante. Imprimant au rythme constant de 10 mm par 50 µm, elle est fabriquée à la demande par EnvisionTEC.



La ProJet 860Pro, l'une des imprimantes 3D de la gamme X60. (Source : 3D Systems)

de 300×450 dpi. Le modèle le plus récent de la série, la ProJet 860Pro, offre quant à lui jusqu'à 0,1 mm de détail pour une résolution de 600×540 dpi.

Les X60, qui font appel au procédé d'impression 3DP, constituent la référence mondiale pour l'impression 3D en couleurs. Plus de 390 000 couleurs sont disponibles pour les modèles haut de gamme, à savoir les ProJet 460Plus, 660Pro et 860Pro. Toutes les combinaisons sont envisageables.

LA SÉRIE PROJET X60

Les modèles X60 (anciennement appelés ZPrinter) de 3D Systems sont parmi les imprimantes 3D professionnelles les plus populaires au monde. Se rapprochant le plus, par leur fonctionnement, d'une imprimante à jet d'encre 2D, ils utilisent comme matériau une poudre composite à verser dans le bac de stockage de la machine. Ces machines fiables et rapides sont aussi quasiment les seules à ce jour à pouvoir imprimer en plusieurs couleurs simultanément.

La série des X60 est composée de six modèles à la finesse d'impression de plus en plus élevée. Les premières imprimantes de la gamme, les ProJet 160 et 260C, permettent déjà d'obtenir de bons résultats, avec une épaisseur de couche de 0,1 mm et une résolution

La technologie 3DP, qui est la seule à utiliser des glues précolorées, permet des impressions couleur directement dans la matière, ce qui réduit l'affadissement des teintes et le post-traitement. Ce rendu couleur n'est égalé à l'heure actuelle par aucune autre imprimante 3D.

Depuis le lancement de la première génération de machines à la fin des années 1990, la fiabilité et la solidité des X60 se sont nettement améliorées. Nous en sommes aujourd'hui à la troisième génération, qui comporte deux grandes innovations : l'automatisation de la gestion du consommable et l'amélioration des matériaux. Grâce à un espace de stockage automatisé, le bac de poudre n'a ainsi plus besoin d'être rempli et vidé manuellement, l'ensemble du processus devenant plus propre et plus simple. Mais les recherches ont surtout porté sur l'amélioration chimique du liant et du matériau composite, l'objectif étant d'obtenir le meilleur équilibre possible entre durcissement et adhésion de la goutte de liant sur la poudre. La matière durcit quasi instantanément, tout en assurant une bonne adhésion pour la prochaine couche.

Les imprimantes 3D de production

Pour les grands groupes industriels qui ont d'énormes besoins en prototypage et en fabrication, les imprimantes 3D dites de production sont les modèles les mieux adaptés, en raison de leurs performances élevées, le large éventail de matériaux disponibles et leur excellente qualité d'impression. En contrepartie, elles nécessitent des investissements bien plus importants.



L'imprimante EOS P 110. (Source : EOS)

LES EOS P

Les imprimantes EOS P (P pour polyamide) de l'entreprise allemande EOS constituent aujourd'hui les systèmes de fabrication additive par frittage laser les plus populaires. La plupart des services d'impression 3D en ligne comme Sculpteo et Shapeways sont d'ailleurs équipés de ce type de machine.

La gamme EOS P propose des imprimantes de production allant du prototypage et à la petite série (P 110 et P 396), jusqu'à des modèles à très haut rendement et grand volume d'impression (P 760 et P 800). La plus récente de la gamme est la EOS Formiga P 110, qui imprime à partir de polyamide 12 et de ses variantes. Elle coûte environ 130 000 €.

LA GAMME PROJET 7000 DE 3D SYSTEMS

Depuis 2012, 3D Systems propose la série ProJet 7000 qui se décline en trois modèles SD, HD et MP, pour des coûts compris entre 200 000 et 240 000 €. Ces trois machines utilisent la stéréolithographie avec une épaisseur de couche de 0,125 mm. Leur volume d'impression est de 380 × 380 mm avec deux profondeurs possibles, 250 mm et 50 mm.

LA GAMME OBJET CONNEX



Le modèle Objet Connex500, imprimante de production pour séries limitées multimatériaux. (Source : Objet)

plusieurs matériaux simultanément en un seul passage. De plus, ces machines acceptent les composites, soit plus de 60 matériaux compatibles, dont 51 Digital Materials, fabriqués à la demande et sur mesure (voir page 74). Avec ces composants, il devient ainsi possible de reproduire des matériaux souples ou rigides, opaques ou transparents, des plastiques standards ou encore des ABS d'ingénierie avancée.

Les spécificités des imprimantes de la gamme Objet Connex sont adaptées à une production d'objets finis qualitatifs, qui peuvent être tenus en main dès la fin de l'impression. L'épaisseur de couche est en moyenne de 16 µm avec une très grande précision de détail et de finition de surface.

Le débit de production est important, à savoir jusqu'à 20 mm par heure et par bande, sans nécessiter de suivi particulier. Enfin, les cartouches (entièrement scellées, de type REACH) sont faciles à charger et à retirer.

En janvier 2014, Stratasys a lancé la première imprimante multimatiériaux et multicouleur à jet, nommée Objet500 Connex3. Pour fabriquer des objets de plusieurs centaines de couleurs, la machine utilise une technique de combinaison similaire à celle des imprimantes 2D à jet d'encre, en mélangeant les trois couleurs de base cyan, magenta et



L'imprimante Objet500 Connex3. (Source : Stratasys)

jaune. Elle est capable d'imprimer en plastique ou en caoutchouc, ces deux matériaux pouvant être combinés en de multiples variantes, ce qui permet de créer des pièces comportant des zones flexibles, rigides, transparentes ou opaques. Cette imprimante multimatière coûte environ 240 000 €.

LES SÉRIES DIMENSION ET FORTUS DE STRATASYS

Adaptés à la fabrication de prototypes et aux tests fonctionnels, les modèles de la gamme Dimension de Stratasys sont les plus populaires de l'impression 3D professionnelle. Ces imprimantes, qui utilisent la technique FDM, permettent d'imprimer une épaisseur de couche comprise entre 0,254 et 0,33 mm.

Les Fortus sont quant à elles des imprimantes de production permettant de créer de grands objets. Elles sont fournies avec leur matériau de support, une réserve de matériau d'impression et un système complet de nettoyage. Elles s'adressent à n'importe quelle entreprise désireuse d'imprimer des pièces de grande taille (25,4 × 25,4 × 30,48 cm).

Ces machines impriment notamment en ABSplus, un thermoplastique adapté à la production de séries et 40 % plus résistant qu'un ABS classique. Le nombre de matériaux disponibles augmente en montant en gamme. Les pièces sont imprimées du socle au sommet en fines couches, incluant aussi le matériau de support. Ce dernier peut être supprimé dès la fin de l'impression sans nécessiter de traitement particulier.

Les Fortus (cinq modèles disponibles) sont adaptées à la production de prototypes, moules, modèles de présentation et outillages. On les emploie dans l'aéronautique, la défense, les secteurs automobile, médical et éducatif, ainsi que pour le prototypage de biens de consommation.

LES IMPRIMANTES GRANDS VOLUMES

Le volume maximal d'impression reste à l'heure actuelle l'une des principales limitations en impression 3D. Certains constructeurs proposent donc des machines équipées de plateaux beaucoup plus grands, qui permettent d'imprimer des objets de plus d'un mètre en longueur, largeur et hauteur.

Alors que le plus gros modèle proposé par 3D Systems, la ProJet 5000, est équipé d'un plateau de 55 × 39,3 × 30 cm, c'est la VX4000 de Voxeljet qui se démarque par ses dimensions hors normes, avec un volume d'impression de 4 × 2 × 1 m, ce qui représente environ huit fois le volume permis par les autres machines. Utilisant un procédé de poudres et de liants, cette imprimante permet, par exemple, d'imprimer un modèle de voiture de sport à taille réelle !

Voxeljet, une réussite à l'allemande

Fondée en 1999 par quatre employés de l'université technique de Munich, l'entreprise Voxeljet s'est rapidement imposée comme l'un des principaux fabricants d'imprimantes 3D grand format. Elle compte parmi ses clients 3M, Ford Motor ou encore Daimler AG.



La VX4000, l'une des imprimantes 3D les plus grandes du marché. (Source : Voxeljet)

LES IMPRIMANTES DE MATIÈRE ALIMENTAIRE

Ce début d'année 2014 a vu arriver une gamme d'imprimantes 3D spécialisées dans l'impression de matériaux comestibles : la série ChefJet de 3D Systems. Ces machines utilisent comme matériau imprimable un similisucré, coloré et parfumé à différentes saveurs : chocolat, vanille, menthe, pomme, cerise, pastèque... Elles peuvent être employées par les particuliers ou les professionnels pour confectionner des garnitures et des nappages. Le volume d'impression de la ChefJet d'entrée de gamme (3 700 €) est de $20 \times 20 \times 15$ cm et de $25 \times 35 \times 20$ cm pour le modèle ChefJet Pro (7 400 €).



Impression 3D de cubes en sucre coloré devant l'imprimante ChefJet. (Source : AFP)

L'arrivée de cette série ChefJet est le résultat direct de la politique active d'acquisition de 3D Systems qui a acheté en septembre 2013 Sugar Labs, une jeune entreprise californienne qui a su adapter la technologie CJP (*Color Jet Printing*) de 3D Systems aux matériaux comestibles.

D'autres projets d'imprimantes 3D de nourriture sont en cours de développement. L'entreprise Barilla travaille ainsi en partenariat avec une société hollandaise pour imaginer le futur de l'impression 3D de pâtes alimentaires, mais elle n'a rien annoncé d'officiel pour l'instant. De son côté, le constructeur Natural Machines, basé à Barcelone, développe la Foodini, une imprimante 3D qui dépose, couche après couche, pâtes, pizzas ou quiches, qui peuvent être ensuite cuites au four. Ce prototype est encore à son premier stade de développement et ne sera pas prêt avant fin 2014. Selon l'équipe, la Foodini devrait coûter aux alentours de 1000 €.



Impression 3D d'épinards en forme de dinosaures. (Source : Natural Machines)

LES IMPRIMANTES DE DENTISTERIE

Les laboratoires de prothèses dentaires utilisent massivement l'impression 3D pour réaliser moussages, couronnes, bridges et armatures, contours complets et guides chirurgicaux sur mesure. C'est pourquoi les constructeurs proposent des imprimantes 3D spécifiques à cette profession, où l'accent est mis sur la finesse et la rapidité de production, mais surtout sur un type de machine très particulier : l'imprimante à cire perdue.

La technique de ce genre d'imprimante n'offre rien de nouveau, si ce n'est que l'objet réalisé n'est pas l'objet final. Il s'agit d'une forme en cire lui correspondant en tout point, qui sera utilisée pour le coulage de la pièce à produire.

3D Systems commercialise les imprimantes ProJet DP3000 et ProJet MP3000, toutes deux spécialisées en dentisterie, tandis que EnvisionTEC propose aussi une gamme spécifique au marché dentaire. Cette entreprise a notamment lancé en 2013 la 3Dent SCP, une imprimante 3D qui utilise le matériau breveté E-Denstone – proche du gypse – pour fabriquer des moules dentaires à la vitesse de 2 mm/heure. Quant au seul constructeur français de systèmes de fabrication additive, Prodways (ex-Phidias Technologies), il distribue des machines pour le biomédical avec son modèle D35, qui exploite la technologie brevetée Moving DLP.

Tous ces modèles permettent de réaliser rapidement des pièces lisses, qui nécessitent peu de travail de finition et laissent une très faible quantité de résidus. Les matériaux utilisés par ces types de machines sont en général des plâtres ou des cires, le rendu pouvant être mat ou brillant. Ils sont compatibles avec les cires traditionnelles employées dans la profession.

Ces imprimantes spécialisées permettent aux laboratoires dentaires de limiter leur consommation en alliages, d'augmenter leur temps de productivité et de réduire les temps de finition. L'architecture de ces systèmes est ouverte, ce qui permet de transférer des fichiers à partir de n'importe quel scanner.

LES IMPRIMANTES DE BIJOUTERIE

Avec la dentisterie, la bijouterie constitue l'autre secteur d'activité concerné par les imprimantes 3D de moulage à cire perdue, mais les constructeurs ont déployé des gammes distinctes pour chaque marché. La ProJet CP3000 de 3D Systems permet ainsi l'impression rapide de modèles en cire perdue pour toutes sortes de géométries. Les états de surface et la précision sont exceptionnels, et les applications extrêmement variées.

Actuellement, la bijouterie de luxe n'emploie quasiment plus que des imprimantes 3D pour réaliser les moules à cire perdue, utilisés pour la fabrication de modèles d'une grande finesse. L'impression 3D offre l'avantage de concevoir rapidement des pièces uniques, dont les caractéristiques sont supérieures aux moules à cire perdue traditionnels.

LES IMPRIMANTES DE MÉTAL

La possibilité d'imprimer des objets en métal constitue l'un des récents progrès de l'impression 3D. Ainsi, il est désormais possible d'imprimer des pièces en alliages de titane, en acier inoxydable, en bronze, ou encore en or. Les machines spécialisées se sont multipliées ces dernières années, pour aller vers des rendus de plus en plus finis. Elles s'adressent avant tout à l'industrie aérospatiale et automobile, ainsi qu'au secteur de la défense. Voici un petit panorama des principaux constructeurs de ces machines très spécifiques.

Arcam

Arcam est une entreprise suédoise fondée en 1997 et spécialiste de la technologie EBM, qui permet de produire des pièces à partir de poudre de métal grâce à un puissant faisceau d'électrons. Environ 130 imprimantes Arcam ont été installées à travers le monde (25 en 2013), principalement dans l'industrie de l'implant médical, l'aérospatiale et la défense.

L'entreprise propose à l'heure actuelle trois modèles de machines. L'imprimante Arcam Q10 est utilisée pour la fabrication d'implants orthopédiques en titane et en alliage cobalt-chrome. Elle offre un meilleur état de surface du rendu et une plus grande productivité que la génération précédente Arcam A1. Le deuxième modèle, baptisé Arcam A2X, a été spécialement mis au point pour l'industrie aérospatiale et la défense. Permettant de fabriquer de grandes pièces en métal dans une grande variété de matériaux, il se compose de deux cabines de production interchangeables (une large et une haute, selon l'objet souhaité). Enfin, la dernière-née des imprimantes Arcam est la Q20, imaginée également pour l'industrie aérospatiale, dont le grand volume d'impression permet d'imprimer des pièces imposantes comme des pales de turbine ou des systèmes de ventilation pour les avions.

Les imprimantes Arcam sont compatibles avec quatre poudres de métaux : deux alliages de titane (Ti6Al4V et Ti6Al4V ELI), Titane Grade 2 et un alliage cobalt-chrome (CoCrMo ASTM F75).



L'Arcam Q10, pour la fabrication additive de pièces en métal.
(Source : Arcam)

ExOne

Fondée en 2005, l'entreprise ExOne est née au sein d'Extrude Hone Corporation, qui développe et distribue des systèmes de production depuis plus de 40 ans. Extrude Hone Corporation a notamment fait partie des détenteurs de la licence d'utilisation du procédé 3DP, mis au point par le MIT en 1996, au même titre que l'entreprise Z Corporation.

Contrairement à Z Corporation qui a développé son propre matériau composite compatible avec ses machines 3DP, ExOne s'est orienté vers les applications de la 3DP pour l'impression en métal et l'outillage, en y ajoutant de nouveaux matériaux comme le bronze, le tungstène, l'or ou le verre. Aujourd'hui, cette société développe et distribue des systèmes de fabrication additive pour l'impression en métal, en sable et en verre.

Les volumes produits sont compris entre $40 \times 60 \times 35$ mm pour les plus petites impressions, et $780 \times 400 \times 400$ mm pour les plus grandes. Le dernier modèle lancé par ExOne en septembre 2012 est la M-Flex, dix fois plus rapide que les modèles de la génération précédente. Cette machine imprime en acier inoxydable, en bronze et en tungstène à un rythme de 30 secondes par couche, pour une épaisseur moyenne de couche de 0,1 mm.

Les industriels utilisent les machines ExOne pour produire des pièces d'équipement lourd (pâles, outillage). Ces imprimantes peuvent être aussi employées dans le milieu de la décoration, de l'art ou de l'architecture (pièces finies et non des maquettes). L'artiste Bathsheba Grossman fait ainsi appel à ExOne pour la fabrication de ses grandes sculptures combinant acier inoxydable et bronze.



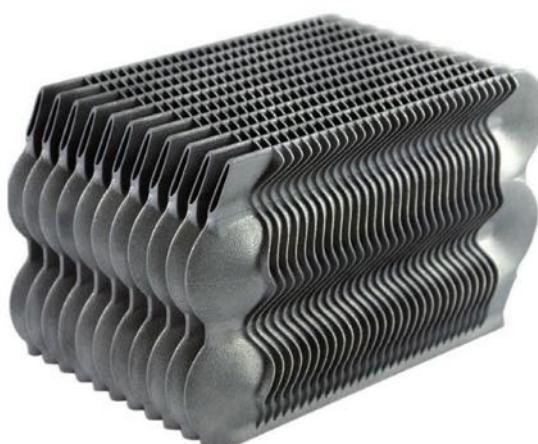
M-Flex, dédiée à l'impression en métal. (Source : ExOne)

ProMetal

Appartenant à ExOne, l'entreprise ProMetal est spécialisée dans l'impression 3D de moules en sable, qui sont ensuite utilisés pour la fonte de pièces en métal. Ce procédé est bien plus rapide qu'une technique traditionnelle, de 6 à 12 mois ! D'une grande précision, les moules sont aussi plus légers et permettent de produire des pièces plus complexes.

Le volume d'impression moyen du modèle S-Print est de $750 \times 380 \times 400$ mm, pour une vitesse d'impression de 40 secondes par couche. Composés de quartz et de sables spéciaux, les moules fabriqués avec ce procédé sont utilisables dès leur sortie de la machine.

EOSINT



Échangeur de chaleur d'automobile, imprimé en métal sur une machine EOSINT. (Source : Within/EOS)

Les imprimantes EOSINT à frittage laser sont spécialisées par matériaux, permettant la production de pièces en métal, plâtre ou sable. En quelques heures, il est possible de réaliser un objet métallique d'une grande finesse. Les matériaux compatibles sont variés : métaux légers, inoxydables, aciers et alliages.

Le modèle EOSINT M280 fait intervenir de l'azote pour accélérer la soudure du métal et améliorer la solidité de la pièce. Un système appelé LPM (*Laser Power Monitoring*) permet de contrôler les performances du laser tout au long du processus d'impression.

Les sPro de 3D Systems

La société 3D Systems propose elle aussi une gamme d'imprimantes à frittage laser pour l'impression en métal, notamment les modèles sPro 125 SLM et sPro 250 SLM. Ces derniers permettent d'imprimer des pièces en métal jusqu'à 12,5 cm de longueur pour le premier, et 32 cm pour le second.

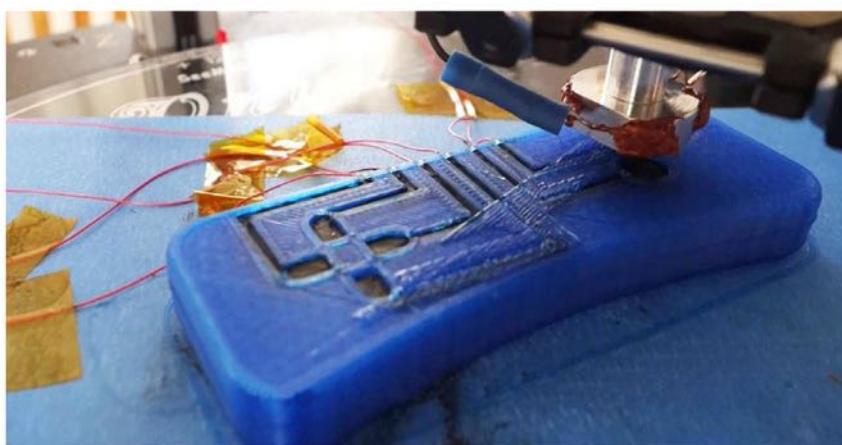
Une imprimante 3D personnelle de métal

Plusieurs nouveaux venus s'intéressent à l'impression 3D de métal pour les particuliers. Ainsi, l'entreprise Newton 3D a révélé en décembre 2013 avoir mis au point une imprimante personnelle capable de créer des pièces métalliques. Ce projet est né du travail d'Esteban Schunemann, fondateur de cette société en 2009 et étudiant en thèse à l'université Brunel de Londres. L'imprimante en question peut imprimer à partir d'or, d'argent, de bronze, de cuivre et d'acier, sur de petits volumes (127 × 127 mm) et à une vitesse de 300 mm/min. À ce rythme, il faut environ 15 minutes pour fabriquer une paire de boutons de manchettes. Newton 3D est financée par le fonds d'investissement spécialisé iMakr.VC, créé par l'entrepreneur français Sylvain Preumont.

LES IMPRIMANTES À CIRCUIT ÉLECTRONIQUE

L'impression 3D d'électronique est un rêve partagé par de nombreux acteurs du domaine. Jeune entreprise fondée en 2009 et située à Brisbane en Australie, Cartesian Company a ainsi fait grand bruit fin 2013 sur Kickstarter en lançant Argentum, la première imprimante 3D personnelle à circuit imprimé, dont le fonctionnement se rapproche d'une machine à jet d'encre. Deux types de matériaux sont déposés, une solution de nitrate d'argent et une autre d'acide ascorbique, auxquelles est ajouté un solvant (le tert-butanol) pour provoquer la réaction chimique souhaitée. Les premières machines devraient être prêtes pour septembre 2014 et coûteront un peu moins de 2 000 €.

Autre initiative dans ce secteur, Rabbit Prototyping, une jeune start-up issue d'un projet de recherche mené par des étudiants de Stanford, dont le Français Alexandre Jais, a développé un double extrudeur open source capable d'imprimer simultanément de l'encre conductrice et du plastique. Compatible avec les imprimantes de type RepRap, cet extrudeur permet ainsi de réaliser des pièces qui conduisent l'électricité.



Impression d'un prototype fonctionnel de manette de jeu vidéo. (Source : Rabbit Prototyping)

CHAPITRE 4

LES MATÉRIAUX D'IMPRESSION 3D

Les principaux matériaux utilisés actuellement en impression 3D se répartissent en deux grandes familles, les plastiques et les métaux, auxquels viennent s'ajouter les céramiques et les matériaux organiques. Bien entendu, ils ne sont pas compatibles avec toutes les techniques d'impression 3D.

Le procédé de frittage laser imprime à partir de poudre. C'est l'une des technologies de fabrication additive qui offre la plus grande diversité de matières premières : poudre de nylon, de métal (titane, acier inoxydable, acier d'outillage maraging) et de céramique.

Les techniques EBM et EBFM sont spécialisées dans la fabrication de pièces en métal, tandis que la stéréolithographie utilise des polymères liquides, généralement des plastiques aux propriétés mécaniques variées.

Les imprimantes personnelles impriment essentiellement à partir de deux types de plastiques : l'ABS et le PLA. Mais certains modèles à dépôt de filament fondu (FDM) peuvent aussi accepter des matières alimentaires : chocolat, fromage, glaçage au sucre, entre autres. La technologie FDM est également employée pour l'impression en béton.

Principaux matériaux d'impression 3D. (Source : Econolyst)

MATÉRIAUX ORGANIQUES	CÉRAMIQUES	PLASTIQUES	MÉTAUX
Cires	Alumine	ABS (acrylonitrile butadiène styrène)	Aluminium
Tissus/Cellules	Mullite	PLA (acide polylactique)	Acier d'outillage
	Zircone	PET (polytéraphthalate d'éthylène)	Titane
	Carbure de silicium	Polyamide (nylon)	Inconel
	Phosphate tricalcique β	Polyamide renforcé	Cobalt-chrome
	Résines époxy chargées en céramique (nano)	PEEK (polyétheréthercétone)	Résines époxy thermodurcissables
	Silice (sable)	Cuivre	Acier inoxydable
	Plâtre	PMMA (polyméthacrylate de méthyle)	Or/Platine
	Graphite	PC (polycarbonate)	Hastelloy
		PPSU ou PPSF (polyphénylsulfone)	
		Ultem	
		Alumide	

Les constructeurs ont déposé des brevets par technologie et machine, mais aussi pour les composants compatibles avec ces imprimantes. Chaque fabricant possède donc sa propre gamme de matériaux imprimables. Objet a ainsi développé une ligne de 51 Digital Materials et 14 cartouches prêtes à l'emploi pour ses machines (technologie PolyJet). Z Corporation propose ses propres matériaux composites, compatibles uniquement avec les imprimantes X60 (technologie 3DP). Les machines ProJet acceptent seulement la ligne de matériaux VisiJet, commercialisée par 3D Systems, aussi à l'origine de la gamme Accura SLA, RenShape SLA (pour ses machines à stéréolithographie) et DuraForm SLS (pour ses imprimantes à frittage laser).

Voici un panorama des principaux matériaux existants, en fonction des propriétés et usages recherchés pour les pièces à fabriquer.

Les plastiques

Très employés par l'impression 3D, les plastiques sont des polymères qui peuvent être mis en forme sous l'effet de la chaleur, comme l'ABS et le PLA, ou de la lumière, comme les résines et les polyamides.

LES ABS ET SIMILI-ABS

Appartenant à la famille des thermoplastiques, l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) est l'un des matériaux les plus populaires de l'impression 3D. Utilisé par toutes les imprimantes personnelles (MakerBot, Ultimaker, Bits from Bytes, UP!, Solidoodle...), il constitue aussi le composant de base du constructeur Stratasys. Il sert aussi à imprimer le Stanford Bunny, un modèle de test d'imprimante 3D open source.

Fondant entre 200 et 250 °C, l'ABS peut supporter des températures relativement basses (jusqu'à -20 °C) et élevées (80 °C). Lorsqu'il est imprimé par la technique du dépôt de filament fondu, il nécessite l'utilisation d'un plateau d'impression chauffant (entre 90 et 105 °C). Contrairement au PLA, il n'est pas biodégradable. Il résiste bien aux chocs grâce à la structure élastomère du polybutadiène et offre un très beau rendu, avec une surface lisse et brillante.

Il existe en réalité de nombreux types d'ABS, aux propriétés multiples, dont le conditionnement diffère selon la technologie d'impression 3D associée. Les imprimantes personnelles à dépôt de filament fondu (FDM) l'emploient généralement en bobines de filament d'1,75 mm ou de 3 mm de diamètre, aux couleurs variées. Des simili-ABS sont aussi utilisés en stéréolithographie, sous forme de polymères liquides, mais également par la technologie PolyJet mise au point par Objet.

L'ABS est déjà très courant dans les objets qui nous entourent : appareils électroménagers, téléphones, ordinateurs, jouets... Les célèbres briques de Lego sont notamment réalisées dans ce matériau.

Le Stanford Bunny

Le Stanford Bunny, ou lapin de Stanford, est un modèle de test utilisé en 3D, développé par Greg Turk et Marc Levoy en 1996 à l'université de Stanford (États-Unis). Il est constitué de 69 451 polygones, calculés à partir du scan 3D d'une figurine de lapin en céramique. Popularisé par les utilisateurs de logiciels de CAO, ce modèle permet de vérifier la configuration d'une imprimante 3D open source.



Stanford Bunny partagé sur Thingiverse et imprimé en ABS. (Source : Matthew LaBerge)

ABS et simili-ABS acceptés par les principaux constructeurs.

FABRICANT	GAMME
Stratasys	ABS-ESD7, ABS-M30, ABSplus-P430, ABSi, ABS-M30i
Objet	FullCure 515, FullCure 535, Digital Material RGD5160-DM
Envision TEC	ABStuff, ABflex
MakerBot, Ultimaker...	ABS

LE PLA

Les imprimantes 3D open source qui utilisent la technique FDM n'acceptent généralement que deux types de matériaux : l'ABS et le PLA (*polylactic acid*, acide polylactique). Ce dernier, fondant à une température comprise entre 160 et 220 °C, est plus difficile à manipuler que l'ABS, car il refroidit et durcit très rapidement. Mais, contrairement à celui-ci, il ne nécessite pas de plateau d'impression chauffant : l'impression, réalisée à 185 °C, se fait directement sur une plaque en acrylique, voire sur un plateau en bois recouvert d'adhésif. En complément du PLA, certaines imprimantes 3D utilisent un matériau de support, le PVA.

Le PVA

Le PVA (*polyvinyl alcohol*, alcool polyvinyle) est le plastique qui est généralement utilisé comme matériau de support dans les impressions en PLA ou ABS par dépôt de filament fondu. Biodégradable, il se dissout après impression et trouve de plus en plus d'applications dans les imprimantes à multiples têtes d'impression.



Bobines de filament de PLA pour imprimantes FDM. (Source : RepRap Prescription)

Le PLA possède d'excellentes propriétés environnementales. C'est un plastique issu de l'amidon de maïs, qui n'emploie aucune énergie fossile. Il est biodégradable et compostable (dans un composteur industriel chauffé à plus de 90 °C), ce qui en fait un matériau de plus en plus prisé par les particuliers. En revanche, il est sensible à l'eau : un passage répété en machine à laver ou un séjour prolongé en extérieur risquent d'affadir et d'abîmer un objet en PLA.

Le PLA peut être de différentes couleurs (noir, blanc, jaune, rouge et vert) et même transparent. Acceptant tout type de finition (peinture, vernis, etc.), ce matériau peut notamment servir pour des objets devant être en contact avec des aliments (tasses, bols, assiettes, saladiers...), à condition qu'il soit pur et que la tête d'impression dans laquelle passe le filament soit en acier inoxydable.

LE PET

Nouveau venu parmi les matériaux de l'impression 3D personnelle, le PET (polytéraphthalate d'éthylène) est un plastique de type polyester saturé, issu du pétrole. Plus solide que l'ABS, il est tout indiqué pour l'impression de pièces fonctionnelles qui demandent à la fois solidité et flexibilité : coques de téléphone, accessoires, pièces mécaniques, pièces de robotique...

Le PET est disponible pour l'impression 3D à dépôt de filament fondu. Il se présente sous forme de bobines, comme le PLA ou l'ABS. Mais à la différence de ce dernier, le PET ne nécessite pas de plateau d'impression chauffant et ne dégage pas d'odeur. Il fond à une température d'environ 220 °C.

LES POLYAMIDES

Les polyamides (PA) constituent le matériau de base de la technique du frittage laser. Ils se présentent le plus souvent sous la forme d'une poudre fine, qui peut s'apparenter à de la farine très blanche. Ils comportent de nombreux avantages : ils sont très stables, résistants aux chocs et permettent une grande variété d'applications. Les objets réalisés sont rigides et légèrement flexibles, offrant un grand niveau de détail.

Biocompatibles, les polyamides ont été approuvés pour des contacts alimentaires, à l'exception des aliments à teneur en alcool. Ils sont généralement utilisés pour la production de pièces fonctionnelles et peuvent dans certains cas remplacer le moulage par injection. Ils conviennent notamment à la réalisation d'engrenages et de mécanismes.

Contrairement à l'ABS ou au PLA, imprimés par dépôt de filament, l'impression en polyamide par frittage laser ne provoque pas d'effet d'escalier. La surface est mate et opaque, avec un toucher légèrement granuleux et poreux.



Modèle BuckyBall imprimé en polyamide. (Source : Mr Nöt pour Sculpteo)

LES PLASTIQUES COMPOSITES MULTICOLORES

Il est possible d'imprimer plusieurs couleurs au cours d'une même impression, la technique la plus aboutie étant celle développée par Z Corporation, société rachetée depuis par 3D Systems. Cette entreprise a en effet mis au point un matériau composite spécial, dont la composition exacte est gardée secrète, qui est utilisé par les imprimantes X60. Avec leur

technologie exclusive 3DP, ces machines permettent ainsi d'imprimer en couleurs haute définition : 390 000 teintes sont disponibles avec une machine X60 ! Les objets obtenus respectent fidèlement les couleurs demandées, mais le résultat de surface est assez rugueux au toucher.

D'autres techniques existent pour imprimer plusieurs couleurs simultanément. Les machines Replicator Dual Extruder de MakerBot et la 3DTouch à multiples têtes d'extrusion de Bits from Bytes ont été lancées pour répondre à ce besoin. Le modèle de MakerBot utilise deux bobines de plastique séparées, qui se coordonnent pendant l'impression.

Enfin, on peut citer les matériaux édités par Objet, appelés Digital Materials (voir page 74), qui permettent aussi de combiner les couleurs, mais seulement dans les niveaux de gris.



Un prototype de multimètre imprimé avec le matériau polychrome de Z Corporation. (Source : Z Corporation / 3D Systems)



Globe terrestre imprimé avec la Replicator Dual Extruder de MakerBot. (Source : MakerBot Industries)



Vidéo d'une impression bicolore avec la MakerBot
à l'adresse :
<http://bit.ly/videoMakerBot>

LES RÉSINES

Les résines, dont les propriétés sont multiples et variées, constituent le troisième grand type de matériau couramment utilisé en impression 3D (techniques SLA, PolyJet), après les thermoplastiques, de type PLA et ABS, et les polyamides. Proposées par différents services en ligne (Sculpteo, i.materialise), elles sont disponibles en mat ou brillant, en blanc ou noir. Les post-traitements sont possibles, comme la coloration.



Figurines de Valkyries imprimées en résine. (Source : Bpgda, Gabelko/Moddler)

LES PLASTIQUES TRANSPARENTS



Moulage dentaire réalisé avec le matériau VisiJet Clear à l'aide d'une imprimante ProJet 6000. (Source : 3D Systems)

Grâce à la transparence de certains thermoplastiques, il est possible de réaliser des objets laissant passer la lumière (lampes) ou permettant de voir au travers (lentilles, verres). Utilisée pour le prototypage, cette transparence sert par exemple à contrôler la circulation d'un fluide. On l'emploie aussi beaucoup dans le monde médical.

Ces matériaux sont compatibles avec les techniques de stéréolithographie, DLP et frittage laser. La stéréolithographie utilise généralement des polymères ayant un rendu transparent, mais plus ou moins opaque et coloré. La ligne de matériaux Accura SLA de 3D Systems comporte ainsi

des plastiques très transparents, Accura ClearVue et Accura 60 étant les plus clairs de leur catégorie. En revanche, d'autres plastiques comme Accura Peak sont plus opaques, laissant passer la lumière mais ne permettant pas de voir entièrement au travers.

La technologie PolyJet peut aussi recourir à certains photopolymères au rendu transparent. Les matériaux VisiJet Clear de 3D Systems ou WaterClear de Materialise sont ainsi utilisés en dentisterie pour la création de moulages et d'appareils dentaires discrets.

Gammes de matériaux transparents par constructeur.

FABRICANT	GAMME
Stratasys	ABSi (laissant passer la lumière)
Objet	FullCure 720, VeroClear
EnvisionTEC	E-Shell 300
3D Systems	Accura Peak

LES PLASTIQUES RÉSISTANT À LA CHALEUR

La résistance aux hautes températures fait partie des qualités attendues pour certains types d'impressions 3D. Les pièces internes, telles que les ventilateurs des tours d'ordinateur, ou les prototypes dans lesquels vont passer des gaz ou des liquides chauds requièrent en effet des plastiques qui ne se déforment pas à la chaleur. De même, les moules nécessitent fréquemment l'emploi de plastiques supportant des températures élevées, notamment ceux servant au moulage métal.

Utilisés en stéréolithographie et en frittage laser, ces matériaux sont aussi souvent les plus imperméables à l'eau ou à l'humidité. VisiJet HiTemp, par exemple, est un plastique proposé par 3D Systems qui résiste à l'humidité et à des températures pouvant atteindre 130 °C. De son côté, EnvisionTEC commercialise deux matériaux supportant la chaleur, baptisés HTM140 et HTM140IV. De teinte vert foncé, le premier est adapté à la fabrication de moules non métalliques. Le second, de couleur blanc ivoire opaque, résiste jusqu'à des températures de 140 °C.



Prototype de pièce de ventilation automobile imprimé avec le matériau High Temperature d'Objet.
(Source : Objet)

D'une très grande stabilité, le matériau High Temperature (RGD525) d'Objet permet de tester des pièces qui laissent passer de l'air ou des liquides chauds (robinets, tuyaux). Sa température maximale autorisée est de 67 °C, pouvant s'élèver à 80 °C avec un post-traitement adapté.

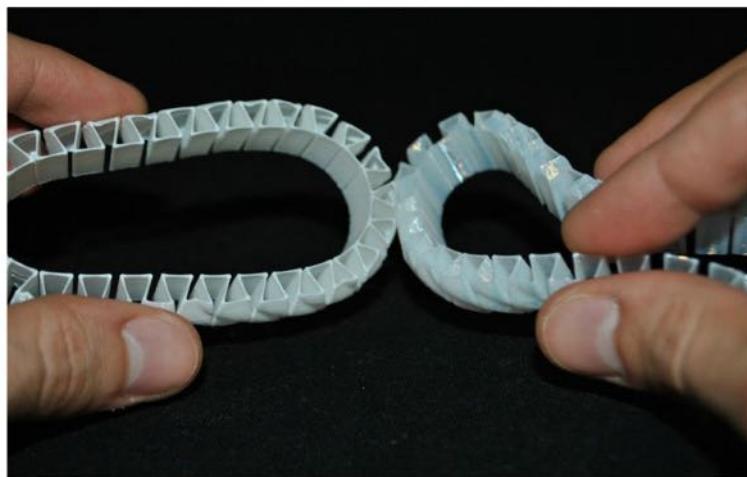
LES PLASTIQUES FLEXIBLES ET LES CAOUTCHOUCS

Les matériaux flexibles ont fait leur apparition assez récemment dans l'impression 3D. Ils permettent de reproduire le comportement et le toucher du caoutchouc, ou de la gomme, et de créer des objets souples. Ils sont bien adaptés à des modèles de démonstration ou de présentation, et employés notamment pour la réalisation de boutons, de poignées, de joints et de tuyaux.



Prototype de brosse à cheveux combinant un matériau flexible et un matériau rigide.
(Source : Objet)

NinjaFlex est un thermoplastique élastomère qui permet d'imprimer des pièces flexibles à partir d'une imprimante personnelle. S'extrudant à une température comprise entre 210 et 225 °C, il est déposé sur un plateau d'impression chauffant entre 30 et 40 °C. Autre plastique flexible développé pour l'impression 3D, BendLay est un ABS modifié qui absorbe 30 % moins d'eau que l'ABS standard et s'extrude à une température de 215 à 240 °C. À mi-chemin entre un ABS dur et un PLA flexible, il peut être utilisé en packaging alimentaire et sur des machines médicales. Quant auFlex EcoPLA, c'est un PLA flexible distribué pour l'instant uniquement aux Pays-Bas par l'entreprise Form Futura. Il est disponible en plusieurs couleurs (bleu, rouge, noir, blanc).



À gauche, bracelet imprimé en PLA solide ; à droite, le même en Flex EcoPLA.
(Source : Algorithmic Art)

Le matériau iFlex 500 d'EnvisionTEC produit des pièces en simili-caoutchouc qui résistent à l'eau et absorbent peu les liquides. Objet est un autre fabricant spécialiste des matériaux souples d'impression 3D. La famille Objet Tango est une gamme de quatre simili-caoutchoucs utilisés par les imprimantes Objet Connex : TangoGray, TangoBlack, TangoPlus et TangoBlackPlus. Ils possèdent différents degrés d'élasticité qui offrent une grande variété d'applications. Ils sont notamment présents sur certains appareils électroniques comportant des zones non glissantes ou douces (télécommandes, par exemple), sur des instruments médicaux ou dans des intérieurs de voitures.

Les Digital Materials d'Objet sont des matériaux réalisés sur mesure à partir des composants VeroWhitePlus, TangoBlackPlus et TangoPlus. En jouant sur ces différentes combinaisons, on peut définir avec précision les propriétés de ces matériaux et obtenir ainsi six degrés de dureté Shore A, de Shore 40 à Shore 95.

L'échelle de dureté Shore

L'échelle Shore permet de mesurer la dureté des élastomères, de certains polymères thermoplastiques, des cuirs et des bois. Elle a été définie par Albert F. Shore, inventeur du duromètre dans les années 1920, un appareil destiné à faciliter la mesure de la dureté hors laboratoire. En réalité, il existe douze échelles de mesure Shore, les plus courantes étant Shore A pour les matériaux mous et Shore D pour les matériaux durs. Ces échelles sont fréquemment utilisées en impression 3D.

LE POLYPROPYLÈNE ET LES SIMILI-POLYPROPYLÈNES

Le polypropylène (PP) est un plastique très résistant, relativement flexible et capable d'absorber les chocs. Au quotidien, on le trouve notamment dans les pièces devant s'emboîter facilement : ceintures de sécurité, bouchons de bouteille, boîtiers de CD-Rom, coques de téléphone...



Boucle de ceinture imprimée en 3D en simili-polypropylène. (Source : Objet)

Dans cette gamme de matériaux, EnvisionTEC propose le LS600, un simili-polypropylène hautement durable qui offre un grand niveau de détail, et le R5/R11 qui permet de fabriquer des moussages souples. Chez 3D Systems, il y a le VisiJet Flex, proche en apparence et au toucher d'un polypropylène. Chez Objet, on peut citer DurusWhite, une famille de simili-polypropylènes aux propriétés thermiques améliorées, mais uniquement compatibles avec les imprimantes Objet Connex.

Les matériaux VisiJet de 3D Systems

La ligne VisiJet a été conçue pour les imprimantes 3D ProJet de 3D Systems. Elle comprend six matériaux aux propriétés physiques variées, qui sont adaptés à la plupart des usages commerciaux de l'impression 3D.

- VisiJet Flex s'apparente au polypropylène. Blanc et opaque, il offre une grande flexibilité, permettant de fabriquer des clips, par exemple.
- VisiJet Tough est plus proche de l'ABS par ses performances. De couleur gris opaque, il possède une longue durée de vie et résiste aux chocs. Adapté aux tests d'usages et de formes, ce matériau permet aussi de réaliser des moules pour la production d'objets en silicone RTV (*Room Temperature Vulcanizing*).
- VisiJet Clear se rapproche d'un polycarbonate, à l'aspect très clair – idéal pour les objets nécessitant de la transparence. Il est solide et durable.
- VisiJet HiTemp est un matériau transparent d'une grande rigidité qui résiste à la chaleur (jusqu'à 130 °C) et à l'humidité.
- VisiJet e-Stone est un matériau spécifique réservé au domaine médical et dentaire (couronnes, bridges...). Il permet d'obtenir des pièces d'une grande précision, qui se dégradent très peu dans le temps. Sa teinte pêche offre une excellente visibilité des détails de l'objet imprimé, contrairement à un matériau noir ou translucide.
- VisiJet Black est un matériau noir profond qui permet de produire des pièces fonctionnelles. Sa qualité de texture et sa très haute définition en font un composant aux atouts visuels incontestables.

L'ALUMIDE



La manivelle de ce trépied de caméra a été imprimée en 3D en alumide. (Source : i.materialise)

requiert ensuite un travail de finition, qui peut être de nature variée (meulage, polissage, revêtement). Il est aussi possible de travailler la pièce par fraisage ou découpage, ou encore de la souder à une autre.

L'alumide est une poudre de polyamide mélangée à de l'aluminium, qui offre une très grande solidité tout en demeurant flexible. Proche du métal par l'aspect, elle possède une meilleure résistance à la chaleur que la plupart des autres plastiques, puisqu'elle peut supporter une température maximale de 172 °C.

Utilisée dans la production de pièces d'apparence métallique, l'alumide est aussi employée par l'industrie automobile pour des éléments ne nécessitant pas de contraintes particulières de sécurité. Ce matériau entre également dans la fabrication de moules pour des petites séries. On le trouve en outre sur des modèles de présentation, pour des démonstrations dans le monde éducatif ou la recherche, notamment.

L'impression d'alumide s'opère généralement par frittage laser, la taille moyenne des particules d'alumide étant de 60 µm. En règle générale, ce matériau

Les métaux constituent la deuxième grande famille de matériaux actuellement utilisés en impression 3D. Aluminium, titane, acier inoxydable, cobalt, fer, mais aussi bronze, or et argent sont compatibles. Les recherches avancent à grands pas dans ce domaine et il est désormais possible de produire des pièces aux propriétés physiques plus intéressantes que celles réalisées avec la fabrication soustractive traditionnelle. Des chercheurs ont par exemple développé une technique qui permet de modifier jusqu'à la structure atomique même du métal utilisé, créant ainsi un métal se solidifiant plus rapidement et plus uniformément lors de son passage à l'impression !

L'ALUMINIUM ET SES ALLIAGES

L'aluminium utilisé en impression 3D par le constructeur EOS, AlSi10Mg, est un alliage classique qui autorise des moulages fins et des géométries complexes. Il contient du silicium et du magnésium, ce qui le rend extrêmement solide et capable de supporter de fortes charges. Très léger et résistant bien à la chaleur, ce matériau est notamment employé sur les moteurs de course et dans l'aéronautique.

LE COBALT-CHROME ET SES ALLIAGES

Les alliages à base de cobalt, et en particulier le cobalt-chrome, sont utilisés depuis longtemps par les procédés de moulage à cire perdue. Désormais, ils peuvent être employés en fabrication additive, notamment grâce à la technique EBM. Alors que la majorité des moulages sont effectués à l'air libre, cette technique présente l'intérêt de créer des pièces sous vide, ce qui offre un meilleur contrôle de l'environnement de production et permet de réaliser des objets de meilleure qualité.

Le CoCrMo est l'alliage de cobalt-chrome le plus utilisé dans la réalisation de prothèses médicales, telles que des implants de genoux, des jointures de hanches ou encore des couronnes dentaires. Extrêmement rigide, il possède un état de surface très lisse tout en étant très résistant à l'usure.

Le constructeur suédois d'impression 3D Arcam propose ainsi l'ASTM F75, un alliage de cobalt-chrome non aimanté, très solide et résistant à la corrosion et à l'usure. Ces propriétés le rendent bien adapté à la fabrication de tiges fémorales (remplacement de hanche).

Cet alliage est également employé pour réaliser de l'outillage et des moules servant à la production de pièces en plastique. Il peut être poli jusqu'à obtenir un effet miroir, assurant une longue vie à l'outil. La taille des particules de ASTM F75 est comprise entre 45 et 100 µm.

Le fabricant EOS commercialise des alliages combinant cobalt, chrome et molybdène, appelés CobaltChrome MP1 et SP2. Ils se démarquent par leurs excellentes propriétés mécaniques (solidité, dureté), ainsi que par une bonne résistance à la corrosion et à la chaleur (jusqu'à 600 °C). Ces alliages sont couramment utilisés pour des applications biomédicales (implants dentaires) et pour l'ingénierie à haute température (turbines, aéronautique). Le matériau SP2, plus spécifiquement employé dans l'industrie dentaire, est certifié biocompatible et respecte les normes CE.

L'ACIER INOXYDABLE

L'acier a été le premier métal disponible commercialement pour la fabrication additive. Certains acteurs de l'impression 3D, comme ProMetal, ExOne et bien d'autres, se sont spécialisés dans le type inoxydable de ce matériau, plus communément appelé inox. Le constructeur EOS propose ainsi deux types d'acières inoxydables, GP1 et PH1, qui présentent de bonnes propriétés mécaniques, notamment une forte malléabilité lors du passage du laser.

L'ACIER D'OUTILLAGE MARAGING

Résistant à la rupture, ce type d'acier est surtout utilisé pour fabriquer de l'outillage rapide et des moules. Le Maraging Steel MS1 d'EOS est un acier martensitique, dont les pièces sont facilement usinables après impression et peuvent être renforcées à plus de 50 HRC (sur l'échelle C de dureté Rockwell). Elles supportent également très bien le polissage.

L'échelle C de dureté Rockwell

Les échelles de dureté Rockwell permettent de mesurer la dureté de métaux à l'aide d'un pénétrateur. Adaptée à l'acier, le titane et la fonte, l'échelle C utilise un cône de diamant de section circulaire à pointe arrondie sphérique de 0,2 mm. Sur cette échelle, une unité (symbole HRC) correspond à une pénétration de 0,002 mm.

LE TITANE ET SES ALLIAGES

Le titane et ses alliages se caractérisent par leur excellente solidité, un faible poids et une résistance à la corrosion hors du commun. C'est pour ces raisons que l'on retrouve ce métal dans beaucoup de domaines d'exigence comme la chirurgie, la médecine, l'aéronautique, l'automobile, l'industrie chimique, l'alimentation électrique, l'extraction de pétrole ou de gaz...

Cependant, les techniques traditionnelles de fabrication en titane s'avèrent complexes et coûteuses. Ce métal est en effet difficile à travailler car il durcit rapidement, ce qui nécessite des outils de haut niveau. Par ailleurs, il est souvent contaminé par des impuretés durant la phase de soudure, qui risquent de le fragiliser. C'est pourquoi l'impression 3D apparaît aujourd'hui comme la meilleure technologie existante pour réaliser des pièces en titane, car elle permet de travailler le métal sans contraintes et d'éviter la phase risquée de soudure.

Il faut savoir qu'à l'instar de la majorité des alliages, ceux à base de titane sont plus solides que le matériau pur. L'alliage Ti6Al4V est le plus courant, notamment dans l'aéronautique, l'industrie automobile et la marine. Il possède de très bonnes qualités générales, tant au niveau de ses propriétés mécaniques que de son comportement durant la phase de fabrication. En particulier, il permet de réduire considérablement le poids des installations. Cet alliage biocompatible est aussi très utilisé dans l'industrie médicale, car il offre une excellente adhérence aux tissus et aux os lorsqu'ils sont en contact direct. Tout comme EOS, le fabricant Arcam propose l'alliage Ti6Al4V (Grade 5) en poudre de particules comprises entre 45 et 100 µm, ainsi que le Ti6Al4V ELI et le titane Grade 2.

Un métal très coûteux

L'inconvénient majeur du titane est son coût très élevé, presque 50 fois supérieur à celui de l'acier. La recherche se penche donc sur de nouveaux procédés moins onéreux permettant de produire des poudres de titane.

LES MÉTAUX PRÉCIEUX

L'argent, l'or, le bronze et le platine sont des métaux qui peuvent être utilisés en fabrication additive. On les coule dans un moule préalablement imprimé à cire perdue, une technique très courante dans le domaine de la bijouterie de luxe.



De gauche à droite : bague en argent poli, très poli, sablage et satinage. (Source : i.materialise)

L'argent est un métal très malléable qui conduit très bien l'électricité et la chaleur. Lorsqu'il est poli, l'objet obtenu peut être particulièrement brillant. La finition s'effectue généralement à la main, d'autant plus que les objets imprimés en argent sont souvent de petite ou très petite taille. Sans finition, ils peuvent présenter un aspect assez rugueux et inégal (les lignes d'impression seront souvent visibles, par exemple).

Il convient d'éviter des creux trop profonds ou des repoussés trop grands. En effet, les gravures trop profondes sont généralement problématiques au moment de la création du moule. Quant aux repoussés, ils peuvent provoquer des cassures lors de la production de l'objet en argent. Il est donc recommandé d'éviter les formes trop fines et de respecter une épaisseur minimale de 0,8 mm pour les « murs » (les parois de l'objet). S'il s'agit d'une bague,

l'épaisseur de l'anneau doit être d'au moins 1 mm, sinon il risquerait de se déformer rapidement, l'argent étant un matériau relativement souple.

L'impression d'objets en or répond au même procédé que l'argent. L'or fondu est coulé dans un moule imprimé en cire, puis poli manuellement. Il peut prendre différentes nuances : jaune vif, légèrement rose ou blanc.

Céramiques, sables et bétons

À l'heure actuelle, très peu de machines sont capables d'imprimer en céramique. Le procédé est assez complexe, ce qui suppose d'être familiarisé avec un certain nombre de règles de design (voir tableau page 99).

Son impression se déroule généralement en deux temps : le matériau composite est d'abord imprimé par frittage laser ou 3DP, puis l'objet subit un traitement suivi d'un émaillage à chaud à plus de 1 000 °C, comme lors d'un émaillage traditionnel. Différentes couleurs peuvent être alors appliquées lors de cette seconde phase du processus.

Certains matériaux de moulage couramment utilisés en fonderie, comme les sables, sont également compatibles avec l'impression 3D. Ainsi, le Ceramics 5.2, un sable de silicate et d'aluminium proposé par EOS, peut être employé pour la fabrication de moules destinés à toutes sortes d'applications. Résistant très bien à la chaleur, il convient donc parfaitement pour des moulages nécessitant des températures élevées. Les matériaux Quartz 4.2 et Quartz 5.7, aussi édités par EOS, sont des sables de quartz enduits de résine phénolique, utilisés pour réaliser des moules aux formes complexes.

Où est née l'impression en sable ?

Les premières impressions en sable ont eu lieu en 1999 en Allemagne, au sein de la start-up Generis. Cette entreprise s'est ensuite scindée en deux entités en 2003 : ProMetal pour l'impression en sable et Voxeljet pour le moulage à cire perdue.



Structures imprimées avec Stone Spray à l'aide de sable de plage.

(Source : Petr Novikov, Inder Shergill et Anna Kulik – Institute for Advanced Architecture of Catalonia)

Du côté des machines, il y a aussi des avancées dans ce domaine. Une équipe de jeunes architectes espagnols de l'IAAC (*Institute for Advanced Architecture of Catalonia*) a ainsi mis au point un robot à énergie solaire, baptisé Stone Spray, qui est capable d'imprimer en 3D des structures en sable. Conçu pour fonctionner en extérieur, ce robot mixe le sable avec un liant, puis le vaporise couche après couche.

Parallèlement, les recherches se multiplient dans le domaine de l'impression de matériaux sur de grandes surfaces. Alors que jusqu'à présent, l'impression 3D en architecture était cantonnée à la production de maquettes et de modèles réduits, il est désormais envisageable d'imprimer en 3D des maisons.

C'est ce que propose la société Contour Crafting, qui annonce pouvoir imprimer en 3D des habitations d'une superficie de 200 m² en une vingtaine d'heures, avec ajout ultérieur des portes et fenêtres. Cette solution pourrait être envisagée dans les cas d'urgence (catastrophes naturelles, zones dévastées), permettant ainsi de construire des maisons très rapidement et à moindre coût.

Les matériaux utilisés dans ce contexte sont des simili-bétons. Le MIT Media Lab a notamment mis au point un dispositif d'impression 3D de moules de grande taille en polyuréthane. Ce polymère, très fréquent dans la fabrication de structures en mousse, présente de nombreux atouts : très bonne isolation thermique, temps de durcissement réduit, stabilité dans le temps. Le béton est ensuite coulé dans ces moules en polyuréthane, qui mesurent entre 1,5 et 1,8 m de long.

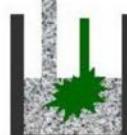
L'impression 3D part sur la Lune

L'Agence spatiale européenne a même décidé d'intégrer l'impression 3D dans ses recherches, en faisant intervenir la D-Shape, l'imprimante 3D à béton mise au point par l'Italien Enrico Dini (voir page 153). Son objectif est de concevoir une machine capable d'utiliser la matière lunaire pour construire une station spatiale sur place, dont le dôme en nid-d'abeilles permettrait de protéger l'équipe des chutes de météorites. Cette imprimante 3D récupérerait le sable lunaire pour le déposer couche après couche, en le liant avec une solution saline. La structure finale s'apparenterait fortement à un simili-béton.

Les matériaux organiques

LES CIRES

Les cires sont utilisées en impression 3D pour réaliser des moules servant ensuite à la fabrication de pièces en métal, de bijoux ou encore d'appareils dentaires. Cette technique permet d'obtenir des pièces plus précises qu'avec des méthodes traditionnelles.

			
<p>Partir d'un modèle en cire ou en plastique.</p>	<p>Monter le modèle sur un entonnoir de coulée, appelé aussi godet.</p>	<p>Positionner le modèle et l'entonnoir dans un moule carapace réalisé en versant un enduit réfractaire autour du modèle.</p>	<p>L'enduit réfractaire (plâtre résistant à la chaleur) durcit en formant un moule.</p>

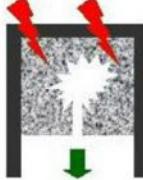
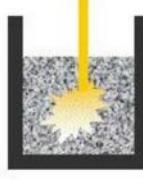
			
<p>La chaleur du four fait fondre la cire ou le plastique hors du moule, puis évaporer les résidus.</p>	<p>Le métal (argent, or, bronze, platine) est versé dans le moule par l'entonnoir.</p>	<p>Une fois le métal refroidi, le moule est brisé.</p>	<p>La tige de métal laissée par l'entonnoir est coupée. La pièce est terminée.</p>

Schéma explicatif de la méthode traditionnelle de fabrication à partir d'un modèle par cire perdue. (Source : Bathsheba Grossman)

VisiJet Prowax, VisiJet Hi-Cast et VisiJet Dentcast Dental Wax-up sont les trois types de cires disponibles pour les imprimantes ProJet 3500 et Projet 5000 de 3D Systems. Conditionnées en bouteilles de 1,75 kg, elles sont composées de cire à 100 %. De couleur bleutée, la Prowax permet de fabriquer des moulages pour la fonderie, tandis que la Hi-Cast est employée pour réaliser des impressions de très petits moules de haute définition. Quant à la Dentcast, elle sert à concevoir des moules dentaires.

Les cires utilisées dans la technique d'impression à cire perdue peuvent être chauffées à 60 ou 90 °C. Ce procédé est très efficace, mais il est à utiliser spécifiquement pour une fabrication à l'unité. À noter que les imprimantes de 3D Systems sont capables d'imprimer simultanément de la cire et de la résine, ce qui permet d'éviter l'effet voxel.

L'effet voxel

Observé dans les procédés d'impression par jets de matériau, l'effet voxel correspond à une déformation de la goutte de matière qui tombe, formant un parapluie sur la couche précédente. Cet effet peut être atténué en modifiant la composition chimique du matériau et en améliorant la précision de l'imprimante.

LE BOIS

Le bois fait désormais partie des matériaux utilisables en impression 3D personnelle. Ainsi, le filament Laywoo-D3, composé à 40 % de bois recyclé, s'emploie sur les imprimantes à dépôt de filament fondu, en se présentant sous forme de bobines comme le PLA ou l'ABS. Il s'imprime à une température comprise entre 185 et 230 °C selon le résultat souhaité : plus le filament chauffe, plus il noircit. La personne derrière ce matériau composite est Kai Parthy, un inventeur allemand passionné de matériaux d'impression 3D, qui est aussi à l'origine du plastique flexible BendLay (voir page 73).



Impression 3D d'une coque de téléphone en bois à partir du matériau Laywoo-D3.
(Source : Tony Buser (licence CC BY-SA 2.0))

LE PAPIER

Le papier est de plus en plus courant en impression 3D, et tout particulièrement via le procédé de fabrication par laminage par dépôt sélectif, utilisé notamment par l'entreprise Mcor. Le papier employé est le même que celui présent dans les imprimantes à encre classiques, sous forme de rames au format A4 ou lettre.

LES MATIÈRES ALIMENTAIRES

Les imprimantes à dépôt de filament fondu peuvent facilement s'adapter à des matériaux alimentaires : il suffit de remplacer l'extrudeur par une seringue, remplie d'un aliment réduit en pâte. Il devient alors possible de créer des formes à partir de matières diverses comme du chocolat, du fromage, de l'houmous, du glaçage pour gâteaux et même des coquilles Saint-Jacques !



Impression 3D de chocolat, réalisée avec l'imprimante Choc Creator V1.
(Source : ChocEdge Ltd)

Il est important de préciser que dans le cas d'impression de nourriture, la machine ne crée pas de matière, mais lui donne juste une forme voulue. Pour le Dr Jeffrey Lipton du laboratoire Fab@Home, l'un des pionniers dans ce domaine, cette branche de l'impression 3D est encore balbutiante, réservée pour l'instant à des fins éducatives ou à la création de décors comestibles complexes. Encore lente et relativement peu précise, elle pose en outre des problèmes d'hygiène alimentaire. Aussi n'est-il pas très recommandé pour le moment de consommer des aliments imprimés...

Les premières imprimantes 3D personnelles à nourriture ont été la Fab@Home et la Choc Creator, toutes deux nées de projets de recherche universitaire (voir page 166). Puis, en janvier 2014, 3D Systems a lancé la série ChefJet, qui utilise un sucre parfumé comme matière première (voir page 59).

LES TISSUS BIOLOGIQUES

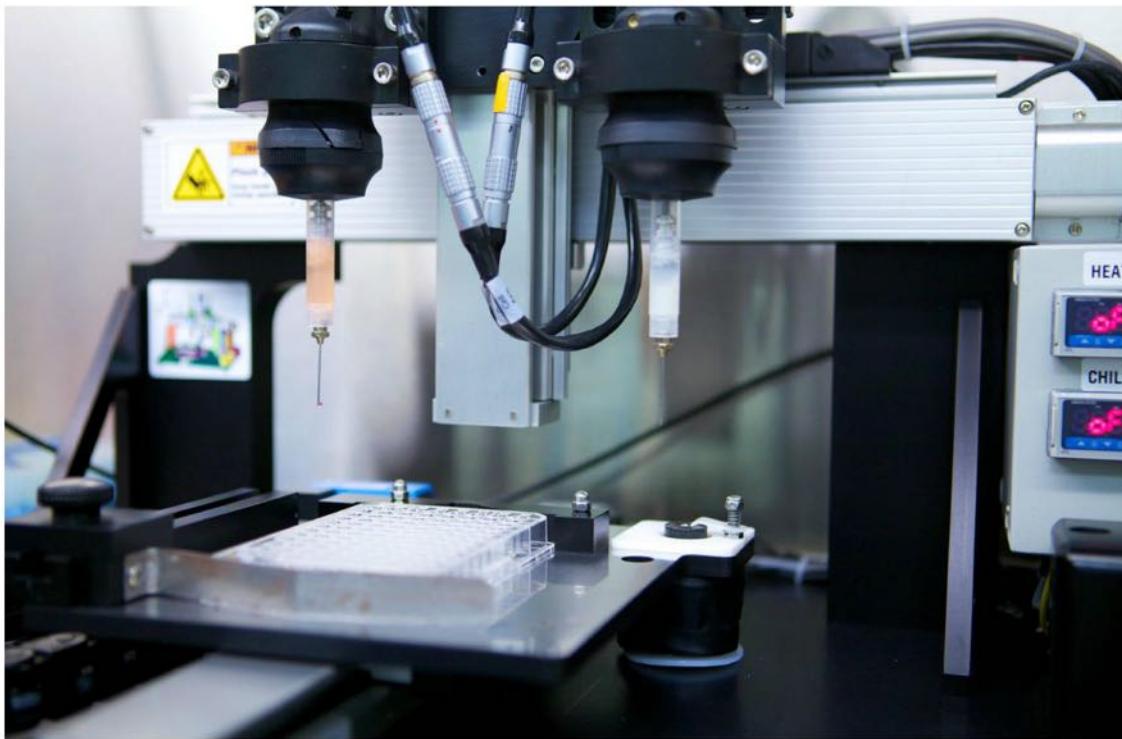
L'impression 3D de matière organique ne se résume pas à la création de formes à partir d'aliments. Certains acteurs de ce domaine ont en effet conçu des machines capables d'imprimer des cellules vivantes pour reproduire des tissus humains. Dans ce secteur de pointe, l'entreprise Organovo est l'une des pionnières. Elle a mis au point le modèle NovoGen MMX BioPrinter, une imprimante destinée à la recherche pharmaceutique, où les cellules vivantes sont la matière première.

Ici, le tissu humain est fabriqué par impression d'un matériau à base de gel, qui crée une structure dans laquelle sont injectées les cellules, qui peuvent alors se développer. Cette technologie permet de concevoir des tissus organiques d'une grande stabilité cellulaire, qui s'avèrent plus performants que ceux d'origine animale utilisés habituellement. Toutefois, elle pose quelques difficultés, car les tissus doivent être continuellement alimentés en sang pour rester vivants, ce que ne permet pas par défaut l'imprimante.



Impression de tissu humain : la buse de l'imprimante dépose d'abord une couche d'hydrogel inerte (en mauve), servant de support de maintien, puis y ajoute plusieurs billes d'encre biologique (en orange). Ce processus est répété, tandis que les billes fusionnent spontanément entre elles. (Source : Organovo)

L'impression 3D de cellules vivantes constitue aussi un champ d'exploration pour les particuliers. De la même manière qu'on dépose un filament fondu selon la technique FDM, il est ainsi possible de fabriquer, avec quelques centaines d'euros, une imprimante qui dépose des cellules afin de créer des formes organiques. Un tutoriel de Patrick D'Haeseleer est à disposition à l'adresse www.instructables.com/id/DIY-BioPrinter.



L'imprimante NovoGen MMX BioPrinter d'Organovo. (Source : Organovo)

LES MATIÈRES CONDUCTRICES

L'impression 3D de circuits électroniques est l'un des grands terrains d'exploration, à la fois dans le monde industriel et en fabrication personnelle. La recherche avance pour mettre au point des matériaux de nouvelle génération, pouvant intégrer de l'électronique, réagir à leur environnement et adapter leur structure aux contraintes extérieures. Ainsi, les chercheurs du PARC (*Palo Alto Research Center*), situé aux États-Unis, travaillent sur le développement de matériaux d'impression 3D incorporant de l'électronique et des capteurs.

À Harvard, une équipe menée par la professeure Jennifer Lewis a réussi à imprimer des microbatteries lithium-ion de la taille d'un grain de sable (moins d'1 mm³), soit de dimensions mille fois moindres que les plus petites batteries existant actuellement sur le marché. Pour créer les deux électrodes (anode et cathode) de ces accumulateurs, une imprimante 3D a été spécialement conçue, capable de déposer différentes couches de nanoparticules aux propriétés électrochimiques spécifiques.

Dans un avenir proche, ces prototypes de batteries pourraient être employés dans le secteur biomédical, sur des microdrones ou encore au sein de réseaux de capteurs distribués, comme les poussières intelligentes.

Les poussières intelligentes

On appelle poussières intelligentes, ou *Smart Dust* en anglais, des réseaux sans fil de minuscules systèmes (ordinateurs, capteurs, robots...), permettant par exemple de surveiller la température ou les mouvements, et d'envoyer des données par ondes radio.

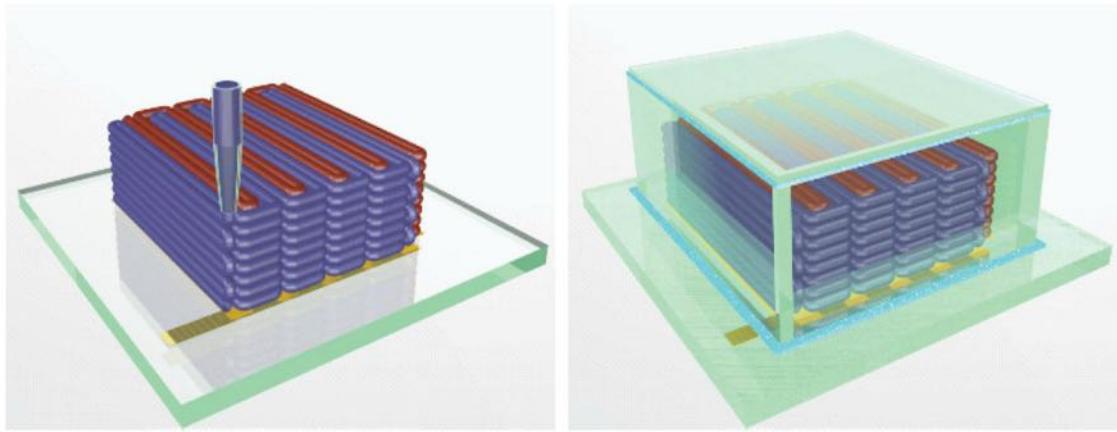


Schéma d'une microbatterie lithium-ion imprimée en 3D par superposition de couches formant l'anode (en rouge) et la cathode (en bleu). (Source : Jennifer Lewis/Harvard School of Engineering and Applied Sciences)

Vers des matériaux d'impression 4D ?

Même si le choix des matériaux d'impression est vaste et s'élargit continuellement, un certain nombre de contraintes demeurent. En particulier, il est encore difficile d'imprimer plusieurs matériaux simultanément. L'entreprise Objet, l'un des précurseurs dans ce domaine, distribue cependant des imprimantes capables d'imprimer plusieurs matériaux aux propriétés différentes (différents types de plastiques) au sein d'un même objet.

Neri Oxman, designer et chercheuse au MIT Media Lab, parle même de matériaux d'impression 4D (*4D printing materials*). Lors d'une conférence donnée au Centre George-Pompidou en 2012, elle a expliqué que ces matériaux auront, par exemple, une intelligence similaire à celle de la peau humaine. Ils seront plus solides aux points de contact, plus fins et sensibles sur d'autres zones, pourront réagir à la chaleur ou à la proximité, ou encore se reconstruire...

PARTIE 2

L'IMPRESSION 3D EN PRATIQUE

Comment se déroule concrètement l'impression d'un objet ?

De quels éléments a-t-on besoin ? Pour celui qui souhaite se lancer dans l'aventure, cette deuxième partie fourmille de conseils pratiques : astuces de modélisation, choix du matériau, paramétrage de l'imprimante...

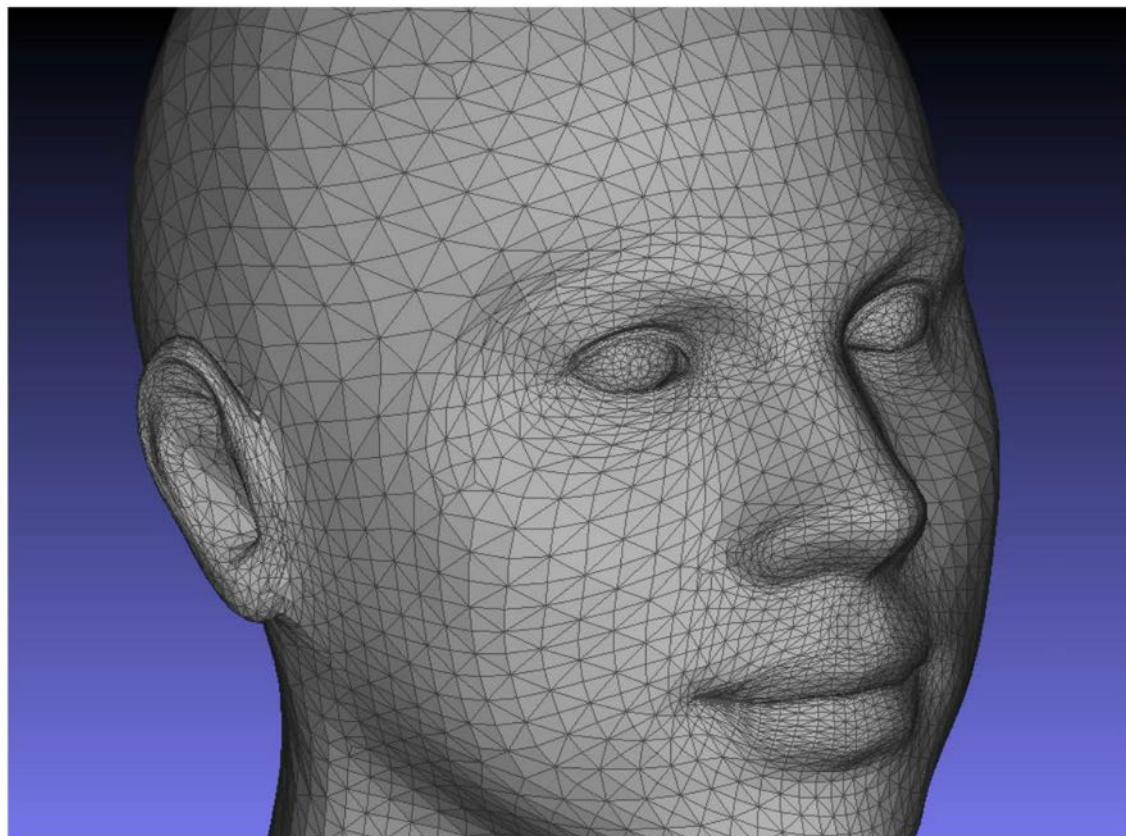
CHAPITRE 5

LA PHASE DE MODÉLISATION ET DE PRÉPARATION

Pour convertir une idée en un fichier prêt à être imprimé en 3D, plusieurs étapes sont nécessaires :

- création ou récupération d'un modèle 3D ;
- exportation au format STL ;
- réparation et préparation du fichier ;
- tranchage du fichier STL et exportation vers l'imprimante.

Pour cela, il existe un large éventail de logiciels plus ou moins complexes, adaptés aux différents profils d'utilisateurs et aux divers procédés d'impression.



Exemple d'un modèle 3D. (Source : Le FabShop)

Création ou récupération d'un modèle 3D

Sauf exception, il est impossible de lancer l'impression d'un objet sans son fichier 3D. Modèle virtuel de la pièce à imprimer, ce fichier est constitué d'un ensemble de sommets, d'arêtes et de faces, appelées triangles ou polygones : plus les triangles sont grands, moins il y a de détails et plus les formes sont simples. Il peut être créé à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D, généré à partir d'un scanner 3D, ou encore récupéré sur un site web de partage de fichiers 3D.

LA MODÉLISATION 3D

Il existe un large choix de logiciels de modélisation 3D, qui possèdent chacun leurs spécificités, selon le domaine auquel ils s'adressent : mécanique, ingénierie, architecture, décoration, design, animation, jeux vidéo... Parmi les plus connus, on peut citer 3ds Max, AutoCAD 3D, Blender, CATIA, Cinema 4D, Maya, Revit, Rhinoceros, SolidWorks, Solid Edge, SketchUp ou encore ZBrush, ce qui sous-entend autant de formats différents.

Modeleurs volumiques et surfaciques

On distingue principalement deux grandes familles de modeleurs 3D, les modeleurs volumiques et les modeleurs surfaciques, tous deux très utilisés en impression 3D. Les premiers définissent les objets en utilisant des formes primaires (cube, sphère, cylindre...) appelées solides. Généralement employés pour la modélisation 3D de pièces mécaniques, ils permettent des opérations d'addition et de soustraction de matière virtuelle. Les modeleurs volumiques les plus connus sont SolidWorks et Solid Edge.



Dentelle, un modèle d'abat-jour conçu dans SolidWorks par le designer Samuel Bernier et imprimable en 3D. (Source : Samuel Bernier)

Avec les modeleurs surfaciques, c'est l'enveloppe de l'objet qui est définie mathématiquement. On les emploie notamment pour les formes organiques, la sculpture digitale, le design... ZBrush, Rhinoceros et SketchUp sont parmi les modeleurs surfaciques les plus populaires.

Mais les différences entre ces deux types de modeleurs tendent à s'amenuiser au fil des versions. SketchUp a ainsi intégré la notion de solide dans sa version 8 et SolidWorks autorise désormais les transformations de surfaces.

Modeleurs paramétriques

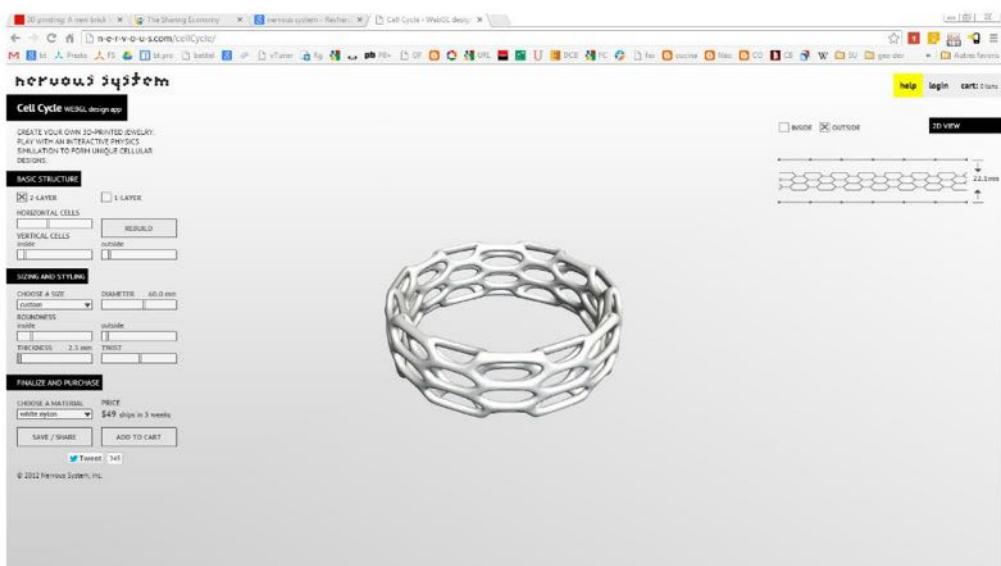
Il existe une troisième catégorie de modeleurs, les modeleurs paramétriques, qui permettent de créer des modèles 3D non pas en dessinant mais en programmant. S'adressant avant tout aux développeurs, ils définissent les objets à partir d'équations dont les paramètres sont facilement modifiables.

OpenSCAD est l'un des modeleurs paramétriques les plus célèbres. Compatible avec Linux, Mac et PC, il est adapté aux pièces mécaniques, mais pas aux formes organiques. Avec ce logiciel open source, il est par exemple possible de créer le modèle 3D d'un ressort, en lui attribuant un certain nombre de paramètres (largeur de chaque anneau, longueur totale, etc.). Pour modifier ce modèle 3D en quelques secondes, il suffit alors de changer ces paramètres dans le code.

La fonctionnalité Python du logiciel de CAO Rhinoceros permet aussi de coder directement une forme à partir de données mathématiques. L'avantage de ces modeleurs paramétriques est de pouvoir concevoir des formes complexes ou répétitives d'une parfaite précision, ce qui s'avère très utile pour des pièces d'ingénierie notamment.

Un modeleur paramétrique en ligne

Nervous System est un studio de création de bijoux imprimés en 3D, qui a développé son propre logiciel de modélisation paramétrique. Ses modèles organiques sont entièrement paramétrables en ligne, grâce à des algorithmes dont l'utilisateur peut modifier les variables afin de créer une pièce unique.



Capture d'écran du site de Nervous System. [Source : Nervous System (www.n-e-r-v-o-u-s.com)]

Quel modeleur utiliser ?

On choisira un logiciel de modélisation 3D en fonction du type de pièce à concevoir : sculpture digitale de formes organiques ou de personnages, conception mécanique ou architecturale, design d'objets usuels, etc.

Comparatif des principaux modeleurs 3D.

MODELEUR 3D	CONCEPTION MÉCANIQUE (ARCHITECTURE, PIÈCES TECHNIQUES)	SCULPTURE DIGITALE (FORMES ORGANIQUES, PERSONNAGES)	DIFFICULTÉ D'APPRENTISSAGE	PRIX
3ds Max	Non	Oui	Difficile	> 1000 €
AutoCAD 3D	Oui	Non	Difficile	> 1000 €
Blender	Non	Oui	Difficile	Gratuit
CATIA	Oui	Non	Difficile	> 1000 €
Maya	Non	Oui	Difficile	> 1000 €
Rhinoceros	Non	Oui	Difficile	< 1000 €
Solid Edge	Oui	Non	Difficile	> 1000 €
SolidWorks	Oui	Non	Difficile	> 1000 €
SketchUp Pro	Oui	Non	Assez facile	< 500 €
ZBrush	Non	Oui	Difficile	< 1000 €

L'ACQUISITION PAR SCAN 3D

Pour obtenir le fichier 3D d'un objet, une autre méthode consiste à le scanner à l'aide d'un scanner 3D classique, une Kinect ou un périphérique similaire, ou encore à récupérer son scan par l'intermédiaire d'une solution de photogrammétrie. Dans tous les cas, ce scan sera rarement utilisable tel quel pour une impression 3D, nécessitant un travail laborieux de correction (élimination du bruit et des données parasites, triangulation du nuage de points, orientation des normales, fermeture des faces et réparation de la surface).

Principe d'un scanner 3D

Un scanner 3D est un appareil capable d'analyser un objet et son environnement pour collecter des données précises sur sa forme et éventuellement son apparence (couleur, texture...). Ces informations permettent d'obtenir un modèle 3D de cet objet, que l'on pourra utiliser pour une impression 3D ultérieure.

La plupart des scanners reposent sur des techniques optiques complexes d'acquisition et d'analyse de données spatiales tridimensionnelles. En règle générale, ils mesurent le positionnement d'un échantillon de points de la surface du sujet, puis extrapolent sa forme à partir de la répartition de ce nuage de points. Cette opération d'acquisition, appelée station, est répétée plusieurs fois selon différents points de vue (ou bien l'objet pivote devant le scanner sur une table rotative), afin d'éliminer les zones d'ombre et les angles morts. En effet, comme une caméra ou un appareil photo, le scanner 3D capte tout ce qui entre dans son champ de vision, mais ne perçoit pas ce qui est masqué. Il faut enfin procéder à une opération de recollement des stations pour reconstituer l'ensemble de la scène.

Limites des scanners optiques

Tous les objets ne peuvent être scannés par un scanner 3D optique : ceux qui sont trop brillants ou transparents conduisent à des résultats erronés, le système étant perturbé par les phénomènes physiques de réflexion et de diffraction.



Nuage de points résultant du scan de statues appartenant au décor du spectacle *1789 Les Amants de la Bastille*.
(Source : Le FabShop – Trimble – 1789 Les Amants de la Bastille – NTCA Production 2012)

Les différents types de scanners 3D

Il existe de nombreux types de scanners 3D : certains exigent un contact physique avec l'objet et d'autres non, certains sont sur pied, d'autres manuels... Autant de modèles divers et variés correspondant à différents domaines d'application : topographie, conservation du patrimoine, industrie, santé, divertissement, etc. Selon le type employé, il est donc possible de scanner des objets très petits ou des scènes entières.

Parmi tous ces modèles, on peut distinguer :

- les scanners à lumière modulée ou structurée, où une image (souvent des rayures noires et blanches) est projetée sur le sujet, tandis qu'une caméra analyse la déformation de cette projection. Creaform est le leader des scanners 3D manuels à lumière modulée, avec ses modèles Go!SCAN 3D et Handyscan 3D ;

- les scanners laser, où la mesure de chaque point s'effectue à partir du calcul du temps de voyage aller-retour d'un faisceau laser entre l'émetteur et sa cible. Le scanner 3D TX5 de Trimble utilise ainsi un laser projeté sur un miroir rotatif. L'avantage de cette solution est la rapidité d'acquisition des données ;
- les scanners stéréoscopiques, équipés de deux caméras légèrement espacées pointant sur l'objet. Inspiré par la vision humaine, ce système permet de calculer la distance de chaque point du sujet, en comparant les deux images des caméras : c'est le principe même de la photogrammétrie. Depuis juin 2012, Google utilise cette technique dans Google Earth pour générer la topographie et les villes en 3D.



Scanner laser rotatif Faro.
(Source : Le FabShop – Aloest Productions)



Scan 3D réalisé à l'aide d'une Kinect et du logiciel ReconstructMe. (Source : Le FabShop)

La Kinect et ses dérivés

À côté de ces solutions très onéreuses en matériel comme en logiciels, il existe d'autres méthodes plus grand public pour scanner un objet, comme celles exploitant les capacités de la Kinect, l'interface de la console Xbox de Microsoft, ou d'un de ses clones, telle la Xtion d'ASUS. Détournés de leur usage premier, ces périphériques peuvent en effet capturer des modèles 3D à l'aide de logiciels comme ReconstructMe, Skanect, Artec Studio ou encore SCENEJECT. Dans ce cas, ce sont les caméras stéréo et la caméra de profondeur infrarouge qui permettent l'acquisition et l'analyse de données 3D.



La Kinect de Microsoft. (Source : Microsoft)

Les solutions de photogrammétrie

Enfin, il existe également des solutions gratuites de scan 3D, comme l'application 123D Catch d'Autodesk et le service en ligne My3DScanner, qui permettent de générer des modèles 3D à partir de photos. Il faut alors multiplier les prises de vue du sujet, puis le traitement des données s'effectue dans le cloud.

Les scanners 3D pour les particuliers

Plutôt que de modéliser un objet que l'on souhaite reproduire (ce qui suppose de savoir utiliser un modelleur), il est beaucoup plus simple de le scanner. C'est pourquoi les acteurs de l'impression 3D personnelle sont de plus en plus nombreux à proposer des scanners à la prise en main facile et au coût abordable.

Ainsi, la société MakerBot a lancé en octobre 2013 le Digitizer, un petit scanner 3D de bureau à un peu moins de 700 €. Placé au centre de l'appareil sur un petit plateau tournant, l'objet à scanner subit le balayage d'un laser qui capture en moyenne 200 000 triangles par modèle. Le logiciel associé au Digitizer effectue ensuite un nettoyage complet du modèle : les trous sont comblés, le modèle lissé. Ce scanner offre une fidélité dimensionnelle de 2 mm mais ne permet pas de scanner les objets aux couleurs très sombres.

Parallèlement, l'entreprise 3D Systems commercialise depuis janvier 2014 le Sense, un scanner qui avoisine les 300 €. Destiné aux utilisateurs des imprimantes 3D Cube, il tient dans la main.

Ces exemples de scanners 3D grand public soulignent une évolution du marché très similaire à celle des imprimantes 3D : d'abord chers et réservés à des usages professionnels, ils sont maintenant perçus comme des machines utilisables à la maison, de la même façon qu'un appareil photo numérique ou une caméra. Certes, les caractéristiques techniques de ces scanners ne rivalisent pas encore avec leurs versions professionnelles, mais ils constituent de bons produits d'entrée de gamme pour l'utilisateur amateur.

Par ailleurs, la généralisation des smartphones et autres tablettes entraîne un vent de nouveautés du côté des scanners 3D intégrés. Citons notamment la start-up Occipital, déjà remarquée pour son application mobile de lecture de codes-barres RedLaser, qui prépare le lancement du Structure Sensor, un accessoire pour tablettes permettant de scanner les objets autour de soi et de les visualiser directement sur son écran. Coûtant environ 280 €, cet appareil est livré avec un SDK (*Software Development Kit*) qui contient tous les outils nécessaires aux développeurs (utilitaires, fichiers d'aide, exemples...) pour créer des applications mobiles connectées au Structure Sensor.

Cette démarche est très similaire à celle adoptée par les principaux acteurs du marché des smartphones. En effet, de la même façon qu'Apple incite les développeurs à créer des applications mobiles pour son catalogue AppStore, Structure Sensor veut devenir une plate-forme pour applis utilisant le scan 3D.



Scan 3D d'une sculpture réalisé avec le Structure Sensor. [Source : Occipital]

Les Google Glass

Le marché du scan 3D cherche à faciliter la prise d'images par les utilisateurs amateurs, puisqu'il est possible de reconstituer le modèle 3D d'un objet à partir de ses photos. Dans ce contexte, les Google Glass, les lunettes à réalité augmentée de Google, pourraient être alors exploitées pour capturer rapidement des images. Le porteur de ces lunettes n'a juste qu'à tourner autour de l'objet pour prendre une série de photos, qui sont ensuite traitées par un logiciel comme MeshMixer pour aboutir à un modèle 3D imprimable. Todd Blatt, un utilisateur de ces fameuses Google Glass, partage ainsi une douzaine de modèles sur Thingiverse, réalisés à partir de ses visites récentes de musées.

L'UTILISATION D'UN FICHIER 3D EXISTANT

Pour récupérer un fichier 3D, une dernière solution consiste à le chercher sur un site web de partage de modèles d'objets (voir tableau page 144). Attention cependant, la plupart de ces fichiers sont destinés à l'animation ou l'infographie et s'avèrent donc incompatibles avec l'impression 3D. Les modèles imprimables en 3D sont gratuits ou payants, leurs conditions d'utilisation variant selon la licence accordée par leur créateur. Notez qu'ils sont de qualité très variable et peuvent demander beaucoup de travail en aval.

Le fabricant d'imprimantes 3D MakerBot possède ainsi sa propre librairie en ligne, Thingiverse, dont tous les modèles sont prêts à imprimer en 3D. Classés par catégories, ils sont commentés par leurs auteurs et les makers qui les ont fabriqués.

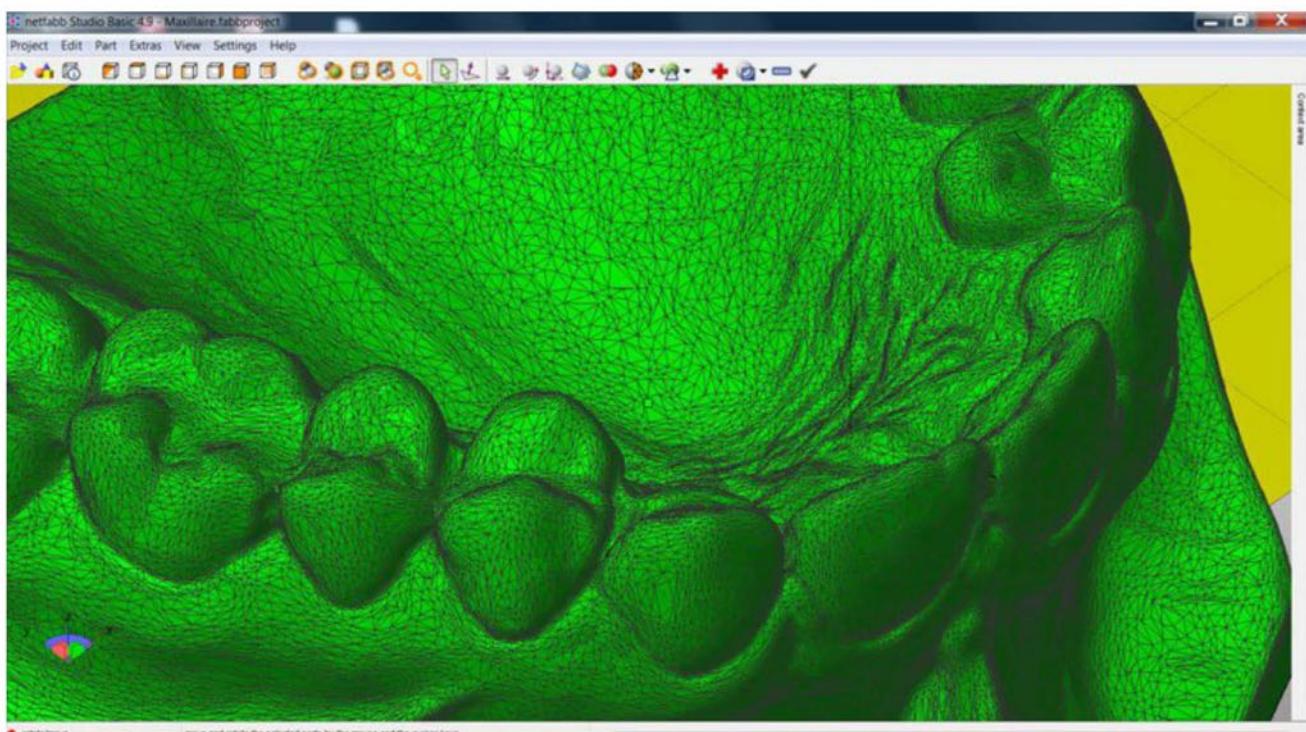
Le service d'impression 3D en ligne Sculpteo propose également à ses utilisateurs de partager leurs modèles, et même de vendre leurs créations ; les Néerlandais de Shapeways offrent le même type de service. La société Ponoko élargit l'offre en proposant non seulement des fichiers 3D, mais aussi des modèles 2D pour la découpe laser.

De même, le 3D Warehouse de SketchUp constitue une importante librairie de modèles 3D créés par les utilisateurs du logiciel. On y trouve de tout : des bâtiments, des meubles en tout genre, des pièces mécaniques, des engins, des plantes, des animaux... Mais attention, tous ne sont pas conçus pour l'impression 3D, loin de là !

Exportation au format STL

Qu'il ait été créé à l'aide d'un modeleur, d'un scanner, ou récupéré sur Internet dans une librairie de fichiers, le modèle 3D de l'objet à imprimer devra être au format d'export STL (*STereoLithography ou Standard Tessellation Language*) pour que son impression puisse être lancée. Développé en 1986 par Charles Hull, l'un des fondateurs de 3D Systems, ce format est en effet devenu le format standard de la fabrication additive, quelle que soit la technique d'impression 3D utilisée.

Un fichier STL décrit la géométrie de surface de l'objet en 3D au moyen d'une mosaïque de triangles, dont chacun doit partager deux arêtes avec des triangles adjacents (par conséquent, chaque arête est commune à deux faces). Pour chaque triangle sont connues les positions de ses trois sommets, ainsi que l'orientation de sa face, indiquée par sa normale. Par ailleurs, toutes les faces doivent être orientées vers l'extérieur. La qualité de l'impression 3D dépend en partie de la finesse du maillage de cette mosaïque.



Modèle triangulé d'un maxillaire, réalisé pour Nobel Biocare. (Source : Le FabShop)

Tous les logiciels de modélisation 3D ne permettent pas d'exporter directement au format STL, mais il suffit généralement d'ajouter une extension ou un plug-in au modeleur pour rendre cette opération possible. SketchUp a ainsi répondu à la demande du marché en intégrant un module d'import-export au format STL. Dans tous les cas, il est toujours possible de convertir le modèle 3D d'un objet dans un autre logiciel qui, lui, autorise l'export en STL, mais avec le risque d'altérer le fichier d'origine.

Si le modèle 3D de la pièce à imprimer est un scan 3D, il ne sera généralement pas au format STL, mais le scanner utilisé permet souvent d'exporter au format PLY vers un logiciel qui, lui,

pourra convertir le fichier 3D au format STL. Toutefois, le scanner 3D de la société MakerBot, le Digitizer (voir page 95), produit automatiquement des fichiers STL.

AMF, un nouveau format pour l'impression 3D ?

Une petite communauté de développeurs passionnés travaille actuellement au développement du format AMF (*Additive Manufacturing File Format*), dans le but d'en faire un nouveau standard ouvert et une alternative au format propriétaire STL. Contrairement à ce dernier, le format AMF supporte naturellement les informations de couleurs, de matériaux et d'engrenages, ce qui constitue sa grande force. En outre, la compression d'un fichier AMF est deux fois plus légère que celle d'un fichier STL équivalent. Mais l'adoption de ce nouveau format basé sur du XML, dont la première version est sortie en mai 2011, demeure encore très confidentielle.

Réparation et préparation du fichier STL

Avant d'être imprimable, un fichier STL nécessite encore quelques opérations. Il a souvent besoin d'être réparé (faces mal orientées ou manquantes, arêtes solitaires, etc.), puis il exige d'être préparé pour l'impression 3D (murs pas trop minces, faces bien lisses...). Pour ce faire, il existe différentes solutions logicielles ou en ligne, mais qui ne sont pas toujours fiables à 100 %.

CONSEILS ET ASTUCES

La réparation d'un modèle 3D porte souvent sur les mêmes types de problèmes. Voici comment en corriger les principaux.

- Le modèle n'est pas étanche : l'ensemble des faces n'est pas complet, il manque une face ou une arête. Il faut alors localiser la « fuite » et dessiner la face manquante.
- Toutes les normales des faces ne sont pas orientées correctement, si bien que le logiciel d'impression 3D ne saura pas distinguer l'intérieur de l'extérieur du modèle. Il convient alors de retourner les faces mal orientées. Pour déceler ce genre d'erreur, une astuce consiste à appliquer une couleur particulière au verso.
- Il existe des arêtes solitaires ne définissant aucun volume, que le logiciel ne saura donc pas interpréter. Ces arêtes doivent être localisées et supprimées.
- Certaines arêtes sont liées à plus de deux faces, si bien que le logiciel ne saura pas à quel volume attribuer ces surfaces. La solution consiste généralement à diviser le modèle en deux volumes et à dessiner deux fois l'arête, une par volume.

Les problèmes dus à la gravité sont également à anticiper. Ainsi, pour les modèles comportant beaucoup de porte-à-faux (comme un personnage qui court), il faudra sans doute prévoir un socle qui leur permettra de tenir en équilibre. En outre, il est recommandé de bien localiser le centre de gravité du modèle : si le haut de l'objet est très volumineux, une base solide sera nécessaire pour le supporter.

Il faut par ailleurs veiller à ce que les parois verticales (les murs) de la pièce ne soient pas trop minces. La valeur de cette épaisseur minimale dépend du matériau d'impression choisi (voir tableau ci-dessous).

Création d'une enveloppe

Pour économiser de la matière et donc de l'argent (voir aussi page 113), il peut être intéressant d'éviter la pièce à fabriquer, en créant une sorte de double paroi à l'intérieur du modèle 3D. Seule l'enveloppe de l'objet est alors imprimée, à condition de lui avoir attribué une épaisseur suffisante. S'il s'agit d'une impression par liage de poudre, il conviendra également de prévoir une ouverture permettant à la matière de s'échapper.

Pour la réalisation de pièces mécaniques comportant des engrenages ou des rouages, il est conseillé de les modéliser de manière à laisser assez d'espace à la matière pour qu'elle puisse s'échapper de ces éléments. La technique du frittage laser est la mieux adaptée dans ce contexte : il faut alors prévoir un espace suffisant entre les bords des rouages pour laisser s'écouler la poudre de polyamide.

Dans tous les cas, il ne faut donc pas hésiter à redessiner le modèle 3D en vue d'optimiser son impression.

Caractéristiques d'une pièce par matériau d'impression.

MATÉRIAU (NON POLI)	ÉPAISSEUR MINIMALE DES MURS	DÉTAIL MINIMAL (REPOUSSÉ)	DÉTAIL MINIMAL (GRAVÉ)	VOLUME MINIMAL DE LA PIÈCE	DIAMÈTRE MINIMAL DU TROU LAISSANT PASSER LA MATIÈRE EN SURPLUS	POSSIBILITÉ DE PIÈCES IMBRIQUÉES ET D'ENTRELACS
Alumide	0,8 mm	0,7 mm	0,7 mm	7,5 mm ³	4 mm	Oui
Céramique	3 mm (si le volume d'impression est de 120 à 200 mm ³)	2 mm	3 mm	120 mm ³	10 à 15 mm	Non
Multicolore (matériau composite Z Corporation)	2 mm	0,4 mm	0,4 mm	75 mm ³	25 mm	Oui
Polyamide	0,7 mm	0,2 mm (0,5 mm pour du texte lisible)	0,2 mm (0,5 mm pour du texte lisible)	7,5 mm ³	4 mm	Oui
Résine	1 mm	0,2 mm	0,2 mm	2,5 × 2,5 × 1 mm	10 mm	Oui

LES SOLUTIONS LOGICIELLES

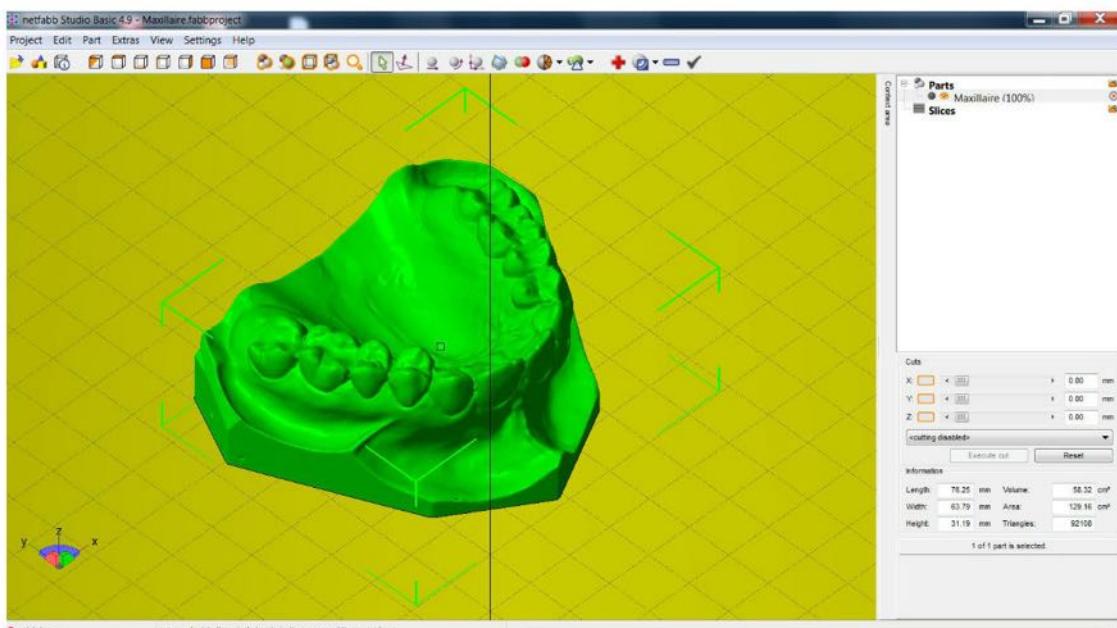
Pour réparer et préparer un fichier d'objet destiné à être imprimé en 3D, il existe différentes solutions logicielles, qu'il faut cependant utiliser avec prudence. En effet, elles réservent souvent des surprises, à l'instar des outils de correction automatique des logiciels de retouche photo qui se révèlent parfois un peu trop zélés ! Voici trois solutions qui sont parmi les plus populaires.

Magics 17

L'outil professionnel le plus puissant est sans doute Magics 17, un logiciel d'analyse et de contrôle de fichiers édité par la société belge Materialise. Cet outil accepte de nombreux formats de modèles 3D (dont le STL), texturés ou non, et quelle que soit leur source. Il répare et prépare les fichiers en automatisant les opérations les plus fréquentes, mais peut aussi leur ajouter des logos ou des numéros de série, leur appliquer des textures, ou encore effectuer des opérations booléennes. Compatible avec la plupart des imprimantes 3D professionnelles, Magics 17 permet en outre de préparer la plate-forme de fabrication : copies multiples, orientation des pièces à fabriquer, détection des collisions, etc.

netfabb Studio

Ce logiciel professionnel constitue l'une des solutions les plus intéressantes de réparation et de préparation de modèles 3D. Complété par une version Basic et un service en ligne, tous deux gratuits, il est capable d'effectuer l'analyse, la réparation, l'optimisation et l'export des fichiers STL. Il permet entre autres d'ajouter les faces manquantes et de boucher les trous, de créer une enveloppe et d'éviter le modèle, d'éditer la géométrie, de diviser l'objet en plusieurs parties (afin de fabriquer une grande pièce composée de plusieurs éléments, par exemple), de réduire le nombre de polygones ou, au contraire, d'adoucir la surface en ajoutant des triangles.



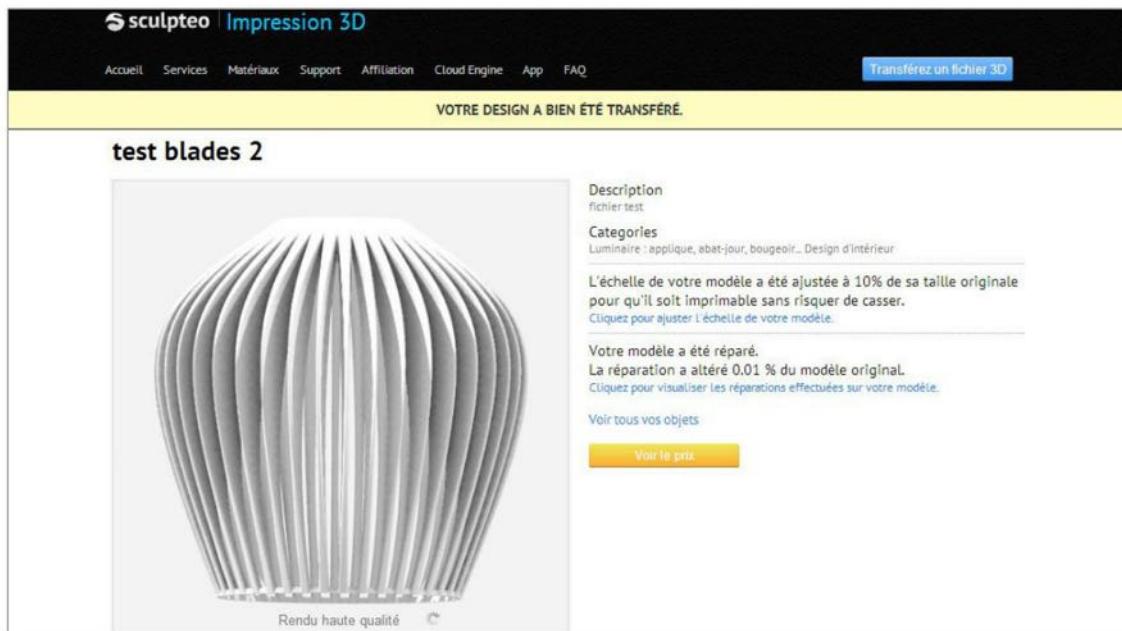
Interface de netfabb Studio Basic. (Source : Le FabShop)

MeshLab

MeshLab est un logiciel gratuit et open source servant au calcul et à l'édition de maillages complexes. Optimisé pour traiter les données de scanner 3D, il gère les opérations classiques d'édition, de réparation, de nettoyage et d'inspection de ce type de fichier. Supportant notamment les formats STL, PLY, 3DS et VRML, cet outil est principalement utilisé en microbiologie et dans la gestion du patrimoine culturel.

LES SOLUTIONS EN LIGNE

Certains services d'impression 3D en ligne, comme Ponoko, Shapeways ou Sculpteo, offrent la possibilité d'analyser, de réparer, d'optimiser et de personnaliser l'un de leurs modèles, en vue d'une impression sur leurs machines. Mentionnons par exemple le cas de Sculpteo qui propose à ses utilisateurs un test de solidité montrant à l'écran les faiblesses du modèle téléchargé.



Test de solidité de Sculpteo. (Source : Sculpteo)

Tranchage du fichier STL

La dernière étape qui précède l'impression est le tranchage du fichier STL. Celui-ci passe alors par un logiciel (un *slicer*) qui le découpe entièrement en tranches et fournit à la machine toutes les indications nécessaires pour réaliser l'impression : positionnement de la pièce, épaisseur de couche, quantité de matière à déposer, vitesse de l'extrudeur, vitesse de déplacement de la buse chauffante et vitesse du plateau, densité du remplissage des objets pleins, etc. Le résultat est un fichier codé qui contient toutes ces informations : c'est ce fichier qui sera lu par l'imprimante.

RÉSOLUTION, DENSITÉ ET ÉPAISSEUR

C'est lors de cette étape que doit être fixée la résolution, à savoir l'épaisseur des couches de matière déposée. Plus elle est fine, plus il y aura de tranches à calculer et plus lente sera l'impression. Par exemple, une résolution de 100 µm correspond à 10 tranches par millimètre, soit 100 tranches par centimètre.

La densité, qui traduit la quantité de matière à l'intérieur de l'enveloppe, est également un paramètre important à régler. Elle sera déterminée en fonction de l'usage final de la pièce : alors qu'un objet décoratif pourra être quasiment creux puisque soumis à aucune contrainte, une pièce mécanique nécessitera un remplissage partiel de l'enveloppe. Dans le cas d'une impression par dépôt de filament, cette densité définira aussi la longueur à parcourir par l'extrudeur et donc le temps de fabrication.

C'est également à ce stade qu'est paramétrée l'épaisseur de la surface extérieure de l'objet, c'est-à-dire l'enveloppe. Là encore, un engrenage requerra une enveloppe plus épaisse, afin d'offrir plus de résistance, qu'une pièce à vocation purement esthétique.

RAFT ET SUPPORT

Dans le cas d'une impression à dépôt de filament fondu, on pourra être amené à prévoir un *raft*, à savoir une grille de fabrication sur laquelle le modèle sera construit. Calculée généralement par le slicer, cette grille est très utile pour des pièces dont la base est petite, car elle permet de leur donner plus d'assise sur le plateau de fabrication, en l'empêchant de tomber durant l'impression.

De même, il faudra aussi parfois ajouter un support à l'objet, une sorte d'échafaudage qui portera les éléments en porte-à-faux, comme le bras d'un personnage, les ailes d'un avion ou la flèche d'une grue. Le logiciel de tranchage projette alors l'emprise du modèle sur le plateau de fabrication et détermine les endroits où prévoir du support avant la dépose de la matière utile. Dans le cas d'une impression à dépôt de filament fondu, le support est déposé selon une trame différente de celle de l'objet à imprimer, afin d'en faciliter le nettoyage à l'issue de la fabrication.



Tortue imprimée en 3D avec son raft. (Source : Le FabShop)

LES LOGICIELS DE TRANCHAGE

Chaque fabricant d'imprimantes 3D dispose de son logiciel propriétaire de tranchage, qui calcule l'ensemble des sections horizontales de la pièce à fabriquer. Parmi les plus connus, on peut citer Slic3r, KISSlicer, Cura, Skeinforge, MakerWare ou ReplicatorG.

Slic3r est un logiciel très populaire, fiable et complet. L'un de ses atouts est de pouvoir choisir le point de départ de chaque nouvelle couche, ce qui permet de concevoir des structures en pont. Plus rapide, KISSlicer (*Keep It Simple Slicer*) offre l'avantage de pouvoir réguler la quantité de matière utilisée dans les différentes parties de l'objet. Cette fonctionnalité permet notamment de renforcer les points fragiles d'un design.

Lancé en mars 2014, MatterControl est un logiciel open source gratuit développé par l'entreprise MatterHacker et pensé pour le maker amateur. L'interface très intuitive intègre des fonctionnalités chères aux utilisateurs d'imprimantes 3D personnelles. Le logiciel prend en charge la découpe ainsi que la gestion de l'imprimante.

Certains logiciels de découpe acceptent aussi les formats incluant des informations de couleur et/ou de texture. Ainsi, ZPrint est compatible avec les formats PLY, VRML et 3DS.

Exportation pour l'impression

Le format du fichier tranché est toujours du G-code, un standard de l'industrie pour piloter des machines-outils à commande numérique. Développé au début des années 1960, il permet de positionner un objet dans l'espace, mais aussi d'envoyer des instructions à la machine (vitesse de déplacement, température, etc.). Il est souvent encapsulé dans un format propriétaire : MakerBot utilise ainsi du S3G ou du X3G, par exemple.

Le modèle peut être alors exporté vers l'imprimante via une carte SD, un câble USB ou une connexion Wi-Fi. Les modèles de la marque PP3DP intègrent une carte mémoire sur laquelle il faut charger le modèle à fabriquer, tandis que les machines Printrbot requièrent un PC relié pendant toute l'impression. Quant aux Replicator de MakerBot, ils acceptent une carte SD à partir de laquelle on peut envoyer une commande.

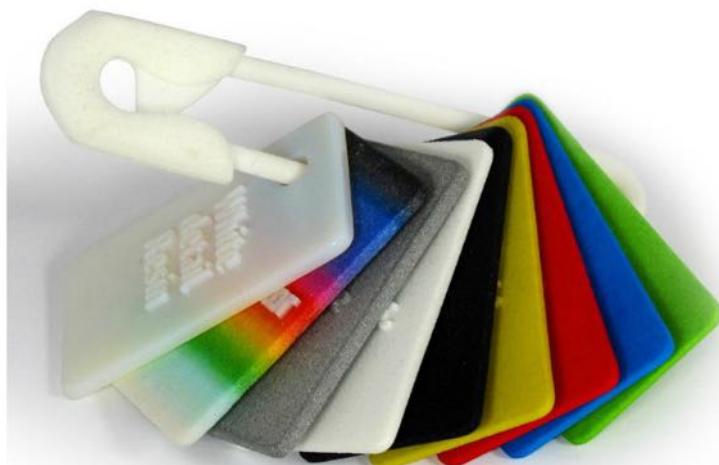
CHAPITRE 6

LA PHASE D'IMPRESSION

Le choix du matériau, les réglages de l'imprimante et la préparation de la pièce sont les dernières étapes clés avant la fabrication même de l'objet. Naturellement, ce choix dépend étroitement du type de pièce à imprimer et du modèle d'imprimante. De même, on ne réglera pas de la même manière la machine, selon que l'impression est à dépôt de filament fondu, à stéréolithographie ou à frittage laser. Avant tout, il faut connaître la fonction finale de l'objet pour décider sur quels leviers on va pouvoir jouer pour optimiser l'impression : coût de l'impression, qualité finale de la pièce, temps de fabrication ?

Le choix du matériau

Opter pour tel ou tel matériau d'impression suppose d'avoir en amont une vision claire du résultat souhaité : l'objet final sera-t-il un prototype ou un produit fini ? Quelles propriétés physiques et mécaniques devra-t-il avoir ? Quels seront ses usages ? En effet, les caractéristiques d'un matériau influenceront grandement le rendu et le post-traitement de la pièce imprimée, que ce soit au niveau de sa solidité, sa flexibilité, sa résistance, sa transparence, son niveau de détail, son état de surface ou encore ses finitions. Il faut donc commencer par établir quels critères devra remplir l'objet final, puis identifier les matériaux appropriés et les imprimantes 3D compatibles.



Échantillons de différents matériaux d'impression 3D : résine blanche, composite multicolore, alumide et polyamide en six couleurs. [Source : Sculpeo]

CARACTÉRISTIQUES D'UN MATERIAU

Pour connaître les qualités et les limites d'un matériau, il faut pouvoir interpréter les valeurs de ses différentes caractéristiques.

Les caractéristiques mécaniques

Elles concernent le comportement le plus visible du matériau : son degré de dureté et de flexibilité, ou encore son élasticité. La dureté se mesure sur différentes échelles selon le type de matériau : échelle Shore pour les élastomères (voir page 74), échelle Rockwell pour les métaux (voir page 77), etc.

Les caractéristiques thermiques

Elles indiquent notamment le degré de résistance du matériau à la chaleur et au froid, ainsi que son point de fusion. Ces informations sont souvent complétées par une mesure de ses déformations.

Les caractéristiques électriques

Elles fournissent des informations sur le comportement du matériau lors du passage d'un courant électrique : facteur de dissipation, résistivité, permittivité et rigidité diélectrique.

Les caractéristiques environnementales

Elles permettent d'estimer l'impact du matériau sur l'environnement. Certains constructeurs effectuent en effet des tests sur leurs composants afin de mesurer leur réaction au passage d'éléments polluants comme des gaz, des carburants ou des liquides de transmission.

Attention, matériaux dangereux !

L'un des grands défis de l'accès à la fabrication digitale pour tous est la question de la sécurité. En effet, les matériaux utilisés peuvent être inflammables, fragiles, non adaptés aux normes sanitaires, voire néfastes pour la santé. Avant de se lancer dans un projet d'impression, d'autant plus si celui-ci est commercial, il convient donc de prendre le temps de se renseigner sur les normes spécifiques qui encadrent l'objet à réaliser.

Pour les appareils électriques et les jouets, par exemple, il faut se conformer à la directive européenne RoHS (*Restriction of the Use of certain Hazardous Substances*), qui certifie que la pièce est exempte (ou en dessous des concentrations maximales autorisées) d'un certain nombre de substances dangereuses comme le plomb, le mercure, le cadmium, le chrome hexavalent, les PBB (polybromobiphényles) et les PBDE (polybromodiphénoléthers).

Par ailleurs, une étude de l'Institut de technologie de l'Illinois tendrait à prouver que les imprimantes personnelles utilisant de l'ABS ou du PLA émettent des microparticules toxiques. Alors protégez-vous !

QUEL MATERIAU POUR QUEL OBJET ?

Comme il n'est pas facile de s'y retrouver dans la jungle des matériaux et des techniques d'impression 3D, nous avons récapitulé dans le tableau ci-contre les matériaux recommandés

selon le type d'objet à imprimer. Attention, ces informations ne sont à prendre qu'à titre indicatif, comme une première piste d'exploration pour vos projets.

Matériaux recommandés par type d'objet à imprimer.

OBJET À IMPRIMER	MATÉRIAUX RECOMMANDÉS	AVANTAGES
Figurine	Résine	Grande précision et finitions plus faciles qu'avec du polyamide ou de l'ABS
Vaisselle (tasse, assiette, bol, vase...)	Céramique	Conforme aux normes sanitaires, étanche et résistante à la chaleur
Maquette d'architecture	Matériau composite Z Corporation ou polyamide	Impression simultanée en plusieurs couleurs possible et grande finesse de détail
Jouet	ABS ou PLA	Couleurs vives, surface lisse et agréable au toucher
Matériel publicitaire (accessoires, porte-clés...)	Polyamide coloré	Meilleur marché que la résine, précis, et permettant des formes mobiles
Bijou	Argent, or ou bronze, en impression à cire perdue	Excellente qualité de détail
Pièce mécanique comportant des éléments mobiles (chaîne, boule, engrenage...)	Polyamide	Possibilité de réaliser des engrenages complexes et précis. Partie mobile impossible avec une impression en résine ou en métal
Écran, effet de transparence	Résine transparente	Seul matériau totalement transparent existant pour le moment

Réaliser une impression

Une fois le matériau d'impression choisi, il ne reste plus qu'à procéder à quelques ajustements de l'imprimante 3D pour lancer l'impression du fichier 3D. La plupart de ces réglages s'effectuent à l'aide du logiciel de contrôle d'impression.

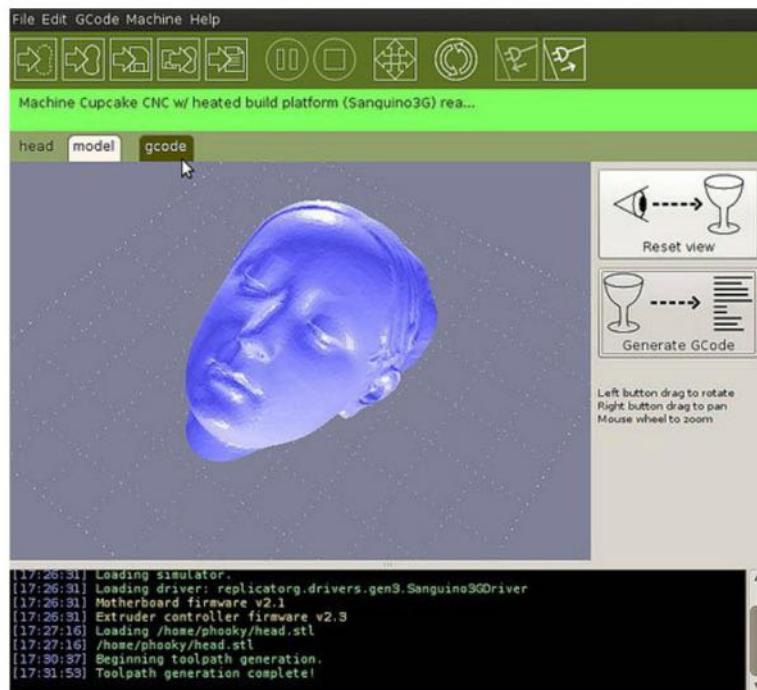
LE LOGICIEL DE CONTRÔLE D'IMPRESSION

Appelé aussi logiciel d'impression 3D, le logiciel de contrôle d'impression permet de faire chauffer la tête d'extrusion, de contrôler les déplacements de l'imprimante durant les phases de test, de lancer l'impression et d'obtenir des informations importantes sur le comportement de la machine tout au long de la phase d'impression. Sans ce logiciel, l'imprimante 3D est comme un corps sans cerveau, incapable de fonctionner.

La plupart des imprimantes 3D sont fournies avec un logiciel dédié, à l'exception notable des machines open source qui sont compatibles avec différents logiciels. Pour ces dernières, il est cependant préférable de suivre les instructions du constructeur et d'installer l'un des logiciels recommandés. L'un des plus connus, ReplicatorG, convient aussi bien aux imprimantes 3D MakerBot qu'à la plupart des modèles issus du projet RepRap.

Tableau comparatif des principaux logiciels d'impression 3D.

LOGICIEL	IMPRIMANTES COMPATIBLES	SYSTÈMES D'EXPLOITATION COMPATIBLES	GESTION DU DÉCOUPAGE DE FICHIER	VISUALISATION DE LA PIÈCE EN 3D PENDANT L'IMPRESION
ReplicatorG	Imprimantes personnelles FDM (MakerBot, RepRap...)	Linux, Mac OS X, Windows	Oui	Oui
Pronterface	Imprimantes personnelles FDM (Printrbot, RepRap...)	Linux, Mac OS X, Windows	Non	Non
MakerWare	MakerBot	Linux, Mac OS X, Windows	Oui	Oui (gestion de l'impression simultanée de plusieurs pièces)
Repetier	Imprimantes personnelles FDM	Linux, Mac OS X, Windows	Oui	Oui
Cura	Imprimantes personnelles FDM (Ultimaker, RepRap...)	Linux, Mac OS X, Windows	Oui	Oui
ZPrint	X60 (3D Systems)	Windows	Oui	Oui (gestion de l'impression simultanée de plusieurs pièces)
Objet Studio	Objet	Windows	Oui (découpage du fichier à la volée pour réduire le temps de préparation)	Oui (gestion de l'impression simultanée de plusieurs pièces)
Magics	Imprimantes à frittage laser ou à stéréolithographie (EOS...)	Windows	Oui	Oui (gestion de l'impression simultanée de plusieurs pièces)



Capture d'écran du logiciel d'impression 3D ReplicatorG. (Source : ReplicatorG)

PRÉPARER L'IMPRIMANTE

Avant de lancer une impression, il faut procéder à quelques réglages et ajustements au niveau de l'imprimante, surtout s'il s'agit d'un modèle FDM. On considérera ici que la machine est fonctionnelle et déjà calibrée.

Contrôle des axes et du plateau

Les imprimantes personnelles à dépôt de filament fondu demandent généralement plus de vérifications et d'ajustements manuels que les autres modèles. Il est par exemple courant que les courroies de transmission reliées aux moteurs, qui permettent de faire bouger les axes x et y, se détendent. L'impression risque alors d'être moins précise puisque ces derniers se déplacent plus librement. Il faut donc s'assurer que ces courroies ne pendent pas : au contraire, elles doivent être aussi tendues que des cordes de guitare.



Courroie de transmission bien tendue sur l'axe y d'une Printrbot jr. (Source : Printrbot jr)

Avec le temps, il arrive également que le plateau d'impression ou l'axe z glissent moins facilement. Il est alors conseillé de lubrifier légèrement les tiges de glissement pour faciliter les déplacements.

Pour vérifier que les axes se déplacent bien de manière optimale, un test consiste à faire bouger les différents éléments à l'aide du logiciel de contrôle et à mesurer les déplacements effectués (sans activer la température ni installer le filament). Choisissez un point de repère sur le plateau d'impression, comme le point le plus à droite possible sur l'axe x, puis effectuez un déplacement complet de l'axe (sur 10 cm, par exemple) et notez le point d'arrivée. Répétez cette manœuvre plusieurs fois : si vous n'obtenez pas toujours le même résultat, il vous faudra procéder à certains réglages de votre imprimante, comme resserrer les courroies de transmission, s'assurer du bon glissement du plateau d'impression, etc.

Positionnement de la tête d'extrusion

Dans le cas des imprimantes personnelles à dépôt de filament fondu, il est important de vérifier que la tête d'extrusion est bien positionnée par rapport au lit d'impression. Pour cela, il suffit de faire glisser une feuille de papier sous la tête d'impression mise au point 0 : la feuille doit tout juste passer, prouvant qu'il n'y a pas de jeu entre la tête et le plateau. Effectuez ce test d'un bout à l'autre du lit d'impression pour vous assurer que cette mesure est identique sur toute la surface.

Vidéo sur le positionnement de la tête d'extrusion à l'adresse :
<http://bit.ly/videoExtrudeur>



Chauffage de la tête d'extrusion

Vient ensuite le moment de faire chauffer la tête d'impression de la machine. Le logiciel de contrôle permet de suivre la montée de la température, souvent à l'aide d'un graphique en temps réel. Il faut compter en général une dizaine de minutes pour que la tête d'extrusion soit à la température voulue, qui varie selon le matériau utilisé : 185 °C en moyenne pour le PLA, 200 °C pour l'ABS, par exemple.

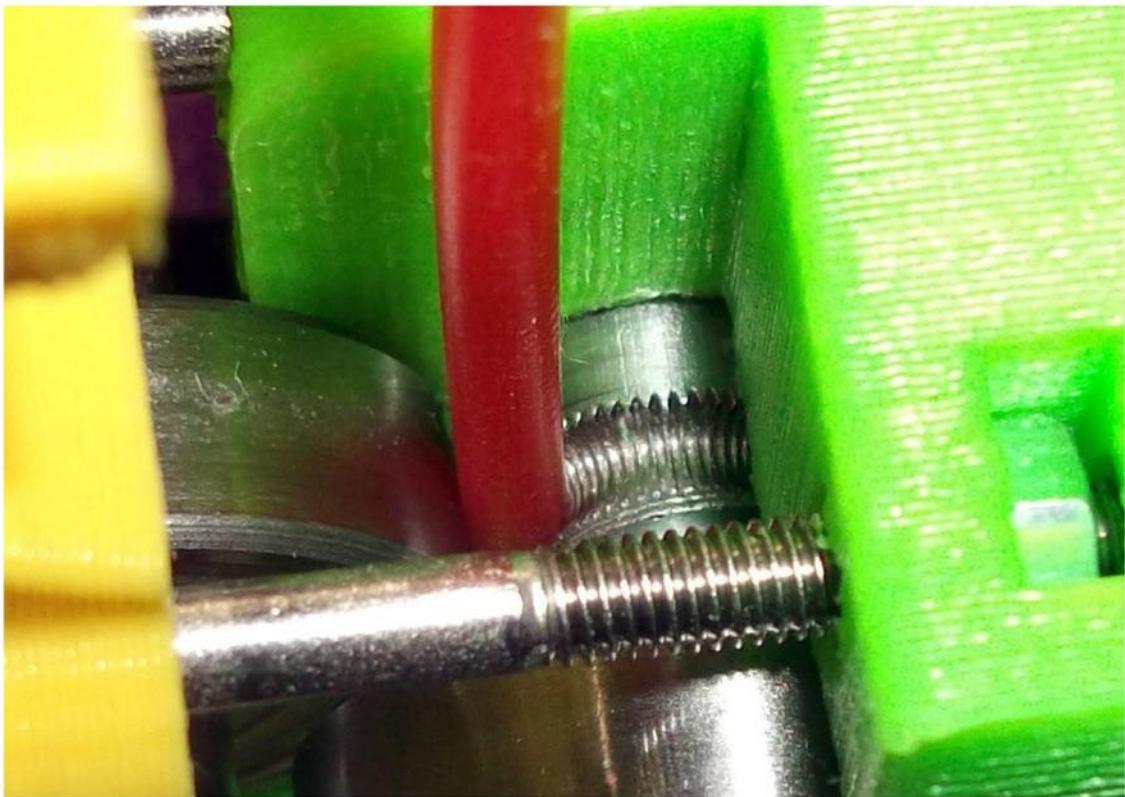
Ne pas imprimer à la mauvaise température !

Attention à ne pas lancer une impression si l'imprimante est froide ou n'a pas atteint la bonne température. Même si, dans ce cas, le logiciel de contrôle la bloque généralement, il vaut mieux éviter toute tentative, car cela pourrait endommager la tête d'extrusion.

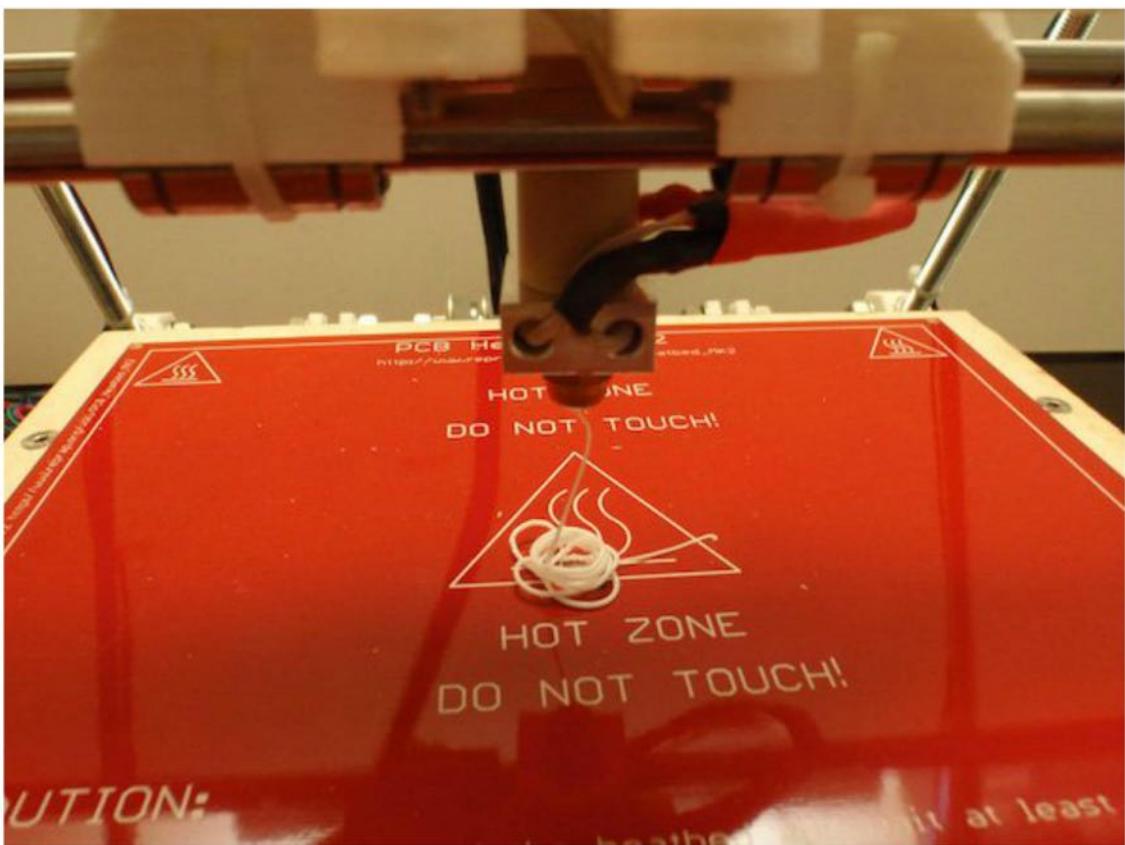
Extrusion préparatoire

Une fois la température atteinte, il est fortement recommandé d'extruder quelques centimètres de filament avant toute impression, afin de se débarrasser des restes de filament de l'impression précédente (c'est particulièrement utile si celle à venir n'utilise pas la même couleur de filament, par exemple). Cette opération, qui dure quelques secondes, permet aussi de vérifier le bon comportement du filament : il ne doit pas boucler ou rester collé à la tête d'impression mais doit au contraire couler de façon fluide.

Pour cela, insérez le filament dans l'extrudeur sans forcer, en vous assurant qu'il est bien positionné au centre des dents de l'extrudeur (voir ci-contre l'image du haut pour un positionnement idéal). Puis faites-le glisser jusqu'à atteindre la tête chauffante. Réalisez alors une extrusion d'environ 30 mm, en ayant pris soin de placer la tête d'impression à quelques centimètres de hauteur sur l'axe z afin de ne pas bloquer le passage du filament.



Filament parfaitement inséré dans l'extrudeur d'une RepRap Prusa Mendel. (Source : Nextday RepRap)

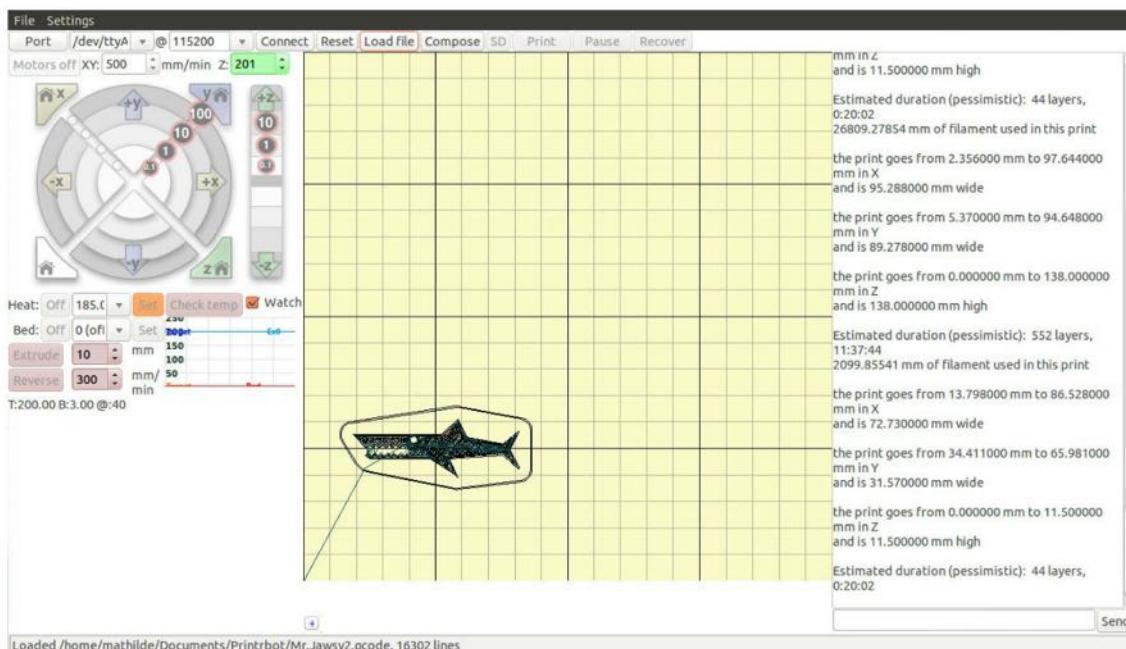


Extrusion du filament fondu par la tête chauffante d'une RepRap Prusa Mendel. (Source : RichRap)

LANCER L'IMPRESSION

Une fois ces réglages effectués, on peut charger le fichier prêt à imprimer dans le logiciel d'impression, si ce n'est pas déjà fait. Pour être imprimable, ce fichier doit d'abord avoir été découpé en tranches à l'aide d'un logiciel de découpe (voir page 103). Il doit aussi contenir toutes les indications nécessaires à la machine pour réaliser l'impression : positionnement de la pièce, épaisseur de couche, quantité de matière à déposer, vitesses de l'extrudeur, de déplacement de la buse chauffante et du plateau, densité du remplissage des pièces pleines, etc. Dans le cas d'une imprimante personnelle, le format de ce fichier est souvent du G-code.

Avant l'impression, certains logiciels de découpe et de contrôle permettent de définir le point de départ de chaque couche. Cette fonctionnalité est très utile si l'on souhaite avoir un contrôle complet sur l'impression : renforcer certaines zones de la pièce, créer des effets de plein et de vide...

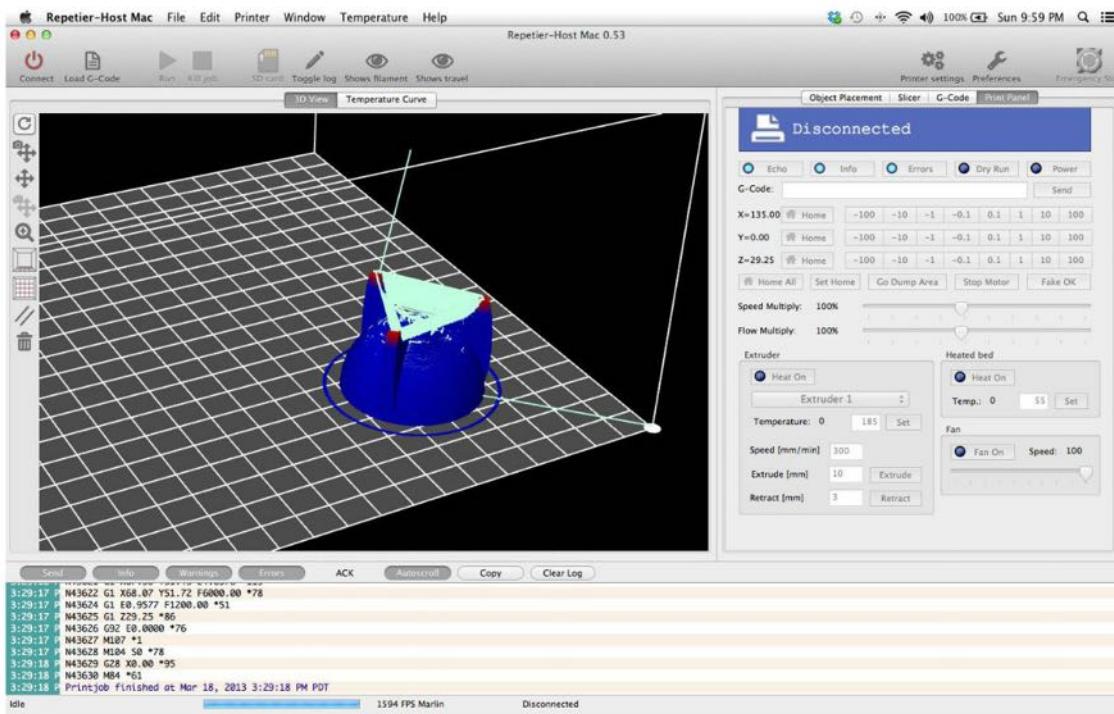


Interface du logiciel de contrôle d'impression Pronterface. La première couche de la pièce prête à imprimer est positionnée sur le plateau d'impression. (Source : Pronterface)

La possibilité de modifier les informations relatives à l'objet, comme son positionnement ou sa taille (échelle en pourcentage), est également un avantage appréciable pour mieux organiser le plateau d'impression. Elle est toutefois peu courante sur les logiciels de contrôle d'imprimantes 3D open source.

Le logiciel de contrôle de l'imprimante analyse ensuite le fichier, proposant souvent une visualisation 3D de la pièce sur le plateau d'impression. Selon le logiciel, seule la première couche sera visible, ou bien l'objet dans son ensemble. L'impression peut alors être lancée.

Grâce au logiciel de contrôle, on peut visualiser l'évolution de la pièce durant son impression, bien pratique si l'ordinateur et l'imprimante 3D utilisés ne sont pas dans la même pièce (certaines machines comme la Cubify de 3D Systems sont d'ailleurs équipées d'un système Wi-Fi permettant de lancer l'impression à distance).



Interface du logiciel de contrôle d'impression Repetier. L'objet est visible dans son ensemble. (Source : Repetier)

Optimiser l'impression

Avant de chercher à optimiser une impression 3D, il faut d'abord identifier le rôle de la pièce à imprimer. Est-ce un objet destiné à la vente, un prototype, ou encore un premier test fonctionnel ? S'agit-il d'un moule ou d'un outil ? Ou une partie d'une pièce devant être assemblée ? Un post-traitement est-il prévu ? En fonction des réponses, on pourra déterminer quelles seront les priorités : le coût de l'impression, la qualité de l'objet ou le temps de fabrication.

OPTIMISER LES COÛTS

L'un des reproches souvent adressés à l'impression 3D est sa cherté. Le prix des consommables est élevé, et ce n'est pas le fait de produire en grande série qui réduira la note. En effet, le temps et le coût de fabrication restent proportionnels au nombre de pièces imprimées, même si elles sont en grande quantité. On le sait : la valeur ajoutée de l'impression 3D n'est pas dans la production de masse mais dans le sur-mesure.

La forme de l'objet

Plusieurs facteurs déterminent le prix d'une impression. Le premier d'entre eux est bien évidemment la forme de la pièce à fabriquer : plus il faudra de matière pour la réaliser, plus le coût sera élevé. Un objet de grande taille et plein reviendra beaucoup plus cher qu'une petite pièce fine et creuse.

Ainsi, la complexité de l'objet à imprimer ne modifie pas les coûts en profondeur, contrairement aux idées reçues. Ce qui importe davantage, c'est la quantité de matériau utilisée pour

le fabriquer. C'est pourquoi il est parfois plus avantageux de découper le fichier 3D de la pièce, de façon à réaliser plusieurs impressions qui seront assemblées par la suite. L'autre élément à prendre en compte est la hauteur de l'objet : plus il sera plat (proche du plateau d'impression), plus l'impression sera rapide et économique en matière.

Il existe des solutions logicielles pour évaluer le coût d'une impression et donc adapter en prévision la forme de la pièce. Le service d'impression 3D Sculpteo a ainsi développé un outil en ligne qui permet d'obtenir une estimation tarifaire dès le téléchargement du fichier. L'utilisateur peut alors ajuster le prix en modifiant la taille de l'objet et en sélectionnant un matériau. Néanmoins, dans un certain nombre de cas, il est recommandé de contacter directement le prestataire d'impression 3D pour qu'il établisse un devis sur mesure. Il pourra également donner son point de vue sur la faisabilité de la pièce et le choix du matériau (plus de 60 sont disponibles à la demande chez Sculpteo).

Les systèmes de stockage

À l'exception des modèles open source, toutes les imprimantes 3D requièrent des consommables qui leur sont propres. Pour recharger une machine, il faut donc se fournir chez son constructeur. Différents systèmes de stockage existent sur le marché : cartouche de matériau, bac de poudre ou de liquide à remplir, bobine de filament à dérouler... Chaque système a ses avantages et ses inconvénients, et certains sont bien plus onéreux que d'autres.



Cartouches de matériau prêtes à être insérées dans une imprimante 3D personnelle Zim de Zeepro. (Source : Zeepro)

Les cartouches sont très propres, quasiment sans fuite, et faciles à installer ou à changer. En revanche, elles sont parmi les systèmes les plus chers et renferment généralement moins de matière que les autres. Les ProJet à DLP de 3D Systems et les imprimantes d'Objet utilisent des cartouches, les premières pouvant en contenir jusqu'à dix de 0,5 kg.

Les bacs à remplir sont plus compliqués à manipuler. La poudre est généralement stockée dans de grands seaux, qu'il faut déverser dans la machine dans le bac prévu à cet effet. Les dernières versions des imprimantes X60 facilitent grandement le versement et le stockage de la poudre grâce à la présence d'un bac distinct, à l'arrière de la machine. Avec ces machines, le coût d'un objet imprimé est de 2,30 € environ pour une quinzaine de cm³.

Quant aux bobines de filament, elles sont utilisées par quasiment toutes les imprimantes open source à dépôt de filament fondu (FDM). Ce système présente l'avantage d'être propre et simple d'emploi, mais des complications peuvent se produire lors de l'impression, la bobine ne se déroulant pas toujours de manière uniforme. Une bobine de filament coûte entre 25 et 30 €.

Les consommables

L'utilisation d'une imprimante personnelle FDM fait aussi baisser drastiquement les coûts d'impression, grâce au prix modique de ses matériaux. Une bobine de filament d'ABS ou de PLA ne coûte ainsi qu'une vingtaine d'euros, mais permet de réaliser un grand nombre de pièces creuses de petite taille. Pour seulement quelques centimes d'euros, il est possible d'imprimer un petit objet en plastique.

Actuellement, il existe peu d'outils fiables capables d'estimer la quantité de filament nécessaire à une impression réalisée sur une imprimante 3D personnelle. Le logiciel Skeinforge peut évaluer cette quantité en fonction du design de la pièce, mais il n'est pas très précis. Un script pour G-code (voir page 103), disponible sur Thingiverse, permet une estimation plus juste.

Bien choisir sa bobine de filament

Les imprimantes 3D à dépôt de filament fondu ne sont pas toujours vendues avec leur bobine de filament. Si l'on doit acheter le consommable séparément, plusieurs critères sont à prendre en compte avant de passer commande.

- **La qualité du filament.** Il est fortement conseillé de privilégier les plastiques de haute qualité, car ils seront plus stables à l'impression (rapidité de fonte, temps de solidification) et d'un diamètre égal tout au long de la bobine.
- **Le diamètre du filament.** Il doit être évidemment compatible avec l'imprimante. La MakerBot Replicator 2 ou la Solidoodle nécessitent, par exemple, un filament de 1,75 mm de diamètre ; l'Ultimaker accepte un diamètre compris entre 2,8 et 3,1 mm ; le modèle Printrbot requiert, lui, un diamètre de 3 mm.
- **Le poids de la bobine.** Les bobines de filament sont vendues au poids, pesant en moyenne 1 kg.

Les services d'impression 3D en ligne

Le recours à des services en ligne peut aussi réduire fortement le coût de l'impression. Destinés aux particuliers mais également aux entreprises, ils permettent d'éviter l'achat d'une machine et donnent accès à un large choix de techniques et de matériaux. Ils prennent en charge toute la phase d'impression, de la réception du fichier 3D à l'envoi final de l'objet.

Quatre services d'impression 3D en ligne dominent actuellement le marché mondial : Shapeways, Sculpteo, i.materialise et Ponoko. Chacun d'eux a développé sa propre grille tarifaire, en fonction de son parc de machines, de sa localisation et de sa stratégie de calcul. Les prix varient donc d'un service à l'autre et sont difficilement comparables, mais ils restent très avantageux. Les services les moins chers pratiquent même des tarifs capables de rivaliser avec un moulage par injection réalisé en Chine !

MATÉRIAUX	SCULPTEO	SHAPEWAYS	I.MATERIALISE	PONOKO
Polyamide blanc	Oui (plastique blanc)	Oui (<i>strong & flexible plastic</i>)	Oui (polyamide)	Oui (<i>durable plastic</i>)
ABS	Non	Non	Oui (<i>white, red, natural steel gray, black</i>)	Non
Acrylique	Non	Oui (<i>fine detail plastic : acrylic-based photopolymer</i>)	Non	Non
Alumide	Oui	Oui	Oui	Non
Matériau composite Z Corporation	Oui (multicolore)	Oui (<i>full color sandstone</i>)	Oui (<i>multicolor</i>)	Oui (<i>rainbow plaster</i>)
Résine haute définition	Oui (résine blanche ou noire haute définition)	Non	Oui	Non
Résine Objet	Non	Oui (<i>frosted detail plastic</i>)	Non	Oui (<i>durable fine plastic</i>)
Résine transparente	Oui	Oui	Oui (<i>white, black, blue, green, yellow, gray, red, orange, brown</i>)	Non
Caoutchouc	Non	Oui	Oui	Non
Cire	Oui	Non	Non	Non
Céramique	Oui (blanc brillant, bleu outremer, orange tangerine, turquoise, bleu azur, noir satiné, vert anis, jaune citron)	Oui (<i>white glossy, black glossy, black satin, avocado green glossy, pastel yellow glossy, eggshell blue glossy</i>)	Oui (<i>glossy white, glossy black, satin black, lemon yellow, pistachio green, sky blue, ocean turquoise, true blue, peach orange</i>)	Oui (<i>glazed ceramic : black, black satin, green, pale blue, peach, periwinkle, teal, white, yellow</i>)
Couverture argent	Oui (argenté)	Non	Non	Non
Argent	Non	Oui (<i>sterling silver</i>)	Oui	Non
Or	Non	Non	Oui	Non
Acier inoxydable	Non	Oui	Non	Oui
Titane	Non	Non	Oui	Non
Cuivre	Non	Non	Oui (<i>brass</i>)	Non
Bronze	Non	Non	Oui	Non
Verre	Non	Oui	Non	Non

En résumé

- Privilégier les pièces creuses et de petite taille.
- Préférer l'assemblage de pièces imprimées séparément plutôt que l'impression d'une seule pièce.
- Choisir un matériau bon marché comme le PLA, l'ABS ou le polyamide.
- Utiliser les services d'impression 3D en ligne pour les pièces complexes.

OPTIMISER LA QUALITÉ DE LA PIÈCE



Steady as She Goes. Pièce créée par l'artiste Luca Ionescu qui s'est fait remarquer pour la qualité de détail de ses impressions. (Source : Like Minded Studio)

Si la priorité est de produire des pièces d'une excellente qualité, d'autres critères doivent être alors pris en compte. Trois paramètres vont influencer la qualité finale de l'objet : la résolution de l'impression (voir page 54), la nature du modèle 3D initial et la configuration de la pièce pour la machine. Attardons-nous sur ce dernier point.

Le placement de la pièce dans le bac

La position de l'objet dans le bac de l'imprimante peut avoir des répercussions sur la qualité de l'impression, modifiant radicalement les besoins en matériau de support et la manière dont la pièce sera produite dans son ensemble. Heureusement, la plupart des logiciels de contrôle des imprimantes 3D aident l'utilisateur à placer l'objet de façon optimale. En particulier, ils permettent de définir en amont quels seront les points de pression et les parties fragiles de la pièce.

Les pièces longues ayant tendance à se casser plus facilement si elles sont imprimées en hauteur, il est conseillé de les positionner à l'horizontale sur le plateau de l'imprimante s'il s'agit d'une impression par frittage laser, 3DP ou FDM.

Dans le cas d'un design très précis comportant des zones fragiles, il est parfois utile d'envelopper la pièce d'une coque protectrice. Cette méthode est à rapprocher de la pratique du « panier », qui permet d'imprimer plusieurs objets au cours d'une même impression en optimisant leur positionnement.

Le panier d'impression

En impression au frittage laser, il est courant d'imprimer simultanément plusieurs objets, ce qui permet de minimiser les coûts et de produire davantage. On utilise alors la technique du panier d'impression, qui consiste à positionner les modèles dans le bac de manière à optimiser au maximum la capacité de la machine. Un petit modèle sera par exemple placé dans un bol, afin d'utiliser autant que possible la poudre au centre qui serait perdue autrement.

Le dessous de la pièce

Il faut savoir que sur une pièce imprimée, le dessous sera toujours moins réussi que le reste, car le rouleau qui étale la poudre couche après couche a tendance à écraser légèrement les couches précédentes, ce qui déforme légèrement la toute première. Ce problème se pose notamment avec les imprimantes personnelles FDM, où la base de l'objet présente une texture plus lisse et tassée. Si la finesse et la qualité du résultat sont les priorités, il est donc important de positionner la pièce de telle sorte que son socle (ou sa partie cachée) soit positionné vers le bas.

Améliorer l'esthétique du socle

Avec un logiciel de découpe comme Slic3r, il est possible de styliser le dessous de la pièce et son remplissage : rectangles, cercles concentriques, mosaïque... Le socle de l'objet peut être ainsi mis en valeur par des motifs esthétiques.

Le plateau d'impression

Au cours des impressions à dépôt de filament fondu, il arrive souvent que la base de la pièce se décolle légèrement, entraînant une déformation du modèle. Pour éviter ce désagrément, une attention toute particulière doit être portée au plateau d'impression, qui nécessite d'être parfaitement nettoyé avant toute utilisation, à l'acétone de préférence. Par ailleurs, il est

recommandé d'augmenter la hauteur de la première couche d'impression, afin d'en faire un support plus lourd qui aura ainsi moins tendance à se décoller.

S'il s'agit d'une impression en PLA, il est conseillé de recouvrir le plateau d'impression d'adhésif (par exemple, le ruban adhésif bleu 2090 ou 2093 de la marque 3M est très bien adapté) ou encore d'une plaque d'acrylique qui garantira une bonne adhérence des premières couches.

Dans le cas d'une impression en ABS, le plateau est chauffant afin de garantir une bonne adhésion du matériau sur le lit d'impression. Il est préférable qu'il soit en verre (d'au moins 3 mm d'épaisseur), pour que la pièce y adhère tout en se décollant facilement après impression. La plupart des magasins de bricolage vendent pour quelques euros des plaques de verre à la découpe, si l'on souhaite améliorer son modèle d'imprimante.

OPTIMISER LE TEMPS D'IMPRESSION

Ces dernières années, les imprimantes personnelles ont beaucoup gagné en vitesse, en comparaison des premiers modèles. Ainsi, la MakerBot Thing-O-Matic, imprimante 3D personnelle sortie en 2010, n'imprimait qu'à une vitesse de 83,3 mm/s sur le plan horizontal (axes x et y) et de 100 mm/min sur l'axe vertical (axe z). Il fallait alors compter plusieurs heures pour imprimer une pièce de quelques centimètres de haut. Aujourd'hui, l'impression d'une pièce de 10 cm de hauteur requiert entre 20 et 40 minutes seulement. Mais même si ce délai d'impression s'est considérablement réduit, il peut être encore contraignant. Aussi est-il intéressant de pouvoir le réduire.

Les facteurs qui font varier le temps d'impression sont multiples. La taille de la pièce est bien sûr primordiale : plus elle est grande, plus elle sera longue à imprimer. Le design de l'objet a également un impact : une pièce pleine ou en nid-d'abeilles s'imprimera plus lentement qu'un objet creux. Dans le cas d'une imprimante personnelle FDM, la taille de sa tête d'impression et le type de son moteur jouent aussi un grand rôle : plus la partie à déplacer est lourde (plateau d'impression, système d'extrusion), plus l'impression sera lente.



L'impression de droite est plus longue à réaliser que les deux autres car, son degré de remplissage étant plus élevé, l'imprimante passe plus de temps sur chaque couche. (Source : RichRap)

Sur une imprimante 3D personnelle, l'optimisation du temps d'impression se joue en partie lors de l'exportation du fichier 3D en G-code. Car c'est lors de cette dernière étape avant impression que l'on peut ajuster d'importants paramètres, comme la vitesse de déplacement des axes ou encore la densité de remplissage. En particulier, ce dernier facteur est capital : s'il s'agit d'une pièce pleine, il est conseillé de baisser la densité du remplissage pour réduire autant que possible le temps passé par l'imprimante à imprimer chaque couche. Par exemple, dans Slic3r, vous fixerez le paramètre Fill density à 0,2 plutôt qu'à 0,4.

Avec les imprimantes X60

Les modèles X60 sont parmi les machines les plus rapides du marché, la fabrication d'une pièce s'effectuant au rythme de 2 cm/h. Leur vitesse d'impression dépend presque uniquement de l'axe z, c'est-à-dire de la hauteur de l'objet : plus il y a de couches, plus l'impression est lente, qu'il y ait une ou plusieurs pièces en cours de réalisation. Pour optimiser le temps d'impression des imprimantes X60, il faut donc penser à réduire au minimum la hauteur d'impression, en couchant l'objet par exemple. Car si l'étalage d'une couche de poudre ne dure que quelques secondes, il se répète des milliers de fois au cours d'une impression...

LA PHASE DE FINITION

Après son impression, un objet nécessite généralement un certain nombre de traitements (nettoyage, solidification, préparation, finition...), qui demandent minutie, patience et dextérité. Il est probable cependant que les premières tentatives ne fournissent pas un résultat parfait : aussi faudra-t-il se garder la possibilité d'imprimer la pièce plusieurs fois afin de déterminer la meilleure méthode de finition.

Avant d'entamer ces différents traitements, il conviendra de prendre quelques précautions élémentaires car les produits utilisés peuvent être toxiques et irritants. Il est ainsi vivement conseillé de s'équiper de gants et d'un masque, mais également de protéger ses vêtements car, selon la technique de finition choisie, le procédé peut être salissant (sprays, résidus, poussières...). L'idéal est de pouvoir s'installer dans une pièce dédiée, propre et bien ventilée, voire dehors si c'est possible.

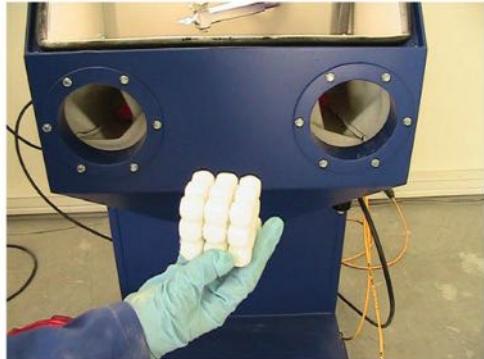
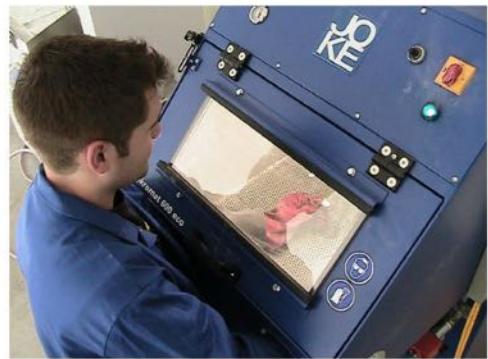
Ce chapitre se focalise tout particulièrement sur le traitement des trois matériaux d'impression 3D les plus populaires : le polyamide, l'ABS et la résine.

Le nettoyage de la pièce

Une fois sorties de l'imprimante, les pièces auront besoin d'un nettoyage, qui diffère selon le procédé d'impression utilisé. Certaines nécessiteront uniquement un dépoussiérage, d'autres également une infiltration (phase de solidification).

Le dépoussiérage est incontournable pour toutes les impressions à base de poudre qui sont réalisées par la technique de frittage laser. En effet, les pièces obtenues doivent être libérées du matériaux poudreux qui n'a pas été utilisé pour leur fabrication. En règle générale, ce travail s'effectue manuellement à l'aide d'une brosse appropriée.

Toutefois, certains modèles d'imprimantes, comme les machines X60 de 3D Systems, sont équipés d'un dispositif ingénieux de nettoyage qui permet de faciliter grandement la tâche. L'utilisateur passe alors ses mains dans des gants intégrés à l'imprimante et peut nettoyer la pièce à travers une vitre, en limitant de cette manière toute exposition à la poudre et toute dispersion de matière.



Pièces fraîchement sorties de leur bac d'impression. (Source : Sculpteo)

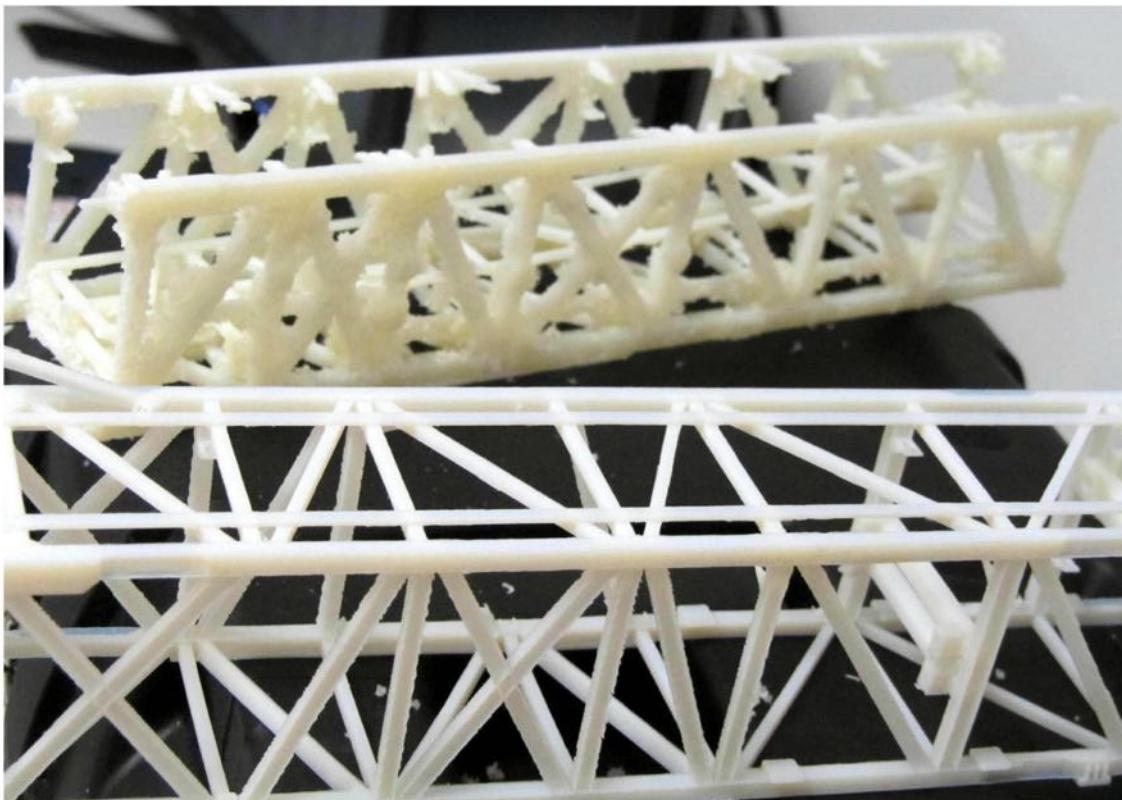
Le nettoyage est également indispensable pour les impressions de métal. S'apparentant à une farine lourde, la poudre de métal (l'acier inoxydable, par exemple) en excédent peut être facilement retirée après impression. Si la pièce est petite, il suffit de la secouer et d'enlever le surplus à l'aide d'une petite brosse.

Les pièces imprimées sur des machines à dépôt de filament fondu nécessitent aussi d'être nettoyées. Il faut alors retirer le socle d'impression sur lequel repose l'objet et le débarrasser des filaments de support. Certains constructeurs comme Stratasys proposent un kit de nettoyage pour les impressions FDM : la pièce est immergée dans un bac qui est une sorte de lave-vaisselle pour objets fraîchement imprimés.

Avec une imprimante de type MakerBot, l'objet devra être dégagé de son matériau de support, de nature filandreuse. Pour cette opération, il est recommandé d'utiliser un simple cutter si la trame est très légère, ou de plonger l'objet dans un bain d'eau mélangée à de la soude (produit disponible dans n'importe quelle grande surface) afin de dissoudre ce matériau de support.

Sur les imprimantes à polymérisation comme le modèle Objet30 Pro, la pièce sortira de la machine avec son matériau de support, à savoir une sorte de gélatine, qui se révèle facile à enlever pour peu d'être équipé du bon matériel. Le système Waterjet propulse ainsi de l'eau à très forte pression sur l'objet fabriqué, ce qui permet de le nettoyer en quelques minutes seulement.

Dans tous les cas, cette phase de nettoyage est primordiale, car les pièces imprimées devront être aussi propres que possible pour recevoir leur finition.



Pièce en résine sortant du bac d'impression : entourée du gel de support (à l'arrière-plan) et après nettoyage par Waterjet (au premier plan). (Source : KiwiMill)

La solidification de la pièce

Dans certains cas, l'objet devra être solidifié après impression. Si ce n'est pas nécessaire en stéréolithographie, FDM et frittage laser (sauf pour le métal), cette étape est obligatoire pour toutes les impressions polychromes réalisées sur des imprimantes Z Corporation/3D Systems. Pour solidifier ce type d'impression, trois traitements sont possibles.

- La pièce est plongée quelques secondes dans un bain de cyanoacrylate.
- La pièce est enduite d'une résine époxy qui pénètre par infiltration dans ses pores, lui conférant de meilleures propriétés mécaniques. Ce type de traitement est plus délicat à réaliser.
- La pièce est simplement infiltrée d'eau à l'aide d'un spray, ce qui permet aussi de la nettoyer. Elle sera toutefois nettement moins solide qu'avec les deux méthodes précédentes. Cette solution est donc utile dans les cas d'urgence (présentation rapide, démonstration d'impression 3D au cours d'un événement...).

Les pièces réalisées par frittage laser de métal doivent également subir une solidification, qui consiste cette fois à les passer dans un four. La chaleur fait disparaître le liant, puis elle entraîne la fusion des particules d'acier, sans pour autant faire fondre l'objet lui-même. Le résultat est une pièce en métal poreux, granuleuse au toucher, se prêtant mal au polissage et bien plus légère que son équivalent en métal classique.

MATÉRIAU D'INFILTRATION	QUALITÉS MÉCANIQUES
Eau	Objet plus fragile et cassant qu'avec les autres solutions
Cyanoacrylate	Bonnes
Résine époxy	Excellent

L'air contenu dans cette pièce est ensuite remplacé par du métal, par exemple du bronze liquide. Pour cela, elle est chauffée une nouvelle fois et plongée dans un bain de métal liquide qui pénètre l'objet par capillarité. La pièce obtenue est en métal composite dense, dont les propriétés physiques correspondent à celles des matériaux utilisés. C'est cette pièce qui pourra être par la suite patinée, polie ou vieillie.

La préparation de la pièce

Avant d'appliquer la finition, il est absolument nécessaire de préparer la pièce afin de la rendre la plus propre et la plus lisse possible. En effet, même une impression 3D de grande précision présente de légères irrégularités, surtout si elle comporte beaucoup de courbures.

Lorsqu'une pièce vient d'être imprimée, elle est généralement poreuse. Aussi est-il vivement recommandé de la dégraisser, puis d'attendre une nuit avant de lui faire subir tout autre traitement. Ce dégraissage doit être aussi effectué avant chaque nouvelle étape de la finition (masticage, peinture...). En effet, dès vous touchez un objet, un léger dépôt gras apparaît dessus, provoquant à terme un décollage de la finition. Il faut donc bien avoir le réflexe de dégraisser la pièce lors de chaque manipulation à main nue. Pour cela, il existe plusieurs méthodes. La plus simple consiste à la frotter avec une brosse à dents et du produit vaisselle, puis à la rincer soigneusement et à la laisser sécher complètement.

L'eau et les traces sont en effet les deux ennemis d'une finition parfaite. Soyez patient et attendez toujours que votre pièce soit complètement sèche avant de passer à l'étape suivante. Pour accélérer le séchage, vous pouvez la placer à côté d'un radiateur (à une température de 35 °C environ) ou dans un courant d'air. En revanche, évitez le sèche-cheveux, car il peut provoquer des déformations dues à une chaleur excessive.

LE PONÇAGE

La préparation de la pièce passe d'abord par une phase de ponçage qui permet de lisser la surface. Cette étape est indispensable mais délicate, car il faut atténuer les stries dues à l'impression tout en n'enlevant pas trop de matière, afin de bien conserver la précision des angles et des détails. Sur les pièces très fines, le ponçage doit idéalement se limiter à une seule épaisseur de couche, environ 28 µm pour une impression en résine ou 100 µm pour une impression par frittage laser, par exemple.

Pour les pièces de grande taille ou comportant de larges zones planes, il est recommandé de s'équiper d'une petite ponceuse à main, disponible dans les magasins de modélisme. La marque Proxxon propose notamment de petits modèles qui permettent de travailler l'objet en détail. Pour les pièces plus fines nécessitant un grand niveau de détail, un petit outil polissoir semblable à celui des dentistes sera le mieux adapté.

La phase de ponçage comporte plusieurs étapes qui doivent toutes être réalisées avec minutie. La première consiste à enlever la matière en excédent. Commencez avec un grain de 240, puis passez à un de 320, par exemple. Puis utilisez un grain de 500, suivi d'un de 600. Avec ce dernier, il ne s'agit plus d'enlever de la matière mais plutôt d'adoucir les effets de texture. Cette méthode de ponçage par grains successifs permet d'aller plus vite pour un meilleur résultat. En effet, si vous commencez d'emblée avec un grain de 600, il vous serait quasiment impossible d'enlever la matière et d'obtenir un rendu lisse. Enfin, terminez le ponçage avec un papier de verre lubrifié à l'eau, car des stries peuvent apparaître si vous employez un papier de verre sec.

Selon son matériau et sa forme, la pièce sera plus ou moins facile à poncer. Le polyamide et l'ABS sont ainsi plus difficiles à travailler que la résine ou le matériau composite de Z Corporation. De même, un objet de petite taille et aux formes complexes demandera plus d'expérience et de dextérité.

Dans le cas d'une impression par dépôt de filament fondu, la zone de contact entre la pièce et le matériau de support peut prendre un aspect givré au sortir de l'impression. Pour supprimer cet effet, il suffit de frotter la zone concernée avec une brosse en fibre de verre ou un papier de verre très fin (grain de 800 à 1 000). La paille de fer très fine permet également d'enlever une petite marque ou une irrégularité. Toutefois, il n'est pas toujours possible de poncer entièrement une pièce, notamment lorsqu'elle comporte des formes imbriquées et complexes ou des zones très fragiles.

Le ponçage professionnel

La plupart des services d'impression 3D en ligne proposent de prendre en charge la phase de ponçage pour des objets réalisés en polyamide. Ces derniers sont alors placés dans un bac rempli de petits cailloux et vibrant à haute fréquence : les pièces sont peu à peu adoucies et les angles arrondis. Cette technique est adaptée aux objets qui ne comportent pas de parties fragiles.

LE POLISSAGE

Les impressions réalisées en ABS ou en PLA sur des imprimantes 3D à dépôt de filament fondu laissent apparaître les couches de fabrication. Si certains apprécient ce résultat brut à l'esthétique particulière, d'autres optent pour un polissage.

La technique utilisée par de nombreux particuliers consiste à plonger la pièce dans un bol rempli d'acétone liquide. Mais le résultat demeure imparfait, car le procédé a tendance à créer des traces blanches sur l'objet... Il est aussi possible de brosser ce dernier avec un mélange contenant de l'acétone, mais attention aux éventuelles éclaboussures.

D'autres makers préfèrent utiliser l'acétone vaporisée. La pièce imprimée est alors placée dans une jarre en verre au-dessus d'une plaque chauffante. Une cuiller d'acétone en poudre chauffée dans la jarre à 110 °C permet d'obtenir un objet parfaitement lisse. Mais cette technique, réservée au bricoleur aguerri, présente quelques dangers : risque d'inflammation et vapeurs toxiques.



Comparaison des états de finition d'une pièce imprimée sur une RepRap.
(Source : Austin Wilson et Neil Underwood, Fablocker)

Une jeune entreprise a tenté de résoudre ce problème autrement, en créant deux produits lancés avec succès via une campagne de crowdfunding. Ressemblant à un gros stylo, le Makeraser est un outil doté d'un embout imbibé d'acétone, qui permet de polir ou de supprimer certaines parties d'un objet imprimé en PLA ou en ABS. Il est aussi capable de coller plusieurs pièces entre elles, de boucher des petits trous d'impression pour rendre l'objet imperméable et d'éviter à la première couche d'impression de se recourber ou se déformer. Ses cofondateurs, Christopher LoBello et JF Brandon, sont également à l'origine de Makelastic, une solution liquide permettant de rendre flexibles les impressions PLA et ABS.



Le Makeraser, stylo polisseur d'impressions 3D, avec sa raclette métallique associée.
(Source : Christopher LoBello et JF Brandon)

LE MASTICAGE

Selon le matériau d'impression, les phases de ponçage et de polissage sont souvent suivies d'un masticage, qui sert à boucher les zones irrégulières et à unifier la pièce avant le dépôt de l'apprêt de charge. Ce traitement permet en outre aux produits qui seront déposés par la suite de mieux « accrocher ». Pour obtenir un objet sans aucune imperfection, il est souvent nécessaire d'effectuer plusieurs allers-retours entre le ponçage et le masticage.

L'étape de masticage est indispensable pour l'ABS et le polyamide, car ce sont deux matériaux qui accrochent très mal (c'est pourquoi la résine est mieux adaptée pour un laquage). Il faut les couvrir à plusieurs reprises d'apprêt de charge pour pouvoir les travailler, même si parfois ce n'est pas suffisant pour obtenir un résultat parfait. Utilisez des bombes d'accroche plastique (comme celles utilisées pour le PVC), disponibles dans les magasins de bricolage. Pour l'ABS, un mastic polyester standard, comme celui de la marque Sintofer, est recommandé. S'il s'agit d'un objet en résine dont l'un des coins est abîmé, ce mastic peut aussi servir.

Le mastic à pulvériser en spray, disponible dans les boutiques de modélisme, est plus facile à manipuler que celui s'étalant au moyen d'une spatule. Dans ce cas, il faut employer le mastic en fine couche et poncer/remastiquer plusieurs fois.

Niveaux d'accroche des trois principaux matériaux plastiques d'impression 3D.

MATÉRIAU	NIVEAU D'ACCROCHE	REMARQUES
Résine	Bon	Facile à poncer et bonne accroche de l'apprêt de charge.
ABS	Moyen	Un masticage avant ponçage est préconisé. Plusieurs allers-retours sont généralement nécessaires.
Polyamide	Mauvais	Tendance à s'effilocher au ponçage. L'apprêt de charge est souvent indispensable.

LE DÉPÔT D'APPRÊT DE CHARGE

Le dépôt d'apprêt de charge est une étape chronophage, mais souvent nécessaire pour assurer la bonne tenue de la finition de la pièce. Cette sorte de sous-couche permet en effet de renforcer l'étanchéité du modèle et donc d'améliorer sa résistance sur le long terme. L'apprêt de charge est une matière très couvrante, généralement de couleur blanche ou dans des tons gris. Mais même s'il est d'un beau blanc, il doit toujours être recouvert afin que les pièces ne s'abîment pas et vieillissent bien.

Cette phase demande beaucoup de patience. En particulier, le temps de séchage doit être impérativement respecté, en plaçant l'objet dans une pièce à température ambiante dans laquelle l'air circule. À noter que le polyamide nécessite de nombreuses couches d'apprêt avant de pouvoir être enduit de peinture, car il est difficile à retoucher. Là encore, il est souvent recommandé d'alterner ponçage et apprêt de charge, jusqu'à l'obtention d'une belle surface.

Vidéo sur l'apprêt de charge
à l'adresse :
<http://bit.ly/videoAppret>



La finition de la pièce

Une fois l'objet bien lisse, il est prêt à recevoir la finition choisie, en le plaçant autant que possible en suspension afin d'éviter toute irrégularité sur les éventuelles zones d'appui. S'il comporte deux faces, il est recommandé d'appliquer la finition en un seul passage, pour s'affranchir du risque de chevauchement des couches.

La meilleure façon de travailler la pièce est donc de l'accrocher ou de la suspendre. Dans certains cas, il est aussi possible de la percer, de préférence dans son socle, ou d'utiliser un système à vis pour la maintenir en hauteur. Elle ne doit pas être posée directement sur une table mais au moins 30 cm au-dessus, par l'intermédiaire d'une tige par exemple ; sinon, les poussières qui remontent pourraient la salir. Plus il y a d'air libre autour de l'objet, mieux c'est.

Plusieurs types de finitions sont envisageables selon le résultat souhaité : peinture, plaquage, flocage... Le plaquage or, argent, bronze ou platine est une finition complexe, réalisée presque exclusivement par des professionnels spécialisés, car la technique est délicate et les équipements sont coûteux.

LA PEINTURE

La peinture acrylique est préférable à la peinture glycéro, car elle jaunit moins au fil du temps, ce qui est très appréciable pour les teintes blanches ou claires. Elle est en outre plus facile à entretenir et meilleure pour l'environnement.

Il est vivement conseillé de privilégier la peinture mate, car son aspect atténue les imperfections et masque les petites irrégularités qui peuvent survenir durant la phase de finition. La peinture brillante, au contraire, reflète la lumière, rendant les défauts (comme une simple rayure) très visibles.



Retouche et laquage satiné sur un objet imprimé par une imprimante Objet30 Desktop. (Conception : Julien Faure – Impression et réalisation : Workandprogress)

Par ailleurs, il faut veiller à choisir une peinture compatible avec l'apprêt de charge, donc de la même marque. Car même si les dénominations d'un produit sont les mêmes d'un fabricant à l'autre, leur composition chimique diffère souvent. En cas d'incompatibilité, apprêt de charge et peinture réagissent, cette dernière n'accrochant pas bien sur l'objet.

En règle générale, deux couches de peinture sont nécessaires. Mais il vaut mieux en passer plusieurs fines sur la pièce, qu'une seule épaisse. L'usage de l'aérosol est recommandé, car le pinceau s'avère plus délicat à manipuler. En outre, la peinture en spray garantit un dépôt de matière plus régulier et réduit fortement les risques de traces.

Là encore, il est important de bien respecter les temps de séchage entre chaque couche. Si la peinture n'a pas eu le temps de sécher et que des défauts sont apparus, vous devrez à nouveau poncer l'ensemble de la pièce et tout recommencer...

La peinture est la seule finition qu'un particulier peut réaliser avec succès. Mais il faut savoir qu'un résultat de qualité professionnelle ne s'obtient pas dès le premier essai. Pour acquérir de l'expérience, mieux vaut s'entraîner au préalable sur un échantillon de démonstration ou sur un objet de moindre valeur.



Maquette de train en résine, peinte à la main après dépôt d'apprêt de charge. Ce matériau est le plus utilisé en modélisme, car il peut recevoir une finition très précise. (Source : DotSan)

LES AUTRES FINITIONS

Mis à part la peinture, les autres finitions s'avèrent difficilement réalisables chez soi, mais elles sont en revanche proposées par certains services en ligne d'impression 3D.

La teinture

La teinture est une technique alternative à la peinture pour les modèles en polyamide et en résine. Elle est particulièrement efficace sur les objets aux formes complexes, dont il serait difficile d'atteindre toutes les zones avec un spray. Une fois nettoyée, la pièce est plongée dans un bain de pigments colorés, où elle doit rester au moins 20 min pour être bien imprégnée de la teinture. La couleur entre alors par les pores de la surface de l'objet, mais non en profondeur. Ce dernier est ensuite séché, prêt à l'emploi. Toutes les nuances de teinture sont disponibles, mais il faut procéder à une combinaison manuelle des teintes, qui peut varier d'une pièce à l'autre.

L'émaillage

Traditionnellement utilisé dans la fabrication des céramiques, l'émaillage est également employé en impression 3D. Le procédé requiert plusieurs étapes. Après la phase d'impression, qui peut être réalisée en matériau composite sur une imprimante Z Corporation/3D Systems par exemple, la pièce fait ensuite l'objet d'un post-traitement permettant de la rendre réfractaire. Puis elle subit un émaillage classique réalisé par coulage ou au pistolet.



Vases et tasses imprimés en 3D en attente d'être émaillés, conçus par le studio NoDesign. (Source : Sculpteo)



Le même modèle de vase, après émaillage. (Source : Sculpteo)

Le plaquage en métal précieux

Ce type de finition peut être réalisé sous vide, ou bien à l'aide d'un bain dans lequel la pièce est plongée avant d'être séchée. Dans le cas d'un bain d'argent, par exemple, l'objet ressortira entièrement noir. Il sera ensuite poli pour faire apparaître le plaquage. Selon la forme de la pièce, certaines zones resteront donc légèrement noires. Certains services d'impression en ligne comme Sculpteo proposent une finition or ou argent.



Pièce imprimée en résine et plaquée en argent. (Source : Sculpteo)

Le flocage

Ce type de finition consiste à appliquer des fibres textiles sur la pièce, lui conférant un aspect doux au toucher, comme du velours. Pour cela, l'objet doit d'abord être entièrement recouvert d'une matière adhésive. Le flocage lui est ensuite appliqué, venant se coller sur la surface. L'énergie électrostatique est utilisée pour que toutes les fibres encollées prennent la même direction, assurant l'effet de velours final. Ce genre de finition est notamment proposé sur le polyamide par le service en ligne d'impression 3D i.materialise.

La photo-impression

Le service en ligne d'impression 3D Sculpteo propose un post-traitement permettant de faire apparaître la photo de son choix sur la surface de l'objet imprimé. Cette image n'est pas apposée sur la pièce mais intégrée dans la matière elle-même.



Photo-impression sur une figurine réalisée avec l'application 123D Creature d'Autodesk et imprimée en 3D par Sculpteo. (Source : Autodesk)

Le vieillissement de la pièce

Après avoir longtemps servi au prototypage, l'impression 3D s'oriente de plus en plus vers la fabrication de produits finis. Mais jusqu'à présent, les matériaux les plus utilisés dans ce domaine ne se prêtent pas très bien à une conservation de longue durée.

Ainsi, les objets imprimés en plastique risquent de se déformer avec le temps, tandis que les pièces fabriquées en matériaux composites de Z Corporation résistent mal aux chocs et se révèlent très cassantes. Quant aux objets réalisés par fabrication additive de métal, ils connaissent les problématiques classiques de vieillissement liées à ce matériau : oxydation (avec le bronze) et rouille (avec l'acier). Il est donc recommandé d'éviter les environnements humides et d'appliquer régulièrement des traitements adaptés.

Que faire en cas de déformation ?

Avec le temps, certains objets imprimés en 3D peuvent se déformer, en particulier ceux en résine, dont les zones les plus fines ont tendance à s'affaïsset très légèrement. Heureusement, il existe un procédé pour rétablir leur forme initiale, mais il est difficile à maîtriser et ne donne pas toujours le résultat escompté, si bien qu'il faut le considérer comme un dernier recours avant de se séparer de l'objet. Il consiste à placer d'abord la pièce dans une eau très chaude pour la ramollir, puis à lui faire reprendre sa forme initiale en la maintenant pendant toute la durée du refroidissement. Mais attention, il est conseillé d'effectuer des tests au préalable pour déterminer à quelle température le matériau ramollit et comment il réagit.

PARTIE 3

APPLICATIONS ET PERSPECTIVES

L'impression semble promise à un bel avenir, en fournissant de multiples applications aux particuliers et aux entreprises.

Elle risque même de bouleverser complètement notre système de production actuel : la troisième révolution industrielle est en marche...

L'IMPRESSION 3D POUR LES PARTICULIERS

Grâce à l'impression 3D, la création d'objets n'est plus réservée aux entreprises, mais fait son entrée chez les particuliers. Les médias se sont emparés du sujet, décrivant un futur proche où chaque foyer deviendrait un centre de fabrication, de recyclage et de créativité. Mais à l'heure actuelle, où en est-on exactement ? Comment avoir accès à cette technologie ? Qu'est-il possible d'imprimer en 3D chez soi ? Où se procurer des fichiers d'objets ? Y a-t-il des droits de reproduction sur ces modèles ? On constate en tout cas qu'une nouvelle forme d'économie se met en place chez ces amateurs d'impression 3D, dont certains deviennent des artisans 2.0, faisant fi des intermédiaires comme le fabricant et le distributeur.

Comment imprimer en 3D ?

Pour imprimer en 3D, il faut une imprimante. Jusqu'à peu, ces machines, réservées à des milieux très spécialisés, coûtaient plusieurs centaines de milliers d'euros. Aujourd'hui, il est possible de s'offrir sa propre imprimante pour moins de 400 €, alors pourquoi s'en priver ?

Qui plus est, les particuliers peuvent même accéder aux services d'une imprimante 3D sans devoir l'acquérir. Deux solutions s'offrent à eux :

- utiliser un service en ligne d'impression 3D, qui possède généralement d'excellentes imprimantes professionnelles. Il suffit alors de lui envoyer son fichier 3D et il se charge du reste ;
- se rendre physiquement dans un lieu mettant à disposition des imprimantes 3D : Fab Labs, hackerspaces, etc. On peut généralement y bénéficier de l'aide d'un expert du domaine.

LES IMPRIMANTES 3D PERSONNELLES

Pour les particuliers qui souhaitent se mettre à l'impression 3D, la solution la plus naturelle consiste à faire l'achat d'une imprimante personnelle. Désormais, il existe de nombreux modèles à des prix abordables (entre 250 et 2 000 €) et qui baissent de mois en mois. Ces machines, qui exploitent le plus souvent la technique FDM, sont suffisamment performantes pour réaliser toutes sortes d'objets. L'une des imprimantes personnelles les moins chères est la Printrbot Simple, en kit à monter soi-même, à 250 € environ. La version déjà assemblée coûte 325 €.

La plupart du temps, il est plus simple de commander directement son imprimante à partir du site du constructeur. Mais pour certaines marques, il peut être plus intéressant de passer par leurs distributeurs officiels en raison des services qu'ils proposent : transport et dédouanement, formation, SAV et support technique francophone. Les imprimantes 3D soulevant généralement de nombreuses questions, ces avantages sont très appréciables.

LES SERVICES EN LIGNE

Il existe de nombreux services en ligne d'impression 3D, certains réservés aux professionnels, d'autres s'adressant à un public beaucoup plus large. Proposant une gamme complète de matériaux, ces derniers simplifient au maximum les complications liées à l'export de fichiers et prennent entièrement en charge la phase d'impression grâce à un parc de machines professionnelles. En outre, ils offrent aussi souvent un accompagnement et des conseils pratiques. Voici une petite présentation des quatre principaux services grand public.

Sculpteo

Sculpteo est un service en ligne d'impression 3D établi en France, avec notamment une usine dans les Pyrénées. Fondée en 2009 par Clément Moreau, Éric Carreel et Jacques Lewiner, cette entreprise propose un large choix de matériaux et de services autour de l'impression 3D : boutiques en ligne exportables, applications web et mobiles pour customiser et imprimer des objets, ateliers en ligne de customisation et scans 3D.

Shapeways

Shapeways est souvent présenté comme le plus gros service en ligne d'impression 3D pour les particuliers aux États-Unis. Fondée en 2007 par Peter Weijmarshausen, Robert Schouwenburg et Marleen Vogelaar, ayant tous trois travaillé au sein de Royal Philips Electronics aux Pays-Bas, cette société est désormais basée à New York. Selon Shapeways, plus d'un million d'objets ont été créés depuis la création du service.

i.materialise

i.materialise est le service en ligne d'impression 3D de Materialise, un acteur important de la fabrication additive basé à Leuven en Belgique. Il permet d'accéder à un vaste parc de machines et propose une grande variété de matériaux, dont même du titane.

Ponoko

Ponoko a été l'une des premières entreprises à imaginer un service en ligne de prototypage rapide. Créée en 2007 en Nouvelle-Zélande, elle proposait à ses débuts des services de découpe laser à la demande, puis l'impression 3D est venue compléter son offre. Il est donc possible de combiner plusieurs types de fabrications et de matériaux lors d'une même commande.

LES LIEUX DE FABRICATION

Pour imprimer en 3D ses objets, une autre alternative consiste à se rendre dans un espace équipé de machines et ouvert au public. Parfois qualifiés d'« usines de quartier », ces lieux de fabrication se multiplient depuis quelques années. De tailles très variées, ils répondent à des noms divers : Fab Labs, hackerspaces, media spaces... Une liste des principaux espaces en France se trouve dans l'annexe A de l'ouvrage.

Ces lieux associatifs permettent d'éviter l'investissement dans une imprimante, mais surtout de bénéficier des conseils et de l'accueil d'une communauté de pairs. En effet, ils regroupent généralement des passionnés qui s'entraident et n'hésitent pas à partager leur savoir-faire. Si vous êtes un amateur en quête d'informations, un indépendant ou un créateur qui souhaite avoir accès à de meilleurs outils de prototypage, voire produire en petite série, ces espaces de création pourraient bien répondre à vos besoins.

Les Fab Labs

Les Fab Labs (*Fabrication Laboratories*, laboratoires de fabrication) sont des espaces de fabrication ouverts à tous, équipés d'un ensemble de machines à commande numérique. Outre des imprimantes 3D, on y trouve des machines à découpe laser ou vinyle, des fraiseuses, etc., ainsi que des outils (fers à souder, pinces) et du matériel d'électronique. Ces lieux de création sont réunis sous un label mis en place depuis 2001 à l'initiative de Neil Gershenfeld du MIT. En France, leur nombre croît de mois en mois, et il en existe maintenant dans de nombreuses régions, aussi bien à la ville qu'à la campagne. Citons par exemple le FacLab, situé près de Paris, ou Artilect à Toulouse.

Les hackerspaces

Les hackerspaces sont des espaces très libres réunissant des personnes venues de tous horizons, qui se passionnent pour les technologies, le hacking et la sécurité informatique. Ils se présentent généralement comme des lieux d'expérimentation, où les projets créés ont rarement un objectif commercial. Le partage des connaissances, la vie de la communauté, la performance technique et la sensibilisation aux problématiques sociétales liées au numérique sont mis en avant. En région parisienne, ces hackerspaces ont pour noms le tmp/lab, le LOOP, La Paillasse ou encore l'Électrolab.

Les media spaces

De nombreuses associations, souvent ancrées dans des territoires locaux, proposent des ateliers de création, ainsi que des formations autour de l'impression 3D et de l'électronique open source (Arduino). Citons par exemple l'association PiNG située à Nantes.

Des événements liés à l'impression 3D sont parfois organisés par ces communautés (week-end dédié au montage d'une RepRap, par exemple). Depuis 2012, Sculpteo a ainsi lancé une rencontre régulière à Paris, baptisée « 3D Printing Paris Meetup », qui permet à chacun de découvrir des objets imprimés, de montrer ses créations et de rencontrer d'autres passionnés.

Quels objets imprimer en 3D ?

Avec une imprimante 3D personnelle, les particuliers peuvent fabriquer toutes sortes de choses : outils, vaisselle, bijoux, figurines, jouets... Jusque-là consommateurs passifs, ils ont désormais un rôle à jouer dans la conception et la fabrication d'objets. En leur permettant de réaliser des pièces uniques, personnalisées, copiées, réparées ou détournées, l'impression 3D les invite à se réapproprier le quotidien.

Ces nouvelles pratiques s'inscrivent souvent dans un souci de collaboration et de partage. En effet, un certain nombre de fichiers d'objets sont mis en ligne sous licence libre par la communauté, ce qui contribue grandement au développement de l'impression 3D personnelle.

Photomaton 3D

Studio de design basé à Tokyo, Omote 3D a conçu une sorte de Photomaton 3D éphémère qui a fonctionné durant deux mois. Après s'y être fait scanner de la tête aux pieds, chaque participant s'est vu offrir une figurine à son effigie, d'un réalisme confondant. Depuis, d'autres jeunes entreprises se sont également lancées sur ce créneau. Ainsi, Twinkind a ouvert à Berlin un studio du même genre, où l'impression est réalisée en multicolore par 3DP sur une machine X60. En France, l'entreprise Digiteyezer s'est spécialisée dans l'installation de Photomaton 3D en magasins. Sa cabine EASYTwin est une bulle en plastique dans laquelle l'utilisateur vient mettre sa tête. Elle est équipée de neuf webcams qui prennent simultanément une photo du sujet sous tous les angles. Les images sont alors envoyées à un ordinateur qui reconstruit le visage et produit un modèle 3D qui est ensuite customisé et envoyé à l'impression.



Figurines imprimées en 3D par Twinkind. (Source : Twinkind)

DES OBJETS PERSONNELS

Les figurines de jeux vidéo ou de personnages réels, les jouets (jeux de briques et de construction, voitures miniatures...), les coques de téléphone et les objets de décoration font partie des pièces les plus imprimées par les particuliers, même si leur fabrication implique souvent un important travail de modélisation en amont.

Les passionnés de modélisme sont également de plus en plus nombreux à se tourner vers l'impression 3D. Ils ont d'ailleurs été parmi les premiers amateurs à utiliser cette technologie pour leur usage personnel, qui leur permet de réaliser leurs propres maquettes d'avions, de trains (voir image page 129), etc.

De Minecraft au monde réel

Mélant construction et aventure, Minecraft est un célèbre jeu vidéo où les joueurs évoluent dans un monde virtuel, construit entièrement à partir de blocs qu'il faut détruire, transformer et reconstruire. Grâce au logiciel open source Mineways, il est possible d'isoler un élément de construction du jeu pour le convertir en fichier 3D imprimable sur une imprimante 3D. La grande communauté fédérée par Minecraft s'en réjouit.



Une impression 3D représentative de l'univers de Minecraft.

(Source : Sterling Babcock et Eric Haines [Mineways])

DES OBJETS UTILES

L'impression 3D pour les particuliers ne se cantonne pas à la création de figurines, loin s'en faut. Une foule d'objets utiles sont imprimés en 3D : adaptateurs, boucles de ceinture, boîtiers, tubes, socles, pommeaux de douche, tournevis, etc. La qualité des imprimantes actuelles permet désormais de réaliser des pièces finies et utilisables, et non plus simplement des prototypes.



Un embout d'arrosoir et un presse-citron, tous deux imprimés en 3D. [Source : Edmo et Walter sur Thingiverse]

Pour se rendre compte de la diversité des modèles désormais disponibles à l'impression, il suffit d'aller sur un site de partage de fichiers 3D comme Thingiverse. On y trouve de tout : crochets, bacs à glaçons, supports de téléphones, vaisselle, bijoux... et même des pièces d'imprimantes 3D ! Du superflu et de l'inventif donc, mais également beaucoup d'utilitaire, preuve que l'impression 3D valorise aussi le quotidien. Parmi ces objets, citons le grand succès de l'OpenReflex, un appareil photo open source conçu par le designer français Léo Marius.

Prothèses imprimées en 3D

Emma est une petite fille née avec une maladie qui l'empêche de plier ou de bouger les bras. Les prothèses existantes étant surtout réservées aux adultes, et lourdes de surcroit car en métal, sa famille et les médecins de l'hôpital pour enfants Nemours/Alfred I. duPont ont conçu un modèle imprimé en 3D en ABS. Âgée de deux ans, Emma est maintenant capable de bouger ses bras grâce au soutien d'une structure fabriquée sur mesure. Il suffit en outre de quelques heures pour imprimer de nouvelles prothèses adaptées à sa croissance.

Un autre projet de prothèse imprimée en 3D a fait parler de lui récemment. Robohand est une structure de main articulée, constituée de pièces imprimées en 3D, d'élastiques et de vis. Le modèle initial, partagé sur Thingiverse, est open source et peut être librement adapté aux besoins de chacun, de la construction d'un doigt à un bras complet. Des groupes locaux se sont formés ces derniers mois pour créer des prothèses sur mesure, notamment en Syrie et au Soudan.



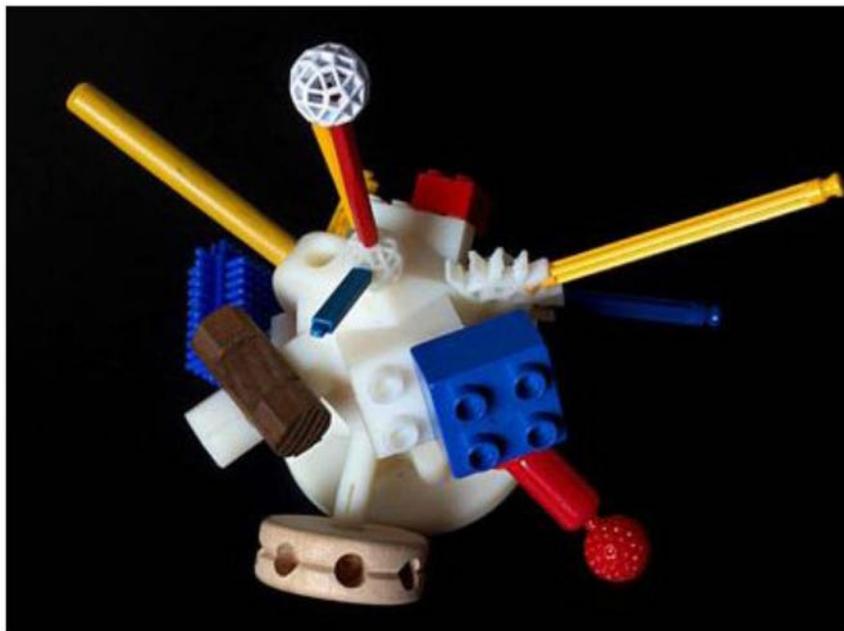
Prothèse de main articulée Robohand imprimée en 3D sur une MakerBot au Soudan.
[Source : Not Impossible Labs]

DES OBJETS RÉPARÉS OU AMÉLIORÉS

L'impression 3D est aussi employée par les particuliers comme un moyen de réparer ou de prolonger la durée de vie des objets du quotidien. Fini le temps de l'obsolescence programmée, où tout appareil cassé était systématiquement jeté à la poubelle et remplacé par un modèle plus récent. Pourquoi ne pas identifier la pièce à l'origine de la panne de sa machine à laver, trouver son fichier 3D sur Internet et la remplacer en l'imprimant soi-même ?

Ainsi, l'une des pièces les plus imprimées chez Sculpteo est celle d'un modèle de cafetière (on ne citera pas la marque !) qui a tendance à tomber en panne un peu rapidement. Un utilisateur a identifié l'élément défaillant, l'a modélisé en 3D et partage désormais le fichier sur sa page Internet, liée au service d'impression en ligne. De nombreux makers préfèrent alors imprimer cette pièce, ce qui coûte une dizaine d'euros, plutôt que d'investir dans une nouvelle machine à café.

L'impression 3D porte donc en elle une promesse d'économie. En permettant à chacun de réparer des appareils cassés ou de remplacer des pièces perdues, elle se pose comme une alternative à la surconsommation, en prônant l'objet durable et écologique. Certaines entreprises de biens de consommation envisagent d'ailleurs de proposer un service de réparation de pièces faisant appel à l'impression 3D.



Le Free Universal Construction Kit. [Source : F.A.T.]

L'imprimante 3D devient ainsi la nouvelle machine fétiche des bricoleurs et de tous ceux qui aiment transformer la matière, non seulement pour réparer mais aussi améliorer les objets existants. Par exemple, le collectif de designers F.A.T. (*Free Art and Technology*), en collaboration avec l'artiste Sy-Lab, a imaginé le Free Universal Construction Kit, un ensemble de pièces permettant de connecter les jeux de construction les plus populaires, dont Lego, Duplo, Tinkertoy et une dizaine d'autres. Les fichiers STL de chaque connecteur sont disponibles sur Internet, prêts à imprimer sur une machine personnelle ou via un service en ligne.

DES OBJETS OUVERTS ET MODIFIABLES

La plupart des objets nés de l'impression 3D personnelle ont la particularité de s'échanger sur Internet sous forme de fichiers : ils peuvent donc circuler entre plusieurs utilisateurs, être modifiés et améliorés sans jamais exister physiquement. Partagés en ligne, ils s'inscrivent dans un courant de pensée en plein essor, l'*open hardware* (matériel libre). Héritier de la pensée du logiciel open source, ce mouvement entend faciliter la création et la circulation des objets dans la société en les plaçant sous licence libre.

Dans ce cadre, les plans, la documentation et toutes les informations permettant de reproduire un objet sont partagés librement. L'utilisateur peut ainsi fabriquer chez lui et en toute légalité une copie de la pièce. Il peut également lui apporter des modifications et partager la documentation correspondante avec les membres de la communauté.

Mais aujourd'hui, les objets imprimés par les particuliers ne sont pas forcément libres et peu d'entre eux sont officiellement sous licence open source. Ce mouvement a pourtant toute son importance et pourrait entraîner, dans un avenir proche, des bouleversements aussi radicaux que ceux qu'a connus l'industrie musicale dans un contexte similaire.

Imprimer une arme à feu chez soi, c'est possible ?

Le partage de fichiers d'objets ne concerne pas que des tasses ou des tétines. Certains utilisateurs d'imprimantes 3D personnelles ont notamment réussi à fabriquer les pièces d'une arme à feu, à partir de fichiers trouvés sur le site Thingiverse. Ainsi, le jeune Américain Cody Wilson s'est rendu célèbre en annonçant la mise en ligne des fichiers open source d'un fusil semi-automatique. L'arme est presque entièrement en plastique, ce qui la rend facilement reproductible et indétectable par un scanner de sécurité...

Elle s'avère toutefois fragile et dangereuse pour son utilisateur, le plastique tendant à se fendre après quelques utilisations. Plus de 100 000 téléchargements ont été effectués à la suite de son annonce, mais le gouvernement américain a depuis interdit la diffusion des fichiers. Toutefois, le service d'impression 3D professionnel Solid Concepts, basé au Texas, a imprimé l'arme à feu sur une imprimante professionnelle de métal, en acier inoxydable 17-4 et Inconel 625. Et plus de 50 coups de feu ont été tirés avec succès...



Arme à feu imprimée en métal par l'entreprise Solid Concepts. (Source : Solid Concepts)

Comment se procurer des fichiers 3D d'objets ?

Si l'impression 3D personnelle s'est popularisée ces dernières années, c'est aussi parce qu'il est de plus en plus facile de créer ou de récupérer des fichiers 3D d'objets. Si le particulier souhaite concevoir sa propre pièce, il peut employer l'un des modeleurs 3D adaptés au grand public ou suivre les pas à pas de certains services en ligne d'impression 3D. Sinon, il peut chercher un modèle 3D prêt à imprimer sur les sites de partage comme Thingiverse.

UN ACCÈS FACILITÉ À LA CRÉATION 3D

Un vaste écosystème se crée peu à peu pour rendre plus accessible la création en 3D pour les particuliers. Ainsi, Sculpteo et Shapeways ont mis en place des pas à pas qui permettent de créer un design en ligne, sans nécessiter aucune connaissance en modélisation. Chez le premier, on peut par exemple customiser une coque d'iPhone ou transformer un logo en un modèle 3D prêt à imprimer. Bien entendu, ces pas à pas adaptés au grand public ne conviennent plus si l'utilisateur a une idée précise de l'objet à imprimer. Dans ce cas, il faut avoir recours à un logiciel de modélisation.

Heureusement, certains modeleurs 3D, souvent utilisables sur Internet, demeurent accessibles pour un amateur. Parmi les plus simples d'emploi, on peut citer 3DTin, SketchUp et 123D. Le logiciel FaceGen permet, quant à lui, de créer un modèle 3D réaliste d'un visage à partir de quelques photos. Aucune connaissance en modélisation n'est requise, l'utilisateur pouvant modifier directement le visage en changeant la couleur de peau, l'âge de l'individu et plus de 150 autres paramètres. Le modèle obtenu peut être ensuite exporté et utilisé pour une impression 3D.

La Kinect, un scanner 3D low cost

La façon la plus facile de modéliser un objet est encore de le scanner. Mais jusqu'à peu, les scanners 3D étaient très coûteux, principalement réservés aux professionnels. Puis est arrivée la Kinect, ce détecteur de mouvement associé à la console de jeu Xbox de Microsoft. PrimeSense, l'entreprise israélienne partenaire à l'origine du capteur, en a partagé les codes et les drivers, permettant à tous les passionnés de lui inventer de nouveaux usages et de l'utiliser notamment comme scanner 3D. Aujourd'hui, Microsoft commercialise même une Kinect pour Windows, tout particulièrement destinée à cette communauté d'amateurs et de jeunes entreprises qui peuvent ainsi créer leurs propres applications.

LES SITES DE PARTAGE DE MODÈLES 3D

Pour ceux que la modélisation rebute, une autre manière de récupérer le modèle 3D d'un objet consiste à aller le chercher sur Internet. Actuellement, il existe plus d'une vingtaine de sites spécialisés dans le partage de designs 3D, Thingiverse étant le plus connu et le plus utilisé de la communauté open source. Attention cependant, tous les fichiers mis à disposition sur ces plates-formes ne sont pas optimisés pour l'impression 3D, loin s'en faut !

Grâce à ces sites, le particulier peut imprimer chez lui toutes sortes d'objets. Les intermédiaires de la chaîne de production disparaissent, en particulier le fabricant et le distributeur. L'objet passe directement du créateur à l'utilisateur final, qui sont parfois la même personne.

Principaux sites de partage de fichiers 3D.

NOM DE LA PLATE-FORME	SPÉCIALITÉS/AVANTAGES	SITE WEB
123D Gallery	Catalogue de modèles 3D réalisés par les utilisateurs des applications 123D d'Autodesk. De nombreux modèles sont à télécharger, mais ils ne sont pas tous adaptés à l'impression 3D.	www.123dapp.com/projects (en anglais)
3DLT	3D Printing Template Marketplace propose à la vente des modèles 3D, à partir de 5 €.	http://3dlt.com (en anglais)
3D Part Source	Catalogue de modèles 3D de pièces industrielles. Glissez-déposez un modèle pour en trouver d'autres de forme similaire.	www.3dpartsource.com (en anglais)
Cubehero	Plate-forme de plus en plus utilisée. C'est la concurrente directe de Thingiverse, axée sur des modèles open source et gratuits partagés entre utilisateurs. Gestion de versions possible.	https://cubehero.com (en anglais)
Cults	L'une des rares plates-formes françaises en activité, Cults propose des modèles à télécharger aussi bien gratuits que payants.	http://fr.cults3d.com (en français)
Forme It	Plate-forme originale axée sur la customisation. Elle propose des modèles payants pour faciliter la création d'objets aux textures et formes intéressantes.	www.formeit.co.uk (en anglais)
GitHub	Grâce à l'intégration d'un visualisateur de modèles 3D, la plate-forme GitHub est en passe de devenir l'un des principaux sites de partage de fichiers .stl open source.	http://github.com (en anglais)
i.materialise	Ce service d'impression permet aux designers de mettre en vente leurs modèles sur le site.	http://i.materialise.com (en anglais)
Instructables	Site de référence du <i>Do It Yourself</i> , Instructables offre beaucoup de tutoriaux autour de l'impression 3D, avec de nombreux modèles open source à télécharger.	http://instructables.com (en anglais)
Kraftwürx	Kraftwürx est un service d'impression 3D proposant aussi des modèles à imprimer à partir de son catalogue.	www.kraftwurx.com (en anglais)
Layer By Layer	Layer By Layer est une place de marché de modèles pour l'impression 3D qui ont la particularité d'être vérifiés et testés avant la vente.	www.layerbylayer.com (en anglais)
My Mini Factory	Place de marché qui privilégie les designs originaux et testés.	www.myminifactory.com (en anglais)
Ponoko	Les utilisateurs du service d'impression 3D Ponoko peuvent mettre en vente leurs propres designs sur le site.	http://ponoko.com (en anglais)
Sculpteo	Les designers ont la possibilité d'ouvrir une boutique pour vendre leurs modèles 3D sur le site.	www.sculpteo.com (en français)
Shapeways	Shapeways est l'une des places de marché les plus populaires pour trouver des modèles 3D, à faire imprimer par le service.	http://shapeways.com (en anglais)
Sketchfab	Sketchfab est un site de partage de modèles 3D réputé pour sa fiabilité et ses options de partage. De nombreux modèles 3D pour l'impression y sont disponibles.	http://sketchfab.com (en anglais)
Thingiverse	Thingiverse est le site de référence pour le partage de modèles 3D. Il compte plusieurs dizaines de milliers de modèles open source gratuits spécialement créés pour l'impression 3D.	www.thingiverse.com (en anglais)

Qu'entreprendre à l'aide de l'impression 3D ?

La fabrication additive a vu naître un nouveau type de particulier-entrepreneur, l'artisan 2.0. Hérité de l'expression « Web 2.0 », cet amateur ou professionnel connecté met en ligne ses designs et participe à la création de modèles. Il apprend, contribue et crée sur les plates-formes où se réunissent les membres de la communauté. Passionné par les nouvelles technologies numériques, il télécharge des fichiers, les imprime en 3D et partage ses modifications avec les autres utilisateurs. Lorsqu'il atteint un niveau d'expertise suffisant et remporte l'adhésion de ses pairs, il cherche alors souvent à monétiser ses créations.

Un véritable écosystème de ces particuliers-entrepreneurs est en train de se développer parmi la communauté des makers. Certains d'entre eux créent une boutique en ligne pour vendre leurs designs, d'autres proposent leur service d'impression 3D à la maison, et quelques-uns vont encore plus loin en créant leur propre imprimante 3D en vue de la distribuer. L'arrivée du financement collaboratif, appelé encore crowdfunding, est un rouage essentiel de cette nouvelle économie initiée par la fabrication additive.

PRÉSENTER OU MONÉTISER SES CRÉATIONS

La plupart des plates-formes de partage de fichiers et des services en ligne d'impression 3D proposent à leurs utilisateurs de publier sur leur site une galerie publique ou privée de leurs modèles, qui sont directement visualisables en 3D dans un navigateur web. Ces galeries constituent une vitrine pour ces créateurs, qui peuvent ainsi se constituer un portfolio, mais également partager leurs fichiers d'objets avec le reste de la communauté, à titre gratuit ou payant.

Tout comme la majorité des sites de partage, les principaux services en ligne d'impression 3D (Shapeways, Sculpteo, i.materialise, Cubify...) offrent donc à leurs utilisateurs la possibilité d'ouvrir une boutique en ligne vendant leurs créations. Prenant en charge la fabrication et la distribution, ces services se rémunèrent grâce à une commission sur chaque vente. Chacun peut y choisir un objet qui lui plaît et demander sa fabrication par le service d'impression 3D. Dans certains cas, et si le designer l'autorise, il est possible de télécharger le modèle 3D, voire de le modifier et de le customiser directement en ligne. Sculpteo propose ainsi un programme de modélisation nommé OpenSCAD, qui s'avère particulièrement adapté à la création de designs génératifs.

Les revenus générés par ces boutiques sont très variables, mais encore faibles pour la plupart. Comme pour un commerce en ligne classique, le simple fait d'ouvrir une boutique ne suffit pas. Toutes les méthodes habituelles doivent être appliquées : mise en ligne régulière de nouveaux produits, mise en avant des objets les plus emblématiques et spectaculaires, relations presse, référencement web. Le succès d'une boutique en ligne d'impression 3D dépendra en grande partie de ces quatre points.

En règle générale, les particuliers qui ouvrent leur boutique en ligne le font sur plusieurs sites à la fois. Il n'est pas rare de voir un même utilisateur créer son espace de vente en ligne sur Shapeways, Sculpteo, Etsy, et pourquoi pas eBay.

Le début d'une success-story ?

Paul Bénet est un jeune modéliste amateur de 16 ans. Passionné de techniques de modélisation et de jeux vidéo, il a ouvert une boutique en ligne sur Sculpteo pour présenter et vendre ses créations, qui sont pour la plupart des références à des jeux célèbres comme Super Mario, Zelda ou Minecraft.

Grâce à cette boutique, Paul Bénet commence à être reconnu pour ses talents de modéliste, tout en gagnant par ailleurs de l'argent sur chaque figurine vendue. Celle intitulée *La Petite Mort*, inspirée d'une bande dessinée de Davy Mourier, a remporté un franc succès : introuvable dans le commerce, elle a été imprimée à plus de 100 exemplaires.



Le modèle de *La Petite Mort*, inspiré de la bande dessinée de Davy Mourier. (Source : Sculpteo)

PROPOSER SON SERVICE D'IMPRESSION 3D À LA MAISON

De nouveaux sites comme 3D Hubs ou MakeXYZ se spécialisent sur la mise en relation entre particuliers possédant une imprimante 3D et particuliers souhaitant imprimer un objet. Le détenteur de l'imprimante détermine lui-même le coût d'une impression, indique son modèle d'imprimante et les matériaux qu'il possède, tandis que le demandeur peut faire une recherche par zone géographique et trouver le service le plus proche de chez lui. 3D Hubs a ainsi ouvert son « hub » parisien mi-2014 (www.3dhubs.com/paris), regroupant plus d'une trentaine de détenteurs d'imprimantes 3D.

La relation se fait de particulier à particulier, à la façon d'un site de covoiturage ou de partage d'appartement. Ce type de service permet de créer un réseau actif d'utilisateurs d'impression 3D, tout en permettant aux particuliers d'arrondir leurs fins de mois.

Il est encore trop tôt pour estimer réellement la portée de ce type de site. La demande en pièces imprimées en 3D est pour l'instant relativement faible, et le marché est déjà bien servi par les services en ligne professionnels, qui offrent une qualité d'impression bien meilleure. Toutefois, il est intéressant pour les particuliers de connaître ces alternatives et de participer à la diffusion de l'impression 3D. Les utilisateurs de machines RepRap sont des habitués de ce système d'entraide à faible coût : ils impriment les pièces à la demande pour aider d'autres utilisateurs à monter leur machine.

COMMERCIALISER SON MODÈLE D'IMPRIMANTE 3D

Le grand intérêt que suscite l'impression 3D personnelle se traduit notamment par la création de nombreux types d'imprimantes. Quasiment chaque semaine, des particuliers commencent à commercialiser leur propre machine, développée à partir des premiers modèles RepRap. Dans un premier temps, ces imprimantes sont souvent proposées à la demande ou en série limitée.

D'ailleurs, ce sont ces mêmes particuliers passionnés qui sont à l'origine du raz-de-marée des modèles d'imprimantes 3D personnelles. Les premières machines MakerBot, Ultimaker, Printrbot ou Solidoodle ont ainsi été créées par des amateurs éclairés, qui ont découvert l'impression 3D « sur le tas ».

L'exemple de Printrbot est emblématique de ces artisans 2.0 devenus entrepreneurs. Brook Drumm est un Californien qui s'était pris de passion pour l'impression 3D en découvrant la couverture de *Make*, un célèbre magazine pour inventeurs, sur laquelle figurait le fondateur de MakerBot, Bre Pettis. Pendant plus d'un an, il a développé son propre modèle d'imprimante dans son garage (comme toujours !) à partir d'une RepRap, en essayant de la rendre la plus simple et la moins chère possible. Pour rencontrer d'autres passionnés d'impression 3D, il a organisé un *meetup* régulier près de chez lui, si bien que certains habitués de l'événement sont devenus contributeurs actifs du projet. Après une campagne sur le site de financement collaboratif Kickstarter, il a lancé l'entreprise Printrbot et commercialise désormais une gamme complète de modèles, qui s'adressent tout particulièrement au monde éducatif et aux débutants.

LANCER UNE CAMPAGNE DE FINANCEMENT COLLABORATIF

Aujourd'hui, les plates-formes de crowdfunding constituent une pièce maîtresse de ce nouvel écosystème, en offrant à ces artisans 2.0 la possibilité de trouver un financement pour mener à bien leur projet. Elles peuvent être ainsi utilisées comme un moyen de tester la demande et l'intérêt pour une idée de commercialisation. Elles permettent également de lancer une première série limitée, puisque les particuliers peuvent acheter à l'avance le produit, avant qu'il soit distribué.

Ces sites jouent un rôle moteur dans la création de nouvelles entreprises liées à l'impression 3D. Ainsi, Printrbot et Formlabs sont deux grands succès du site de crowdfunding Kickstarter, avec respectivement plus de 830 000 dollars et presque 3 millions de dollars levés auprès de particuliers. En France, des plates-formes comme KissKissBankBank et Ulule soutiennent également le lancement de projets dans ce secteur.

Qu'a-t-on le droit d'imprimer en 3D ?

Avec la popularité croissante de l'impression 3D, les questions d'ordre juridique affluent de toutes parts. Un particulier a-t-il le droit de répliquer un objet existant au moyen d'une imprimante 3D ? Peut-il remplacer une pièce défectueuse par une nouvelle imprimée ? Comment peut-il protéger un modèle 3D qu'il a créé ? Autant de questions que Michael Weinberg, spécialiste des technologies émergentes, a soulevées dans un essai publié en novembre 2010, intitulé *It will be awesome if they don't screw it up* (« Ce sera génial s'ils ne cassent pas tout »). Mais bien d'entre elles demeurent encore sans réponse...

De la même façon que l'industrie de la musique s'est retrouvée complètement bouleversée par le partage massif de fichiers MP3 sur Internet, le monde du design et de la fabrication additive industrielle pourrait bien être à son tour au cœur de profondes modifications sur le plan juridique.

CAS D'UNE CRÉATION ORIGINALE

Bien évidemment, l'auteur du modèle 3D d'un objet a pleinement le droit de l'imprimer si cette pièce est une création à part entière. Dans ce cas, celle-ci est automatiquement protégée par le droit d'auteur, puisqu'il s'applique sur toute œuvre, de quelque nature que ce soit, du seul fait de sa création, à condition qu'elle soit originale.

Ces droits d'auteur naissent sans formalité particulière et se terminent 70 ans après le décès de l'auteur. C'est uniquement pour prouver la date de la création d'une œuvre que l'on peut être amené à envoyer une enveloppe Soleau à l'INPI (Institut national de la propriété industrielle) ou à effectuer un dépôt chez un huissier.

Si l'objet imprimé en 3D comporte en outre un dispositif ingénieux pouvant déboucher sur une application industrielle, son inventeur peut déposer, en France, une demande de brevet auprès de l'INPI. La plus grande confidentialité s'impose alors pendant tout le temps de procédure – toute divulgation avant l'obtention du titre ruine la nouveauté et dès lors la brevetabilité –, qui s'avère souvent longue, complexe et coûteuse. En retour, le brevet confère un monopole d'exploitation de 20 ans. Attention, il ne s'applique pas aux créations esthétiques et ornementales.

L'apparence d'un objet peut également être protégée sur le terrain des Dessins (en 2D) et Modèles (en 3D). Cette protection, garantie par dépôt d'un dossier à l'INPI, permet d'obtenir un monopole d'exploitation en France, pour une durée allant jusqu'à 25 ans. Elle peut se doubler d'une protection par le droit d'auteur si la création est originale.

Infractions à éviter

Il arrive fréquemment qu'un créateur d'objets imprimés en 3D transgresse un droit d'auteur ou un brevet sans savoir même qu'il existe. C'est ce qu'on pourrait appeler de l'infraction naïve : son auteur pense créer une pièce originale, qui est en réalité protégée. Mais la bonne foi est inopérante en matière de contrefaçon et ne peut constituer une défense valable.

Qui plus est, si le fichier 3D de cet objet protégé par le droit d'auteur est librement mis à disposition sur un site de partage, l'infraction commise ne sera plus circonscrite à la sphère

du foyer et risque de se démultiplier. D'autres membres de la communauté pourront en effet récupérer ce modèle 3D, l'imprimer, voire l'améliorer, et le partager à leur tour... Par conséquent, il convient de s'assurer que l'objet destiné à être imprimé est bien une création pure !

Les particuliers doivent également veiller à ce que leurs œuvres ne reprennent pas certaines formes caractéristiques d'un produit existant. Ces dernières peuvent en effet faire l'objet d'un dépôt de marque tridimensionnelle, ce qui est le cas de la bouteille de cognac XO de Hennessy, par exemple. Cette protection de 10 ans est renouvelable indéfiniment, même après la fin des droits d'auteur.

Comment protéger le fichier 3D d'un objet ?

La meilleure solution pour faire savoir aux tiers qu'un modèle 3D est protégé est de faire mention du nom de son auteur sur le fichier lui-même ou sur la documentation annexe. La présence du © suivi du nom de l'auteur est la démarche habituellement adoptée.

Il est également utile de se préconstituer la preuve de la création par le dépôt d'une enveloppe Soleau à l'INPI, ou d'un cahier de création auprès d'un huissier, et plus largement de conserver toutes les étapes de la création d'un objet (croquis, ébauches, etc.).

CAS D'UNE COPIE

Si l'objet imprimé en 3D est la copie d'une pièce existante, on peut supposer que cette dernière est a fortiori protégée par le droit d'auteur. Dans ce cas, elle ne peut être reproduite sans autorisation de son auteur ou de ses ayants droit, à moins qu'elle soit sous licence libre. Il convient donc de se rapprocher du titulaire des droits pour obtenir une autorisation de reproduction de l'objet, qui sera payante la plupart du temps. Tout sera alors question de négociation, le barème de rémunération étant totalement libre.

Cela étant, il n'est pas toujours évident de savoir que tel ou tel objet est protégé : c'est le principal inconvénient du droit d'auteur. De même, il est parfois difficile de déterminer qui est le détenteur des droits. Il faut alors procéder à des recherches documentaires auprès des sociétés d'auteur qui peuvent être investies des droits, contacter l'éditeur, le diffuseur, etc.

Comment reproduire par impression 3D un objet physique ?

Pour répliquer par impression 3D un objet existant, il y a deux grandes méthodes. La première consiste à dénicher le modèle 3D de cet objet sur un site de partage de fichiers, comme Thingiverse ou autre. Si ce modèle demeure introuvable, l'autre possibilité est de scanner l'objet physique au moyen d'un scanner 3D, puis de préparer pour l'impression le scan récupéré (voir page 98). Sinon, il reste toujours la solution de modéliser soi-même l'objet en question...

EN CONCLUSION : CRÉEZ !

En matière de reproduction de modèles 3D d'objets, la législation demeure encore très floue. A-t-on le droit de télécharger les plans d'une pièce et de l'imprimer sur son imprimante 3D personnelle ou via un service tiers ? En tout cas, un usage privé non commercial semble plutôt

toléré. En revanche, il est fortement déconseillé de vendre une copie conforme imprimée en 3D d'un objet existant. Par exemple, vendre ses propres Lego fabriqués par une imprimante 3D pourrait entraîner des poursuites de la part du constructeur officiel. La finalité de l'objet imprimé entre donc largement en ligne de compte.

En 2012, le site de téléchargement en peer-to-peer The Pirate Bay permettait à ses utilisateurs de partager des *physibles*, c'est-à-dire des fichiers 3D d'objets, après avoir fait de même pour la musique, les films, les logiciels et les jeux vidéo. Sur son blog, il publiait ce billet :

« Nous pensons que le prochain pas vers la copie va toucher le passage des objets digitaux aux objets physiques. [...] Nous pensons que les machines comme les imprimantes 3D ou les scanners sont simplement une première étape. Dans un futur proche, vous serez capable d'imprimer les pièces de votre voiture. Vous pourrez télécharger vos baskets d'ici 20 ans. [...] Les avantages pour la société seront énormes. Plus besoin d'acheminer d'immenses quantités de produits à travers le monde. Nous serons capables d'imprimer de la nourriture pour les gens qui ont faim. Nous pourrons partager non seulement la recette mais aussi le repas complet. »

Certains comparent ce physible à l'ADN de l'objet, ou à son code source. En ayant accès à toutes les informations relatives au design et à la construction de la pièce, l'utilisateur pourrait alors décoder ce code et l'améliorer, à la manière d'un logiciel libre.

CHAPITRE 9

L'IMPRESSION 3D POUR LES PROFESSIONNELS

Dans l'industrie, l'impression 3D est susceptible de modifier en profondeur le prototypage et la fabrication des produits, en accélérant leur cycle de développement, en permettant la customisation de masse et en autorisant des formes de plus en plus précises et complexes. Architecture, bijouterie, aéronautique, chirurgie, mode, art, éducation, etc., quasiment tous les secteurs sont touchés par cette révolution technologique. En voici un tour d'horizon qui tient compte des dernières avancées.

Architecture

Depuis ses débuts, l'impression 3D est très utilisée en architecture, principalement pour fabriquer des maquettes. Par rapport aux techniques de maquettage traditionnelles, les avantages sont multiples : gain de temps, grande fidélité par rapport au design originel (au micron près) et solidité d'ensemble, les maquettes classiques étant généralement très fragiles. Seul inconvénient, cette méthode est parfois plus coûteuse.



Maquette imprimée en 3D du nouveau stade de Stockholm, le Tele2 Arena. (Source : Agence WeDo)

La réalisation de maquettes par impression 3D prend tout son sens pour les bâtiments de grande envergure qui présentent beaucoup de détails. Ainsi, celle du nouveau stade de Stockholm a été imprimée en 3D au moyen d'une imprimante X60. En charge du projet, l'agence WeDo a réalisé une maquette en coupe, comportant 7 400 sièges larges de 4 mm chacun. Pour cette impression a été choisi un matériau composite blanc, même si la machine est capable de réaliser des pièces polychromes. Cette maquette de grande taille ($1 \times 1 \text{ m}^2$) a aidé la ville à promouvoir cette nouvelle installation sportive de 30 000 places, qui a ouvert ses portes en juillet 2013.

Outre des maquettes d'architecture, certaines imprimantes 3D sont même capables d'imprimer des bâtiments à taille réelle, quasiment en totalité. Citons par exemple celle de Contour Crafting, une entreprise à but humanitaire née à l'*University of Southern California*. Reposant sur le procédé d'impression à dépôt de filament fondu, cette machine est un système robotisé de très grande taille posé sur des rails, qui fonctionne de la même façon qu'une imprimante FDM classique, mais en déposant du béton. Cette technique devrait permettre de construire des habitations de façon automatisée en un temps record : selon l'entreprise, 20 heures suffiraient pour imprimer une maison de deux étages.



Représentation miniature de l'imprimante 3D de Contour Crafting. (Source : Contour Crafting)

De son côté, l'entreprise chinoise Windu a annoncé avoir imprimé dix maisons en 24 heures, grâce à une imprimante 3D de grande taille qui dépose du béton recyclé couche par couche. Chaque maison est construite par pan successif. Le coût de fabrication d'une maison reviendrait à moins de 4 000 €.



Maison imprimée en 3D par l'entreprise chinoise Windu. (Source : Windu)

La machine D-Shape est un autre type d'imprimante 3D à béton, qui permet de créer des structures en pierre. Le procédé, s'apparentant à la stéréolithographie, utilise du sable et un liant. L'objectif d'Enrico Dini, son inventeur, est de donner aux architectes la possibilité de construire un monument le plus simplement possible. Un projet de maison imprimée en 3D grâce à la D-Shape a été lancé par Universe Architecture, une agence d'architecture hollandaise. Le bâtiment, en forme de ruban de Möbius, est désormais prêt techniquement à être produit. Les commandes sont ouvertes.

La D-Shape dans un tout autre registre...

L'imprimante D-Shape est aussi utilisée pour reconstruire des barrières de corail le long des côtes. La technique associée permet de créer des formes organiques facilitant le repeuplement de l'habitat marin. Poissons et coraux viennent se nicher dans les cavités de ces grandes structures imprimées en 3D.



Corail imprimé en 3D. (Source : Enrico Dini)

Autre projet d'habitat imprimé en 3D, ProtoHouse a été présenté à Londres en octobre 2012 lors de la première édition du 3D Printshow. Imaginé par Softkill, un cabinet d'architectes britannique, cet espace évolue en fonction des usages et des points de tension. Ainsi, les pièces changent d'aspect selon les besoins, et le matériau se renforce dans les zones les plus demandeuses. Ce squelette de maison futuriste est pour l'instant de l'ordre du concept, mais donne un aperçu de l'adaptabilité et de la flexibilité permises par l'impression 3D.



ProtoHouse, prototype de maison imprimé en 3D. (Source : Julia Kubisty)

Art

Certains artistes ont eu un véritable coup de foudre pour l'impression 3D et en ont fait leur spécialité. Souvent technophiles, ils viennent généralement du monde de la 3D, car cette forme d'art exige des connaissances en modélisation numérique et en fabrication assistée par ordinateur. Le domaine étant encore relativement vierge, ils peuvent s'adonner à toutes les expérimentations possibles.

Certes, l'impression 3D pourrait apparaître de prime abord comme un outil de fabrication industriel, peu propice au travail artistique. La fabrication est tout de même réalisée par une machine commandée par ordinateur ! Qui plus est, les pièces peuvent être imprimées à la suite, sans nécessiter la main de l'homme.

Pourtant, l'impression 3D fait appel à un ensemble de pratiques et de choix créatifs qui en font un média à part entière. La machine n'est là que pour faire naître une vision : elle donne corps à l'imagination de l'artiste, à son travail, mais ne le remplace pas. Le créateur reste maître du concept, du design préparatoire, de la modélisation, des post-traitements et finitions et, dans certains cas, des découpes ou assemblages à réaliser une fois l'objet imprimé. Par ailleurs, il faut savoir que chaque pièce est unique : contrairement aux apparences, il existera toujours de subtiles différences d'une impression à l'autre, et ce d'autant plus si les œuvres sont en métal.

Attardons-nous sur la méthode de travail de l'artiste Bathsheba, qui utilise l'impression 3D pour réaliser des sculptures en métal aux formes complexes et symétriques, inspirées de modèles mathématiques. Elle commence d'abord par chercher de nouvelles formes à partir de crayonnés, puis elle fabrique manuellement des modèles à l'aide de cure-dents ou de papier mâché. Ceux-ci étant de structure complexe (entrelacs, anneaux...), il n'est pas possible de les scanner de façon optimale pour l'impression 3D. C'est pourquoi elle les modélise sur ordinateur, à l'aide du logiciel Rhinoceros.



Sculpture *Antipot* de Bathsheba Grossman, imprimée en métal. (Source : Bathsheba Grossman)

Elle travaille ensuite avec un prestataire d'impression 3D qui réalise le modèle souhaité, au format et avec les matériaux choisis par l'artiste. Le plus souvent, ses sculptures sont fabriquées par impression directe de métal, au moyen d'une imprimante ExOne dont le laser vient fusionner la poudre d'acier inoxydable. Bathsheba Grossman préfère que sur ses œuvres apparaissent les différentes couches, dont l'épaisseur varie entre 0,10 et 0,17 mm. Enfin, elle procède elle-même à toute une série de post-traitements qui donnent à la sculpture un aspect fini, lisse et brillant, et qui la protègent de la rouille.

Design

Ces expérimentations de formes et de matières permises par l'impression 3D intéressent les sculpteurs, mais aussi les designers. Ces derniers réinventent ainsi les objets de tous les jours (tasse, porte-savon, vide-poche, porte-clés, pied de lampe, poignée de porte...) en exploitant le formidable potentiel de la fabrication additive. Les modèles sont souvent créés d'une seule pièce à partir d'un unique matériau, avec des formes organiques, courbes et complexes.

Bien évidemment, les designers utilisent prioritairement l'impression 3D à des fins de prototypage. Elle leur offre la possibilité de tester leurs idées rapidement et au plus près du résultat final souhaité. Et maintenant que le prix des imprimantes 3D de bureau a chuté, ils n'ont plus d'excuses pour s'en priver ! D'ailleurs, les FormLabs, MakerBot, Afinia et autres Ultimaker sont avant tout des succès commerciaux auprès des designers. On peut donc s'attendre à une montée en puissance de la quantité, de la qualité et de l'inventivité des prototypes réalisés.

Plus novatrice, l'impression 3D tend aussi à se positionner comme une solution de design à la demande. Le projet Blizzident illustre cette tendance. Pour 200 € environ, il est possible de se procurer une brosse à dents sur mesure, imprimée en 3D à partir d'un scan de sa dentition. Le modèle, qui ressemble fort à un dentier, est équipé de petites brosses : en le mordant pendant six secondes, les dents sont nettoyées !



Un modèle de brosse à dents sur mesure, imprimé en 3D par Blizzident. (Source : Blizzident)

Le procédé Endless

Dirk Vander Kooij est un designer hollandais qui a développé un procédé appelé Endless, consistant à détourner un robot de chaîne de production en un outil d'impression de meubles. La technique d'impression utilisée est très similaire à celle du dépôt de filament fondu, mais à grande échelle, et le matériau employé est une pâte issue de réfrigérateurs recyclés.

L'une des pièces maîtresses de Dirk Vander Kooij est la *Endless Pulse Low Chair*, une chaise de 80 centimètres de hauteur aux couleurs flamboyantes et dont les couches d'impression sont volontairement très visibles. Chaque pièce est produite d'un seul tenant, sans assemblage.



Le robot Endless en pleine impression.
(Source : Dirk Vander Kooij)



La *Endless Pulse Low Chair*. (Source : Dirk Vander Kooij)

Cinéma

L'industrie du cinéma fait appel à l'impression 3D depuis longtemps, principalement pour la fabrication d'accessoires, de costumes et de décors. La plupart des tenues emblématiques des héros des *blockbusters* américains de ces dernières années ont été ainsi réalisées grâce à cette technologie.

Citons par exemple le film *Iron Man 2*, pour lequel la compagnie de production Legacy Effects a imprimé le costume du héros, une armure complète s'adaptant parfaitement à la physionomie de l'acteur principal, Robert Downey Jr. Le corps du comédien a d'abord été scanné, puis les éléments de costume ont été



Le gant sur mesure d'Iron Man.
(Source : Objet)

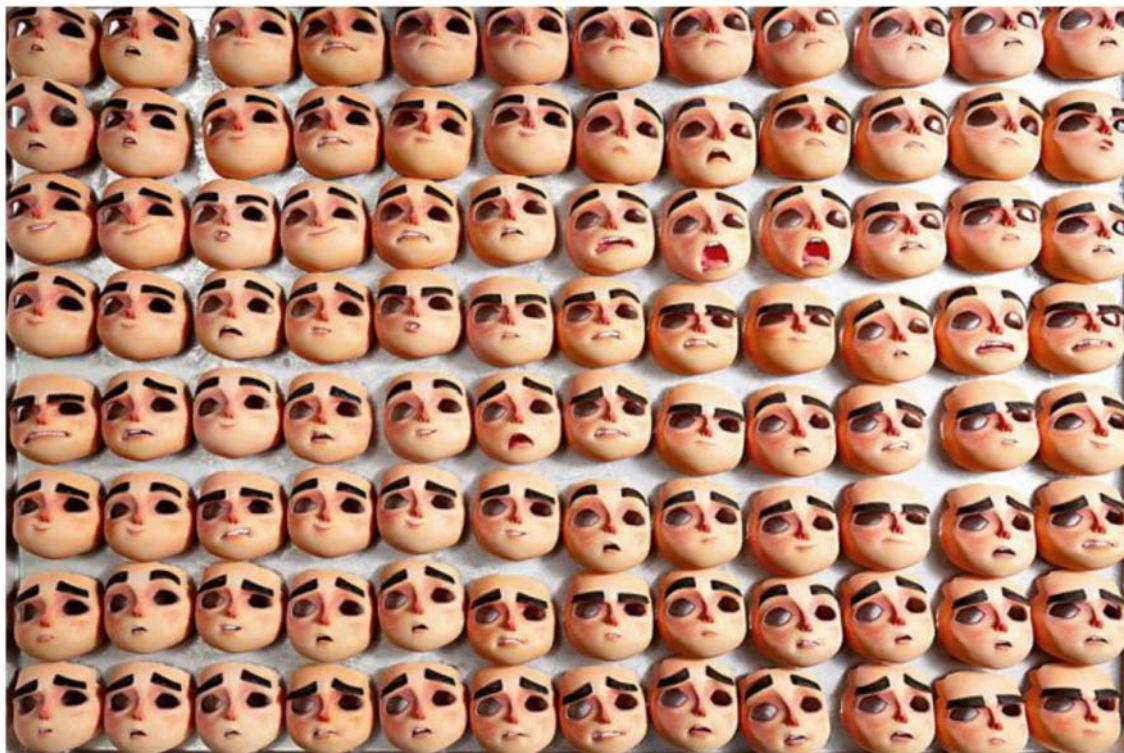
réalisés à partir d'une imprimante 3D Objet Eden. La résine a enfin été peinte pour reproduire fidèlement l'aspect du métal.

Dans le dernier James Bond, *Skyfall*, la célèbre Aston Martin DB5 a aussi été entièrement imprimée en 3D. Trois modèles ont été réalisés au tiers de la taille réelle grâce aux imprimantes grand format Voxeljet, avant d'être peints. Chaque modèle contient 18 pièces imprimées séparément, puis assemblées. Même si les machines auraient pu imprimer la voiture d'un seul tenant, il a été décidé d'assembler des pièces séparées pour permettre d'ouvrir le toit, les portes, etc.



L'Aston Martin DB5 imprimée en 3D du film *Skyfall*.
(Source : PropShop Modelmakers)

Le cinéma d'animation est aussi de plus en plus friand d'impression 3D, notamment pour fabriquer des éléments répétitifs. Le film *Les Pirates !* en est un bon exemple, avec pas moins de 8 000 bouches imprimées, dont 257 versions de la bouche du capitaine. De même, pour réaliser le film *L'étrange pouvoir de Norman*, le studio d'animation Laika a utilisé massivement l'impression 3D et plus particulièrement les imprimantes X60 de 3D Systems pour imprimer en matériau composite multicouleur toutes les expressions des visages des principaux personnages.



Multiples variantes imprimées en 3D du visage de Norman pour le film *L'étrange pouvoir de Norman*.
(Source : Chris Mueller)

Patrimoine

Saviez-vous que certains musées utilisent le scan 3D et l'impression 3D pour conserver, restaurer et exposer leurs pièces ? Le Smithsonian, grand musée de Washington, a été ainsi l'un des premiers à s'emparer de ces technologies pour la conservation de ses œuvres. Depuis plusieurs années, l'équipe a commencé à numériser les pièces du catalogue pour les rendre enfin visibles, sous forme digitale, auprès du grand public. Car à ce jour, seulement 1 % des collections est exposé dans les galeries de l'institution... L'objectif est de numériser 10 % du catalogue, qui comporte 137 millions de pièces ! Pour cela, les sculptures sont entièrement scannées en 3D : devenues fichiers, elles peuvent être regardées, partagées... et imprimées en 3D. Le MoMa (*Museum of Modern Art*) de New York a adopté une démarche similaire en se faisant partenaire de MakerBot.



Modèle 3D d'une reconstitution de squelette de mammouth, visible sur la plate-forme Smithsonian X 3D Explorer.
(Source : <http://3d.si.edu>)

Mode

Créateurs et stylistes se sont aussi emparés de l'impression 3D pour créer de nouvelles formes, que ce soit au stade du prototypage ou de la fabrication. Les grandes marques d'habillement et de chaussures l'utilisent ainsi depuis des années pour prototyper leurs nouveaux produits : par exemple, les laboratoires de développement de Nike, Adidas et Reebok sont tous équipés d'imprimantes 3D professionnelles. L'impression 3D permettant de créer d'une seule pièce des tissages complexes et flexibles, certains couturiers l'emploient également pour imaginer des grilles, des motifs en creux et d'autres « formes impossibles ».

Chez les créateurs indépendants, la fabrication additive n'est plus employée à des fins de communication, mais bien pour concevoir et fabriquer des pièces. Faisant appel aux services en ligne d'impression 3D, ces stylistes d'un genre nouveau ouvrent leur boutique sur

Internet et vendent leurs créations à des prix accessibles. Etsy, la plate-forme la plus populaire pour ce type de pièces, regorge ainsi de ces créateurs technophiles, qui présentent des formes toujours plus complexes, adaptées à une grande variété de matériaux.



Parure Quixotic Divinity conçue par l'artiste Joshua Harker et imprimée en 3D par SLS. (Source : Joshua Harker)

Mentionnons par exemple les deux designers de Nervous System, qui ont été parmi les premiers à tout miser sur l'impression 3D et ses qualités de customisation, en créant des formes organiques à la demande. Le studio Wearable Planter conçoit pour sa part des bijoux-vases : un collier se transforme en cactus, une bague en lierre. Le tout est imprimé en polyamide blanc poli et vendu directement sur la boutique en ligne du créateur. Quant à Sarah C. Awad et Dhemerae Ford, les deux designers derrière TheLaserGirls, elles proposent des faux ongles imprimés en 3D à partir de polyamide teinté.



Faux ongles conçus par TheLaserGirls et imprimés en 3D en polyamide teinté. (Source : TheLaserGirls)

Comme elle est mieux adaptée à une production à l'unité, l'impression 3D constitue un formidable outil de personnalisation dans le secteur de la mode. Certains designers poussent même plus loin le concept du sur-mesure, en proposant une expérience de customisation complète pour le consommateur.

Ainsi, Continuum Fashion est un label de mode et un laboratoire d'expérimentation, fondé par les designers Mary Huang et Jenna Fizel, qui considèrent leur travail comme du *fashion design for the digital age* (de la mode pour l'ère numérique). Parmi leurs réalisations, mentionnons la chaussure Strvct imprimée en 3D en nylon, entièrement paramétrable (forme, hauteur du talon, couleur) et réalisable sur mesure, ou encore le maillot de bain N12, également en nylon, premier vêtement imprimé en 3D accessible au grand public, dont la structure permet de conserver une certaine flexibilité grâce à la juxtaposition de milliers de pastilles circulaires reliées entre elles par des fils souples.



La Struct, une chaussure expérimentale fabriquée par le studio Continuum Fashion. (Source : Continuum Fashion)

Si l'impression 3D permet de customiser à volonté des chaussures, elle offre aussi la possibilité de concevoir des modèles épousant parfaitement la forme du pied. Dans ce domaine, citons l'initiative du Fashion Digital Studio, une agence de design et de conseil londonienne spécialisée dans la fabrication digitale appliquée à la mode. Volker Junior, l'un de ses designers, a en effet imaginé un modèle de chaussure imprimé en 3D qui s'adapte avec précision à la morphologie du client. Le pied est scanné, puis le modèle est réalisé en tenant compte de la forme de la voûte plantaire et d'autres paramètres. Cette solution permettrait de réduire sensiblement l'inconfort provoqué par certaines paires de chaussures inadaptées.



Prototype de chaussure de sport imprimé en 3D. (Source : Luc Fusaro)

Mentionnons également le prototype du designer français Luc Fusaro, une chaussure de sport sur mesure imprimée en 3D, qui améliore la vitesse de course tout en réduisant le risque de blessure.

Bijouterie

La bijouterie de luxe est l'un des domaines qui a adopté le plus massivement et le plus rapidement l'impression 3D pour la fabrication de ses pièces. Cette technologie répond en effet parfaitement aux problématiques propres à cette industrie, à savoir un besoin de créer des pièces de très grande qualité, avec une finesse de détail exceptionnelle, reproductible sur de petites séries et comportant souvent des formes uniques et personnalisées.

Aujourd'hui, la plupart des bijoutiers de luxe utilisent le procédé d'impression 3D à cire perdue (voir image page 81), qui permet de réaliser des moules parfaitement conformes au design de la pièce, tout en réduisant considérablement le temps de fabrication. Cette impression constitue la première étape avant la fabrication de la pièce elle-même.

De jeunes créateurs utilisent également l'impression à cire perdue ou l'impression directe de métal pour réaliser des pièces en argent, or ou platine. Le collectif de designers américains Nervous System s'est ainsi spécialisé dans la création de designs génératifs de bijoux. Leurs bagues, bracelets et colliers reproduisent des formes organiques complexes, qui peuvent être modifiées directement par le client grâce à une interface en ligne.



Bague en argent imprimée à cire perdue. (Source : Nervous System, www.n-e-r-v-o-u-s.com)

Industrie lourde

L'industrie lourde est un secteur qui évolue lentement, où les investissements en prototypage, outillage et matériel de production sont parmi les plus élevés au monde. Chaque transformation de la chaîne de production peut donc avoir des conséquences vitales. Dans ce contexte, la fabrication additive apparaît peu à peu comme une solution bien adaptée aux secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile et de la défense militaire.

AÉROSPATIALE

L'impression 3D est désormais une technologie très employée en aéronautique pour réaliser des pièces complexes, principalement en métal, utilisées en particulier dans les moteurs d'avions. Soumises à de très fortes pressions et à de grands changements de température, elles doivent être aussi légères que possible afin d'économiser le combustible. Elles sont extrêmement coûteuses à réaliser : ainsi, un injecteur de carburant fabriqué par General Electric nécessitait de souder une vingtaine de pièces entre elles. Mais depuis l'arrivée de la fabrication additive en métal, General Electric a pu revoir sa manière de le produire : désormais imprimé en 3D avec de la poudre de cobalt-chrome, cet injecteur est mieux optimisé, moins onéreux à réaliser et plus léger.

Fin 2011, le spécialiste de la fabrication additive Terry Wohlers estimait à 20 000 le nombre de pièces imprimées en 3D présentes dans les avions Boeing commerciaux et militaires. Sur le modèle 787 Dreamliner, plus de 30 types de pièces sont produits avec ce procédé. Pour l'un des directeurs de la stratégie de production chez Boeing, l'impression 3D représente la « méthode ultime de fabrication ».

EADS, le concurrent européen de Boeing, est lui aussi grand utilisateur de la fabrication additive. Les pièces en titane de ses satellites sont déjà fabriquées au moyen de cette technologie et le constructeur prévoit d'employer l'impression 3D de façon massive sur ses avions Airbus. À terme, il pourrait être envisageable d'imprimer entièrement des appareils !

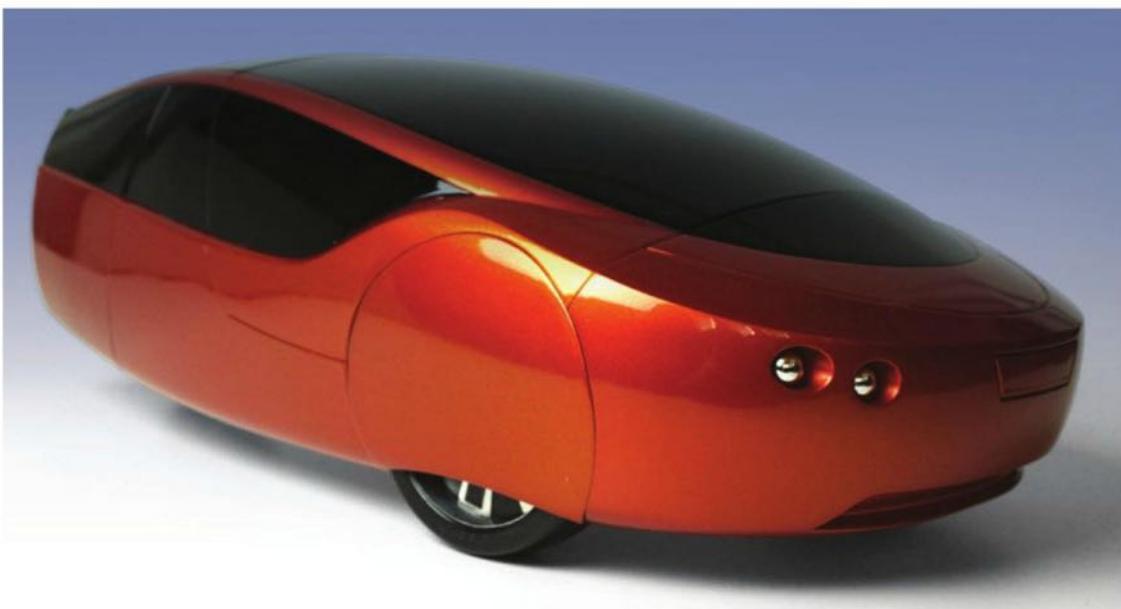
En astronautique, les opportunités offertes par l'impression 3D sont également très prometteuses. Une équipe de la NASA, en collaboration avec la start-up Made in Space, est en train de mettre au point une imprimante 3D capable d'imprimer dans l'espace. Les astronautes en mission pourraient alors imprimer directement dans leur navette les outils et pièces de rechange nécessaires. Les problèmes logistiques seraient considérablement réduits et les limitations dues à des avaries de matériel pourraient être levées. Ces imprimantes n'étant pas sensibles à la gravité, les conditions d'impression seraient très différentes de celles sur Terre. Le premier modèle devrait être envoyé sur la Station spatiale internationale en octobre 2014.

AUTOMOBILE

L'industrie automobile est en recherche perpétuelle de solutions nouvelles pour prototyper et construire plus rapidement. La chaîne de production est en effet l'un des grands freins au design : la fabrication des pièces est standardisée et tout changement implique d'importants investissements en robotique, si bien que les modèles de véhicules évoluent lentement. Une porte de voiture, par exemple, produite à partir d'une feuille d'aluminium pressée, nécessite

l'utilisation d'une machine coûtant environ 10 millions de dollars. Si un ingénieur propose un meilleur design pour cette porte, il devra attendre 10 ans en moyenne avant de la voir intégrée. Contrainte par les moyens de production, l'innovation dans ce secteur est donc très lente.

L'impression 3D constituerait une solution à ce problème, puisqu'elle permet d'éviter la standardisation de masse. La voiture Urbee, premier véhicule imprimé en 3D, en est une démonstration. Initié en 2009 par le passionné d'automobile et d'écologie Jim Kor, créateur de la société Kor Ecologic, ce projet consiste à imprimer en 3D l'ensemble de la voiture, de la carrosserie à l'intérieur en passant par les pièces mécaniques. Son objectif est de proposer un véhicule qui soit plus économique en énergie – lors de la phase de production comme à l'usage – et qui puisse être fabriqué à la demande. Le constructeur d'imprimantes Stratasys, partenaire du projet, a déjà imprimé avec succès la carrosserie du premier modèle Urbee. L'équipe s'attelle désormais à un nouveau prototype, Urbee 2, qui devrait permettre d'imprimer l'intérieur de la voiture. Une campagne de financement participatif a été lancée, avec un besoin estimé à près de 800 000 €.



La voiture Urbee imprimée en 3D. (Source : Kor Ecologic)

DÉFENSE

Dans le domaine de la défense militaire, l'impression 3D est depuis longtemps utilisée pour produire certaines pièces nécessitant solidité et fiabilité, notamment des montures de caméras installées à l'extérieur de tanks et devant résister aux chocs. L'armée américaine commence aussi à y faire appel sur le terrain : lorsqu'une pièce casse pendant une opération militaire, il est désormais possible d'en imprimer une nouvelle, sans avoir recours à l'extérieur.

Le TDF (*Trainer Development Flight*) est un centre de formation de l'armée de l'air américaine basé au Texas, où l'impression 3D est employée pour produire des répliques de pièces d'avions manipulées durant l'entraînement. Complémentaire des techniques de fabrication traditionnelles, ce procédé a permis de réduire drastiquement les coûts de reproduction de ces pièces. Le gouvernement américain a ainsi estimé à plus de 3,8 millions de dollars les économies réalisées entre 2004 et 2009.

L'impression 3D est aussi utilisée en intelligence militaire pour aider à la création de modèles topographiques, qui nécessitaient auparavant plusieurs semaines de fabrication. Ainsi, après l'ouragan Katrina qui a dévasté la Nouvelle-Orléans en 2005, des ingénieurs de l'armée de Terre américaine s'en sont servis pour analyser l'évolution des dommages causés sur la ville. Produites à intervalles de quelques heures, des maquettes réduites du terrain en 3D ont été réalisées à partir des données géospatiales récupérées au fur et à mesure. Elles ont permis d'estimer le niveau des glissements de terrain et l'état des habitations, afin d'aider les secours à se répartir dans les zones les plus touchées.

Électronique

Société spécialisée dans l'impression d'électronique, Optomec travaille avec l'entreprise Stratasys au développement d'une technologie qui permettrait de déposer du matériel conducteur sur une pièce durant son impression 3D. Le premier projet concerné est un véhicule nommé UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), dans lequel sera directement imprimée la matière conductrice, remplaçant les fils électriques traditionnels généralement positionnés après l'impression. Grâce à ce procédé, l'engin sera plus léger et plus rapide à fabriquer.

Sur ce projet, Optomec utilise un procédé d'impression 3D appelé Aerosol Jet Deposition, qui permet d'imprimer de l'électronique sur presque n'importe quel type de support. Radicalement différente de l'impression par jet d'encre, cette technique exploite l'aérodynamique pour délivrer une combinaison sur mesure de liquides et de nanomatériaux. Un post-traitement est ensuite possible en faisant appel à des méthodes de frittage laser extrêmement précises. Les impressions résultant de ce procédé peuvent être d'une finesse de 10 µm, avec une épaisseur de couche d'une dizaine de nanomètres à quelques microns. Avec cette nouvelle technologie, il devient possible d'imprimer des applications électroniques fonctionnelles sur de grandes surfaces ou en revêtement.

Toujours dans ce domaine, citons également l'initiative de Xerox, l'entreprise américaine spécialisée en équipement de bureau, qui a développé une encre en argent permettant d'imprimer des circuits électroniques flexibles, directement intégrés à des matériaux comme le plastique ou le tissu.

Agroalimentaire

L'une des applications les plus surprenantes de l'impression 3D concerne le secteur de l'agroalimentaire. Des recherches très sérieuses sont actuellement menées dans ce domaine, tout particulièrement sur le procédé d'impression FDM qui s'avère le plus commode pour fabriquer des aliments. La matière est alors insérée dans une



Avion miniature imprimé en fromage sur une imprimante Fab@Home.
(Source : Fab@Home)

seringue qui vient ensuite déposer la nourriture couche par couche. Dans la plupart des cas, il ne s'agit donc pas de créer de la matière alimentaire avec l'imprimante, mais plutôt de déposer de la nourriture pour former, par exemple, une tranche de viande, un petit gâteau ou un morceau de fromage. En quelque sorte, il s'agit de reconstituer une bouchée solide à partir de matière broyée.

Depuis 2009, une équipe de chercheurs de l'université américaine de Cornell travaille ainsi sur l'imprimante personnelle Fab@Home, capable d'imprimer différents mets qui pourraient presque composer un repas complet : coquilles Saint-Jacques, dinde, fromage ou encore chocolat.

Impression de chocolat

Deux chercheurs de l'université d'Exeter au Royaume-Uni, Dr Liang Hao et Dr Choon Yen Kong, ont mis au point la Choc Creator, première imprimante 3D spécialisée dans l'impression de chocolat et commercialisée en série limitée expérimentale pour 2 400 € environ.

Certaines entreprises vont beaucoup plus loin dans cette démarche. Ainsi, Modern Meadow, une start-up basée dans le Missouri et soutenue financièrement par le cofondateur de PayPal, Peter Thiel, développe actuellement des imprimantes 3D capables d'imprimer du cuir à partir de cellules animales. La prochaine étape annoncée est l'impression de viande *in vitro*, ce qui constituerait une alternative à l'abattage. On se rapproche des avancées en biotechnologie et de la recherche sur l'impression de cellules et de tissus humains.

Vidéo d'une impression de chocolat à l'adresse :
<http://bit.ly/videoChocolat>



Santé

Le domaine de la santé est également concerné par l'impression 3D : fabrication de matériel médical, réalisation de moules dentaires et de prothèses, impression d'implants et d'organes, synthèse de médicaments... Il s'agit d'un secteur majeur pour cette technologie d'avenir.

PROTHÈSES ET AIDES AUDITIVES

La fabrication de prothèses et d'aides auditives est l'un des grands champs d'application de l'impression 3D dans le domaine médical. La dentisterie utilise ainsi des imprimantes

capables de reproduire le moulage exact d'une dent, ou de créer des couronnes ou des bridges s'ajustant parfaitement à la denture du patient. L'entreprise américaine Invisalign est spécialisée dans ce secteur, et plus particulièrement dans la fabrication de bagues dentaires transparentes. Elle a opté pour l'impression 3D, ce qui lui a permis d'optimiser considérablement sa chaîne de production avec plus de 5 millions de bagues produites par an.

L'impression 3D offre également des possibilités sans précédent dans le domaine des prothèses articulaires et externes. Répondant exactement aux besoins de ce secteur, ses avantages sont légion : personnalisation, rapidité de fabrication, réalisation de formes complexes et sur mesure, production à l'unité, matériaux résistants et légers.

Fondateur de l'entreprise Bespoke Innovations rachetée par 3D Systems, le designer américain Scott Summit s'est spécialisé dans la conception de prothèses médicales. Pour chacun de ses patients, il crée une prothèse au design unique, qui s'adapte à sa morphologie mais aussi à sa personnalité. Le résultat est bluffant et élégant, s'apparentant davantage à une sculpture qu'à une prothèse.



Bagues transparentes sur mesure imprimées en 3D par stéréolithographie. (Source : Invisalign)



Prothèse imprimée en 3D. (Source : Bespoke Innovations)

Des prothèses aux plâtres

Le designer Jake Evill a imaginé un logiciel qui permettrait de modéliser un plâtre chirurgical s'adaptant parfaitement au membre cassé du patient. Imprimé en 3D, ce plâtre serait plus léger, lavable, aéré et recyclable.



Le membre est passé au rayon X pour identifier la cassure et sa position.

Le membre est scanné en 3D pour déterminer ses dimensions exactes.

Les dimensions et les autres données sont entrées dans l'ordinateur, qui génère le plâtre par impression 3D, en prévoyant des supports pour les zones sensibles.

Étapes de création d'un plâtre imprimé en 3D. (Source : Jake Evill)

Le secteur des aides auditives a lui aussi été bouleversé par l'arrivée de l'impression 3D. La société Ditto, par exemple, a vu sa capacité de production exploser, de 8 appareils par jour à 500 ! Ce passage d'une réalisation manuelle à l'impression 3D a pris deux ans, mais s'est traduit depuis par une forte croissance de l'entreprise. Aujourd'hui, plus de 10 millions d'aides auditives imprimées en 3D sont en circulation dans le monde, selon le cabinet d'analyse ARC.



Aides auditives au sortir de l'impression, utilisant les imprimantes danoises Widex. (Source : Christian Sandström / Disruptive Innovation)

TISSUS HUMAINS, ORGANES, IMPLANTS ET MÉDICAMENTS

Aujourd'hui, les avancées de la science en biotechnologie ont permis l'émergence d'imprimantes 3D capables d'imprimer des tissus humains et même des organes (voir image page 11). Destinée à la recherche pharmaceutique, la machine NovoGen MMX BioPrinter d'Organovo utilise ainsi les cellules vivantes comme matière première, en les injectant dans une structure imprimée où elles peuvent se multiplier. Autodesk, le leader mondial de logiciels de conception 3D, a signé en décembre 2012 un partenariat avec Organovo pour le développement d'un logiciel de CAO dédié au design de tissus organiques pour la recherche médicale.

La fabrication additive sert aussi à imprimer des implants médicaux : depuis 2007, plus de 20 000 ont été ainsi réalisés pour des patients souffrant d'os abîmés. Généralement fabriqués en titane recouvert d'un matériau biocompatible, ils sont mieux acceptés par le corps humain que ceux produits de manière traditionnelle.

Quant à l'entreprise américaine Parabon NanoLabs, elle utilise l'impression 3D nanoscopique pour concevoir de nouveaux médicaments, molécule par molécule, en utilisant les propriétés d'autoassemblage de l'ADN. Les imprimantes employées fonctionnent de pair avec un logiciel informatique spécialement dédié, qui permet de déplacer les molécules par glisser-déposer afin de les agencer selon la disposition souhaitée. Cette technologie permet de réduire considérablement le temps de conception et de test de ces médicaments du futur.

Le chercheur Lee Cronin s'intéresse également à la fabrication de médicaments au moyen de l'impression 3D. En travaillant à partir d'une imprimante personnelle Fab@Home, l'équipe de recherche de l'université de Glasgow a développé un procédé nommé « reactionware », où différentes molécules sont imprimées simultanément avant de réagir chimiquement entre elles. À long terme, ce procédé permettrait de réduire les coûts en limitant le nombre d'intermédiaires, mais aussi de tester de nouvelles combinaisons encore jamais réalisées, pouvant donner naissance à de nouveaux traitements.

Côté open source, les recherches avancent également avec RepBio, une branche de la communauté RepRap qui s'intéresse de près à l'impression de tissus et de cellules organiques.



Implant d'os de hanche conçu par Adler Ortho à partir d'une imprimante 3D EBM métal Arcam. (Source : Arcam, Adler Ortho)

Un implant de mâchoire imprimé en 3D

En juin 2011, une mâchoire imprimée en 3D en titane a été implantée avec succès par le docteur Jules Poukens de l'université d'Hasselt en Belgique sur une patiente de 83 ans. Épousant parfaitement la forme de son crâne, cet implant comporte une multitude de micropores par lesquels les nerfs peuvent passer.

À l'heure actuelle, l'impression 3D est souvent présentée dans les médias comme la solution technique à tous les maux de la Terre. Remettons les choses à leur place : cette technologie n'est souvent qu'en phase de test dans le secteur humanitaire. Mais il faut reconnaître que depuis quelques années, les initiatives locales affluent et beaucoup d'organismes s'intéressent à ce procédé de fabrication.

Le Not Impossible Labs a ainsi monté le projet Daniel au Soudan, en ouvrant un lieu de fabrication numérique équipé d'une imprimante 3D, afin de fabriquer une prothèse pour Daniel Omar, un adolescent qui avait perdu ses avant-bras durant la guerre (voir image page 140). L'équipe a ensuite formé les habitants à utiliser les outils de cet espace, à modéliser un fichier et à imprimer les prothèses à leur tour. Aujourd'hui, un bras articulé est imprimé par semaine en moyenne depuis le départ de l'organisation.

Autre belle application de l'impression 3D, le projet iLab // Haiti a pour origine un groupe de volontaires américains, en partenariat avec l'association KIDmob (qui organise des ateliers très similaires au projet City X évoqué plus haut). Partis à Haïti, ils ont installé plusieurs imprimantes MakerBot dans un centre de ressources local, Haiti Communitere, et ont passé plusieurs mois à former ses membres à la conception assistée par ordinateur et à l'impression 3D. Le lieu de fabrication est désormais sous la responsabilité du premier salarié du projet. Les habitants emploient les machines pour réaliser des pièces utilisables au quotidien, comme des adaptateurs d'embouts ou encore des prothèses.

Éducation

L'impression 3D fait progressivement son entrée dans l'enseignement. Déjà bien présente dans les écoles de design, d'architecture et d'ingénieurs, elle commence à être adoptée dans les collèges et lycées.

Étonnamment, les imprimantes 3D installées dans ces écoles ont été pendant longtemps les mal-aimées de l'atelier. Sous-utilisées, elles s'avéraient trop coûteuses (notamment en raison du consommable) et complexes à manipuler. Les élèves leur préféraient la découpe laser, plus rapide, plus simple et moins chère. Mais l'intérêt croissant du grand public pour l'impression 3D a réveillé peu à peu les vocations. Désormais, les étudiants en design, en arts appliqués et en architecture ont très souvent recours à cette technologie, et dans bien des cas hors les murs. Nombreux sont ceux à devenir membres d'un lieu de fabrication local équipé de machines bon marché, où chacun est là pour apprendre et s'entraider.

Les écoles s'équipent d'imprimantes 3D open source à bas prix, reconnues pour leurs qualités éducatives, comme les RepRap, Printrbot ou FoldaRap. Les élèves les plus jeunes observent ou impriment des pièces, tandis que les plus grands apprennent à les modéliser ou à monter les machines. C'est l'occasion pour eux d'appliquer leurs connaissances acquises en électronique, mécanique et physique.

Visant les jeunes générations, de beaux projets éducatifs internationaux voient le jour autour de l'impression 3D. Ainsi, Libby Falck, fondatrice de City X Project, sillonne le monde avec son

équipe pour organiser des ateliers dans les écoles. Les enfants, de 8 à 10 ans, entrent dans l'univers de City X, une nouvelle planète qui comporte une série de défis à résoudre (accès à l'eau et à la nourriture, lutte contre la pollution, épidémies). Pendant trois jours, ils apprennent à imaginer leur propre solution, à la conceptualiser par ordinateur (en modélisant une pièce avec de la pâte à modeler et le logiciel Tinkercad), puis à l'imprimer en 3D sur une imprimante Cube. L'équipe a déjà organisé 16 ateliers en 2013, aux États-Unis, au Liban et en Hongrie.

Recherche scientifique

Parallèlement, le domaine de la recherche scientifique a aussi adopté l'impression 3D pour la fabrication d'outils sur mesure. Les laboratoires sont en effet grands consommateurs de petit matériel jetable, vendu en petite quantité à des coûts souvent élevés. C'est le cas de celui de biologie expérimentale de l'université américaine UC Davis, dirigé par Jonathan Eiser, rédacteur en chef de la revue *PloS Biology*. Jusqu'ici, l'équipe faisait appel à un prestataire externe pour se procurer des peignes à électrophorèse en plastique, vendus 51 dollars pièce. En utilisant une imprimante Ultimaker installée dans le laboratoire, le coût du peigne est tombé à 0,21 cent l'unité ! Son design est désormais réalisé sur mesure et mieux adapté aux besoins de l'équipe.

À l'université de Californie à San Francisco, le département d'imagerie médicale possède aussi sa propre imprimante 3D, principalement utilisée pour fabriquer des éléments sur mesure de microscope ou pour remplacer temporairement des pièces cassées. Les modèles sont réalisés à l'aide du logiciel Rhinoceros, puis imprimés en résine blanche par un membre de l'équipe de recherche maîtrisant les prérequis techniques. Dans certains cas, les éléments en plastique sont remplacés par des pièces en acier inoxydable, fabriquées par un service en ligne d'impression 3D.

L'IMPRESSION 3D EN FRANCE

L'intérêt pour la fabrication additive en France ne date pas d'hier. Depuis ses débuts, industriels et chercheurs s'intéressent de près à cette technologie. Les principaux acteurs de l'impression 3D sont d'ailleurs réunis au sein de l'Association française de prototypage rapide, créée en 1992 (voir encadré page 191).

Plus récemment, de nouveaux venus sont arrivés dans le monde de la fabrication additive, entrés par la porte de l'impression 3D personnelle et de l'open source. Ces deux univers communiquant encore assez peu, il est difficile d'avoir une vision d'ensemble du paysage français. En voici un panorama, sans prétention d'exhaustivité.

L'écosystème entrepreneurial français

La France est-elle un acteur majeur de la fabrication additive ? Pas encore, malheureusement. Contrairement aux États-Unis, à l'Allemagne ou à la Chine, les constructeurs de systèmes de prototypage rapide y sont très rares. Mais prototypistes et distributeurs tirent davantage leur épingle du jeu, en s'appuyant sur les deux principaux fabricants d'imprimantes que sont 3D Systems et Stratasys.

Pourtant, nombreux sont les projets à émerger autour de l'impression 3D dans l'Hexagone. À l'issue de la parution de la première édition de ce livre, j'ai été contactée par des dizaines de jeunes entrepreneurs qui se lançaient dans ce domaine ou souhaitaient le faire. Arrivée dans l'univers de l'impression 3D grâce aux imprimantes personnelles, cette nouvelle génération vise généralement à démocratiser la fabrication additive pour les particuliers, en offrant des services somme toute classiques : plates-formes de téléchargement de fichiers 3D, impressions à la demande ou vente d'objets imprimés.

Où trouver les entrepreneurs français de l'impression 3D ?

Le site français 3dnatives diffuse un annuaire de l'impression 3D qui recense les entreprises du secteur. Celui de l'Association française de prototypage rapide (www.code80.net/afpr) comporte de nombreuses informations sur les principaux groupes industriels de la fabrication additive.

LES CONSTRUCTEURS

Les constructeurs d'imprimantes 3D en France sont encore rares. L'année 2013 a cependant vu fleurir les initiatives et l'offre s'améliore de mois en mois.

Les constructeurs industriels

En France, peu d'industriels se sont lancés dans la conception de systèmes de fabrication additive, et à ce jour, une seule entreprise est restée française, Phidias Technologies. Dirigée par André-Luc Allanic, ancien fondateur de 3D Optoform (entreprise rachetée par 3D Systems en 2001), et Philippe Hoarau, par ailleurs PDG de Crésilas (voir page 178), cette société a mis au point une technique exclusive utilisant la DLP (*Digital Light Processing*) et construit ses propres machines.

L'entreprise a été rachetée en mai 2013 pour 4,8 millions d'euros par le groupe Gorgé, qui détient désormais 88 % de son capital. Se nommant à présent Prodways, elle a annoncé des ventes s'élevant à 1 million d'euros pour 2012. Le marché qu'elle vise est dans la tranche haute des modèles disponibles, avec des prix variant entre 200 000 et 400 000 €. L'industrie dentaire est le premier débouché.



André-Luc Allanic, cofondateur de Prodways, devant son dernier modèle d'imprimante 3D. (Source : Prodways)

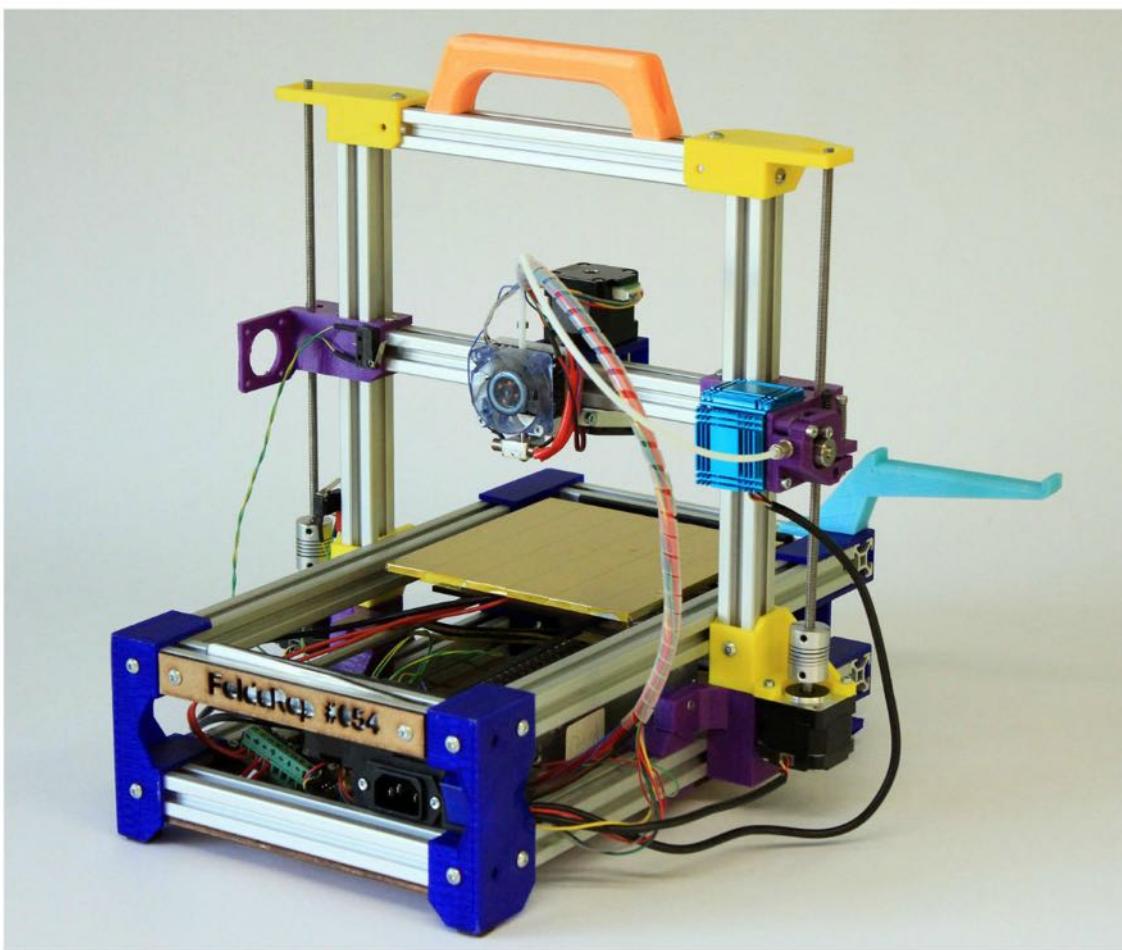
Phenix Systems, longtemps n° 1 des constructeurs français, a été quant à lui racheté par 3D Systems fin 2013, la société étant désormais valorisée à 15 millions d'euros. Fondée en 2000 à Clermont-Ferrand, cette entreprise est spécialisée dans les systèmes à frittage laser de poudre. Plus d'une centaine de machines ont été vendues jusqu'à maintenant, notamment à Michelin, Cartier, Rolex et General Electric. La vente de Phenix Systems s'explique par un repli de son chiffre d'affaires, de 5,9 millions d'euros en 2010 à 3,8 millions en 2012.

Les constructeurs d'imprimantes 3D personnelles

De jeunes fabricants d'imprimantes 3D personnelles apparaissent enfin en France. Leurs machines utilisent toutes le dépôt de filament fondu mais, avec l'expiration des brevets de frittage laser et de stéréolitographie, de nouveaux modèles devraient émerger bientôt.

Ces dernières années, plusieurs jeunes créateurs se sont passionnés pour l'impression 3D personnelle et ont développé leur propre modèle open source.

■ Emmanuel Gilloz est l'un des Français les plus visibles de cette communauté, notamment au sein du réseau Fab Lab lorrain. Designer et inventeur, très actif dans le monde de la fabrication digitale open source, il a cofondé le Nancy Bidouille Construction Club (NYBI) et anime le Fab Lab de l'ENSGSI. Il est à l'origine de la Foldarap, une imprimante 3D open source dérivée du projet RepRap, pliable et transportable. Pour passer du prototype qu'il avait conçu pour lui-même à un modèle utilisable par d'autres, il a mené plusieurs campagnes de crowdfunding, sur les sites Ulule et Goteo, qui ont remporté un franc succès avec plus de 75 000 € récoltés. Ce financement direct lui a permis de lancer la production d'environ 130 Foldarap montées et fabriquées en partie par l'utilisateur final, chacun s'engageant à imprimer les pièces pour la fabrication d'une nouvelle Foldarap. Grâce à cette méthode d'implication directe des utilisateurs finaux, une communauté vivante s'est créée autour du projet, particulièrement en France. Cette imprimante a maintenant son propre forum parmi les forums RepRap.



La Foldarap 2 conçue par Emmanuel Gilloz. (Source : Emmanuel Gilloz)

- DOM (*Digital Object Maker*) est également un projet français d'imprimante 3D open source, initié par deux amis de longue date, Clément Chappert et Julien Deprez. Membres du FacLab, Fab Lab situé à Gennevilliers en région parisienne, ils ont conçu leur propre imprimante à dépôt de filament fondu, puis ont lancé une campagne de crowdfunding réussie sur le site KissKissBankBank. Désormais, ils organisent des ateliers de montage et de formation à l'impression 3D au sein de Fab Labs en France, mais aussi à l'étranger. Ils ont ainsi formé des utilisateurs à Lomé au Togo (au sein du Woelab), ainsi qu'en Palestine.
- Créée par Adrien Grelet, ancien élève de l'IUT de Tours, l'imprimante 3D Tobeca est elle aussi open source et vendue en kit ou assemblée.
- ATC 3D est une jeune entreprise fondée par Loïc Bonfils et Guillaume Bouisson a lancé son premier modèle, l'ATCube Mini, une imprimante personnelle vendue au prix de 949 €.
- Pearl, distributeur d'électronique, propose l'imprimante FreeSculpt EX1-Basic prête à l'emploi à 666,58 €, qui peut être fournie avec les logiciels TurboCAD, TriModo ou TriScatch pour quelques centaines d'euros supplémentaires.
- Zeepro est une start-up française à l'origine de Zim, une imprimante 3D personnelle équipée d'un double extrudeur. Capable d'imprimer plusieurs couleurs simultanément, ce modèle peut aussi utiliser un matériau de support (PVA soluble à l'eau).



L'imprimante 3D Zim de Zeepro. (Source : Zeepro)

- Jeune société basée à Metz, Hive3D a conçu la HiveBot, une imprimante 3D personnelle utilisant du PLA, qui se démarque par son gros volume d'impression (14 litres). Elle n'est pour l'instant disponible qu'à la demande.
- Enfin, GenerID, entreprise rennaise, développe son propre modèle, la CRX-4001, qui n'est pas encore disponible à la vente.

Comparatif des imprimantes 3D françaises.

ENTREPRISE	MODÈLE	VOLUME D'IMPRESSION (JUSQU'À)	MATÉRIAUX D'IMPRESSION	RÉSOLUTION DES COUCHES (JUSQU'À)	POINTS FORTS	PRIX
Foldarap	Foldarap	14 × 14 × 15,5 cm	ABS, PLA	150 microns	Portable, vendue en kit ou assemblée, open source, basse consommation	600 € (en kit)
Zeepro	Zim	15 × 15 × 15 cm	PLA, ABS, PVA	50 microns	Connexion Wi-Fi ou Ethernet, double extrusion, cartouches rechargeables	655 € (prix campagne crowdfunding)
Pearl	FreeSculpt EX1-Basic	22,5 × 14,5 × 15 cm	ABS	150 microns	Boîtier fermé, écran de contrôle	666,58 € HT
Tobeca	Tobeca	20 × 20 × 20 cm	PLA, ABS	100 microns	Vendue en kit ou assemblée, open source	699 € (en kit)
DOOD	Digital Object Maker	20 × 20 × 15 cm	PLA	100 microns	Vendue en kit ou assemblée, open source	700 € (en kit)
ATC 3D	ATCube Mini	15 × 15 × 12 cm	PLA, PVA	100 microns	Boîtier fermé, design coloré	949 € HT
Hive3D	HiveBot	30 cm de diamètre 20 cm de hauteur	PLA	100 microns	Cinématique (type Delta), gros volume d'impression	1 700 € HT
GenerID	CRX-4001	25 × 25 × 25 cm	PLA	100 microns	Rapidité (400 mm/s)	2 499 € HT

LES DISTRIBUTEURS

Aujourd'hui, les distributeurs français de solutions de fabrication additive se répartissent en deux grandes familles correspondant aux deux principaux constructeurs d'imprimantes : ceux qui diffusent les machines de 3D Systems et ceux qui vendent celles de Stratasys. Parmi les premiers, citons 3D Avenir, Creatix3D, 3D Industries, SPEN Systèmes ou encore Kallisto. Côté Stratasys, mentionnons MG2 Systems, CADvision, CKAB et Le FabShop. Tous proposent généralement l'ensemble des gammes disponibles : des imprimantes 3D personnelles (Cube pour 3D Systems, MakerBot pour Stratasys) aux modèles professionnels et spécialisés.

Experts dans leur domaine, ces distributeurs sont généralement à même de conseiller et d'accompagner l'utilisateur dans son achat, surtout s'il s'agit d'une imprimante 3D professionnelle. Mais attention, chacun d'eux n'offre pas nécessairement les mêmes services : certains

acceptent de réaliser quelques modèles à la demande, d'autres montrent uniquement des exemples déjà imprimés. Qui plus est, la mallette est parfois payante.

Notons par ailleurs qu'à côté de ces distributeurs agréés, il existe plusieurs sites spécialisés dans la vente en ligne d'imprimantes 3D (voir page 182).

LES PROTOTYPISTES

Équipés de machines professionnelles de haute précision, les prototypistes peuvent intervenir ponctuellement en tant que prestataires, produisant à la demande des pièces pour des usages très variés : maquettes d'architecture, prototypes fonctionnels, pièces de démonstration, tests de formes, figurines... Les entreprises, cabinets d'architectes, studios de design et écoles font appel à eux car ils possèdent généralement de nombreuses machines, plusieurs types de matériaux, et savent aiguiller le porteur de projet vers la technique la plus adaptée à ses besoins. Experts en production, ils maîtrisent leur parc d'imprimantes de façon à optimiser la rapidité et la qualité des résultats. Les pièces sont la plupart du temps envoyées par colis, directement du site de production au client.

À l'heure actuelle, la France possède un maillage serré de prototypistes spécialisés en fabrication additive. Les acteurs historiques ont vu le jour au milieu des années 1990 et continuent à s'équiper des derniers systèmes d'impression 3D pour répondre aux exigences de leurs clients. Les trois services les plus populaires sont Crésilas, Erpro et Sculpteo : les deux premiers visent essentiellement les professionnels, tandis que le dernier est également ouvert aux amateurs.

- Fondé en 1993, Crésilas est spécialisé dans la réalisation de maquettes et de prototypes par fabrication additive. Il possède 41 machines d'impression 3D professionnelles réparties sur quatre sites en France : Marcoussis, Samazan, Lyon et Fesches-le-Châtel.
- Erpro, lancé en 1997, fait partie lui aussi des anciens de la fabrication additive. L'entreprise travaille aussi bien à la demande de grands groupes industriels français que pour des PME, bureaux d'études, architectes, artistes ou étudiants.
- Sculpteo, qui a débuté ses activités en 2009, offre désormais à ses clients la plupart des matériaux et des techniques de fabrication additive. L'entreprise développe en outre ses propres logiciels et applications mobiles pour faciliter l'envoi et l'impression 3D de fichiers personnalisés.
- Ajoutons à cette liste Impression-3D, anciennement Print Value, qui est un service situé à Paris et créé par Guy de Saint-Just.

À côté de ces quatre grands services d'impression 3D sont apparus ces derniers mois une multitude d'autres petits prestataires, qui s'adressent généralement aux particuliers et s'inspirent plus d'un Sculpteo que d'un Crésilas. Ils demeurent pour l'instant très rudimentaires, à la différence des acteurs majeurs du secteur bien équipés en machines industrielles et en outils de préparation et d'envoi de fichiers (réparation, visualisation 3D, optimisation de petites séries, customisation). La différence entre ces nouveaux venus se joue principalement au niveau du type d'imprimante 3D utilisée.

LES PLATES-FORMES DE PARTAGE ET DE VENTE DE FICHIERS

L'accès aux fichiers 3D reste l'un des freins majeurs à l'adoption massive de l'impression 3D par le grand public. De nouvelles entreprises françaises tentent donc de résoudre ce problème en proposant des catalogues en ligne dans lesquels l'utilisateur peut venir puiser ses modèles. Les fichiers sont gratuits ou payants, et peuvent être parfois imprimés à la demande.

- Cults est une plate-forme de partage de fichiers 3D gratuits ou payants. Ces derniers sont mis en ligne par leurs créateurs et téléchargés par les utilisateurs. Bien que sous licence Creative Commons, ils ne sont utilisables que dans un cadre privé et ne peuvent être modifiés. À noter que ce site devrait aussi, à terme, proposer à la vente des imprimantes 3D personnelles.
- Mod3ls fonctionne selon le même principe, en portant une attention particulière aux designs originaux.
- 3D My Mini Factory est un site de vente de fichiers fondé par l'entrepreneur français Sylvain Preumont, qui a également créé iMakr.vc, un fonds d'investissement spécialisé dans les projets liés à l'impression 3D, et iMakr.com, une plate-forme de vente en ligne autour de la fabrication additive.
- L'entreprise FabZat se positionne sur un secteur encore peu exploré : la fabrication à la demande de héros de jeux vidéo. Elle propose aux développeurs et éditeurs de jeux de monétiser leurs applications sur iPhone, iPad et Android, en y intégrant une boutique embarquée d'impression 3D. En quelques clics, les joueurs peuvent ainsi choisir de donner forme à leur personnage virtuel préféré, qui leur sera livré par courrier. Basée à côté de Bordeaux, l'équipe de FabZat gère l'ensemble de la chaîne, depuis le plug-in à insérer dans le jeu, le paiement et la production, jusqu'à la livraison et le suivi client.

La recherche sur l'impression 3D en France

L'AFPR (Association française de prototypage rapide) est la structure qui rassemble les acteurs français de l'impression 3D, académiques comme industriels. Ses membres se réunissent chaque année lors des Assises européennes de la fabrication additive, organisées ces derniers temps à l'École centrale Paris, qui constituent une très bonne occasion de découvrir en profondeur les différents travaux de recherche en cours dans le secteur.

Les deux principaux laboratoires de recherche en impression 3D sont l'UTBM (Université de technologie Belfort-Montélimar) et l'IRCCyN (Institut de recherche en communications et cybernétique de Nantes), chacun ayant ses spécialités.

À l'UTBM, les chercheurs du LERMPS (Laboratoire d'études et de recherches sur les matériaux, les procédés et les surfaces) étudient le comportement physico-chimique des poudres en fonction de la morphologie et de la pureté des grains, ainsi que les différents types de procédés de fabrication additive.

L'IRCCyN est l'unité mixte de recherche du CNRS à Nantes. Alain Bernard y dirige l'équipe de recherche sur l'ingénierie des systèmes, produits, performances et perceptions (IS3P). Il est aussi professeur à l'École centrale de Nantes et vice-président de l'AFPR avec Georges Taillandier. À l'origine de plus de 200 publications, incluant articles, livres, actes de colloques et conférences, il est un acteur clé de la recherche sur la fabrication additive en France. Ses travaux se centrent autour du développement et de la fabrication rapide de produits, de la rétro-ingénierie, de l'aide à la décision pour la conception ou le pilotage de systèmes, de la modélisation des organisations et de l'évaluation de performances.

En France, trois laboratoires sont plus spécialisés dans la fabrication directe par frittage laser de poudre : le DIPI (Diagnostic et imagerie des procédés industriels) dépendant de l'École nationale d'ingénieurs de Saint-Étienne, l'Irepa Laser à Illkirch et le Cetim Certec à Bourges. Ils travaillent conjointement avec chercheurs et entreprises pour concevoir de nouveaux usages et systèmes, mais aussi pour accompagner tout projet innovant dans ce domaine.

Le laboratoire DIPI, créé en 2001, étudie les technologies de fabrication par projection de flux d'énergie concentrée (laser, plasma, *thermal jet*), dont fait partie le frittage sélectif de poudre par laser. Équipé d'une Phenix PM100, il a développé un procédé d'impression multimatiériaux, notamment à partir de poudre de métal et de céramique.

Basé en Alsace, l'Irepa Laser est un centre de recherche et développement, intégré au sein de l'Institut Carnot MICA. La fabrication additive par fusion laser est l'un des thèmes de recherche de ce laboratoire, qui réalise des études de faisabilité, développe, conseille et forme depuis plus de trente ans les entreprises et les particuliers aux technologies laser.

Le Cetim Certec, centre de formation, de conseil et de ressources technologiques, accompagne les entreprises tout au long du cycle de vie de leurs produits et équipements. Il comporte un laboratoire équipé d'imprimantes 3D par fusion laser de poudre, qui est utilisé en recherche appliquée et permet de réaliser des essais de fabrication. Les machines impriment à partir de poudre polymère mais aussi de métal, notamment d'alliage d'aluminium.

Côté impression 3D de métal, le groupe Grenoble INP a été le premier à s'équiper d'une machine par faisceau d'électrons EBM (il en existe seulement trois en France et une centaine dans le monde). Cet équipement est dédié aux travaux de recherche s'opérant en partenariat avec des industriels.

L'offre en France pour le grand public

L'intérêt des Français pour l'impression 3D est désormais palpable. Et plus que jamais, il est facile de venir découvrir des imprimantes 3D en action, de les tester avec l'aide de communautés actives d'utilisateurs, ou d'en acquérir pour ses besoins personnels.

OU DÉCOUVRIR ET PRATIQUER L'IMPRESSION 3D ?

Depuis l'année dernière, le nombre d'espaces publics équipés d'impression 3D a explosé en France : Fab Labs et hackerspaces (voir page 137), lieux de *coworking*, écoles... Dans la

plupart des moyennes et grandes villes françaises, les particuliers ont maintenant l'embarras du choix pour se familiariser avec cette technologie.

En particulier, l'Hexagone est aujourd'hui parsemé de Fab Labs animés par des communautés vibrantes où l'entraide est le maître mot. Les membres organisent régulièrement des formations à la modélisation 3D ainsi que des ateliers de montage pour apprendre à monter soi-même son imprimante. Le débutant, comme l'utilisateur avancé, y trouvera certainement son compte. Pour connaître l'emplacement de ces espaces de fabrication, le plus simple est de consulter la carte des Fab Labs, réalisée à l'initiative de l'association PiNG.



La carte des Fab Labs en France. (Source : Fablab0 / PiNG)



Retrouvez la mise à jour de cette carte à l'adresse :
<http://bit.ly/CartelImpression3D>

Les Fab Labs ont de beaux jours devant eux

Suite à l'appel à projets « Fab Labs » lancé par le gouvernement Hollande fin juin 2013, 14 projets de Fab Labs ont été retenus pour bénéficier d'une subvention gouvernementale. Mais ce sont en tout 154 structures qui avaient postulé dans toute la France pour monter un espace de fabrication, et c'est sans compter ceux qui n'ont pas envoyé leur dossier mais qui sont déjà acteurs de terrain.

Les hackerspaces représentent également un bon moyen de s'initier à l'impression 3D en France pour le *vulgam pecus*. Mais, même si les conditions d'entrée varient d'un lieu à l'autre, il faut être souvent membre officiel pour pouvoir se servir librement des machines. Toutefois, il est généralement possible, voire encouragé, de venir découvrir le lieu et de se familiariser avec la communauté avant de s'engager à participer plus activement. Pour connaître la localisation de ces hackerspaces, le site hackerspace.org est la référence.

L'idée d'un service d'impression 3D local est partagée par de nombreux acteurs français du domaine, qui sont conscients de la complexité d'utilisation des machines pour le maker amateur. L'avantage pour le consommateur est de pouvoir rencontrer et discuter avec un conseiller qui lui présente la machine et la fait fonctionner. Le service en magasin est un bon test pour savoir si l'on souhaite acquérir sa machine ou attendre que la technologie se simplifie, ce à quoi travaillent toutes les entreprises du secteur.

La Poste, notamment, s'est lancée dans cette voie. Suite à un partenariat avec le service en ligne Sculpteo, trois bureaux de poste situés en région parisienne (un à Boulogne-Billancourt, deux à Paris, boulevard Bonne Nouvelle et rue La Boétie) proposent désormais l'impression 3D à la demande. Cette offre aiguise la curiosité du grand public pour cette technologie, désireux de découvrir et de tester ces machines qui font la Une. L'usage dira si elle doit être étendue à l'ensemble du territoire.

Autre initiative œuvrant dans ce sens, un service d'impression 3D a été expérimenté dans les magasins Top Office de Villeneuve-d'Ascq et de Tours, ainsi que dans le nouveau supermarché Auchan de Roissy. Les utilisateurs pouvaient apporter leur fichier d'objet préalablement enregistré sur une clé USB et le faire imprimer sur place au moyen d'une machine MakerBot.

Gardez l'œil ouvert !

Les événements autour de l'impression 3D se multiplient et chaque semaine apporte son lot de conférences, ateliers, rencontres et tables rondes sur le sujet. En région parisienne, des espaces comme NUMA, l'École 42, Simplon, L'Établissienne ou encore la Cité des sciences en accueillent régulièrement.

OU ACHETER UNE IMPRIMANTE 3D PERSONNELLE ?

Le maillage de distributeurs spécialisés dans l'impression 3D personnelle est encore très réduit dans l'Hexagone. Aujourd'hui, il est souvent plus facile d'acheter directement son imprimante 3D auprès de la boutique en ligne du constructeur (mais attention aux frais de douane et d'envoi !) que de faire appel à un intermédiaire. Notez aussi que, sur les centaines d'imprimantes 3D existantes, seuls quelques modèles très populaires sont distribués en France, principalement la gamme Replicator de MakerBot-Stratasys et la Cube de 3D Systems.

CKAB est le distributeur historique de MakerBot en France. Née au sein de la coopérative informatique Bearstech, cette jeune entreprise parisienne s'est positionnée très tôt comme un distributeur et un concepteur d'électronique open source. Son activité est aujourd'hui centrée sur l'impression 3D et vise tout particulièrement le monde éducatif.

Le FabShop, dirigé par Bertier Luyt qui a participé à cet ouvrage, est lui aussi distributeur agréé des imprimantes 3D MakerBot. L'entreprise assure le transport, le dédouanement et le support technique en français, ce qui explique ses prestations un peu plus élevées que les tarifs proposés sur la boutique en ligne du constructeur.

Certains sites spécialisés ont également vu le jour ces derniers mois comme Machines-3d, Makershop ou Cubeek, et des petits nouveaux sont attendus dans le courant de l'année 2014. MakerBot, LeapFrog et PP3DP (constructeur de l'imprimante UP!) sont les trois principaux fabricants distribués pour l'instant sur ces sites d'e-commerce.

Des magasins spécialisés ont également ouvert leurs portes, comme Multistation qui propose des démonstrations et visites sur rendez-vous dans son magasin parisien, ou encore Cubeek 3D toujours à Paris, qui s'adresse avant tout aux petites et moyennes entreprises souhaitant s'équiper en machines compactes. Pour l'instant, les imprimantes 3D personnelles sont rarement vendues en grandes surfaces, même si cela ne saurait tarder. Seuls les hypermarchés Hyper U et les supermarchés Super U proposent la Cube de 3D Systems pour 1 490 € et les cartouches de matériaux à 40 € l'unité.

Les communautés d'utilisateurs

Chaque constructeur d'imprimantes 3D personnelles a développé des outils web (sites, wikis, forums...) pour mettre en relation les utilisateurs de la machine. Les contributeurs y ajoutent conseils et autres contenus pour aider les nouveaux venus comme les plus expérimentés. En règle générale, les imprimantes 3D open source sont celles qui possèdent les communautés les plus actives. Ainsi, saluons le dynamisme du forum RepRap, qui dispose d'un espace dédié aux utilisateurs francophones. Mais sachez qu'en grande majorité, il est préférable de comprendre l'anglais...

LA TROISIÈME RÉVOLUTION INDUSTRIELLE ?

Le monde de l'industrie, avec ses machines-outils, ses chaînes de production, ses économies d'échelle et ses usines délocalisées, risque d'être complètement chamboulé par l'impression 3D. Pour certains, cette nouvelle technologie représente en effet la « troisième révolution industrielle », au même titre que la mécanisation à la fin du xviii^e siècle et le taylorisme au début du xx^e siècle. Capable de créer des objets à la demande qui répondent aux besoins des utilisateurs, elle prône un nouveau mode de fabrication, la customisation de masse. Comme l'a déclaré Peter Weijmarshausen, P-DG du service d'impression 3D en ligne Shapeways, lors de la conférence Techonomy aux États-Unis en novembre 2012 : « Le futur de la production, ce n'est pas faire beaucoup pour peu, c'est faire de peu beaucoup. »

Vers la customisation de masse

Aujourd'hui, le modèle de la production en grande série domine de manière écrasante le monde de l'industrie. Il est si prépondérant qu'il conditionne la plupart des designers dans leur travail, ce qui se traduit par des formes standardisées, compatibles avec ces modes de fabrication à grande échelle.

Mais l'impression 3D pourrait changer la donne, puisqu'elle permet de produire des objets uniques et à la demande. Avec cette technologie, designers et ingénieurs ont la liberté de concevoir différemment, en dehors des sentiers battus : les formes les plus improbables peuvent être imaginées et réalisées. De plus, elle offre au designer la possibilité de créer des objets en collaboration avec l'utilisateur final. En s'adaptant aux souhaits du consommateur, le design devient évolutif et plus accessible.

DES OBJETS COCRÉÉS AVEC L'UTILISATEUR FINAL

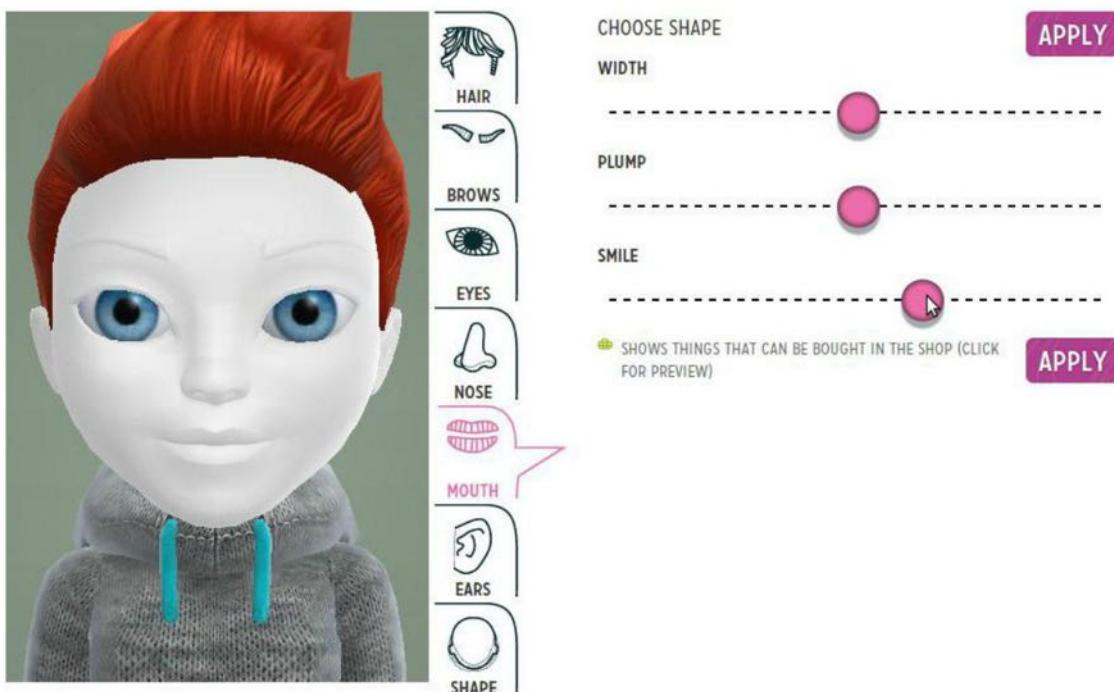
En facilitant la customisation, l'impression 3D amène de nouvelles manières de concevoir les objets du quotidien. Les designers travaillent davantage avec le consommateur : on parle même de « cocréation ». Les produits peuvent évoluer en fonction des besoins de l'utilisateur, qu'ils soient d'ordre pratique, économique, esthétique...

À l'heure actuelle, ce design génératif s'effectue en plusieurs étapes. Le designer conçoit d'abord l'objet initial et ses variantes (ou options), qui sont proposés au consommateur dans un point de vente ou via une application web ou mobile. L'utilisateur choisit ensuite les options

selon ses besoins, en apportant donc des modifications à l'objet. Enfin, ce dernier est produit à la demande et envoyé au consommateur.

Ainsi, Sculpteo a lancé le service 3DPCase en septembre 2012, un service en ligne qui permet de customiser la coque de son téléphone à partir d'un modèle conçu par un designer, avant de la recevoir par courrier quelques jours plus tard. À partir de l'application iPhone ou du site web dédiés, il suffit de sélectionner une forme de base de la coque, d'en modifier les caractéristiques physiques (ajout de texte, d'image ou encore distorsion de formes) et même de choisir le matériau. Chaque coque est unique et imprimée à l'unité.

Autre exemple de design génératif, le site Makie.me propose de customiser en ligne et de fabriquer la poupée de ses rêves (d'une hauteur de 25 cm environ) pour un peu plus de 120 €. Le corps est entièrement imprimé en 3D, les cheveux et les vêtements étant ajoutés par la suite. Ce type de service n'est pas nouveau : ce qui l'est en revanche, c'est la liberté complète des formes permises et le fait que le modèle économique de cette jeune entreprise réside entièrement dans la customisation de masse. La production à l'unité n'apparaît plus comme une option commerciale ou une vitrine marketing, se situant au contraire au cœur de l'offre.



Panneau de configuration permettant de customiser sa poupée Makie. (Source : Makie.me)

Concevoir sa bague de fiançailles

Jeune société basée à Londres, Hot Pink propose des bagues de fiançailles sur mesure, que les futurs mariés peuvent concevoir par ordinateur. Les anneaux peuvent être visualisés en ligne, avant d'être fabriqués par impression 3D. Il s'agit de modèles uniques et entièrement personnalisés.

Citons enfin l'initiative de l'entreprise Digital Forming, spécialisée dans les problématiques de cocréation entre créateurs et consommateurs. Son équipe a développé le logiciel Digital Forming Interface, qui permet aux designers de collaborer avec des utilisateurs non experts pour créer des produits. Reposant sur la fabrication additive, il peut être employé au sein d'un magasin ou sur un site Internet.

UNE MEILLEURE ADAPTABILITÉ AUX SOUHAITS DU CONSOMMATEUR

La capacité de l'impression 3D à produire à l'unité permet de s'adapter très rapidement aux souhaits du consommateur, voire d'améliorer la fonctionnalité d'un objet par l'intermédiaire de ses utilisateurs. Cette technologie constitue également un atout précieux en cas de pièce défectueuse : si une anomalie est détectée, il est désormais possible de modifier le design et de produire la nouvelle pièce en un temps record.

Ainsi, le constructeur d'automobiles de luxe Bentley recourt à l'impression 3D pour fabriquer certaines pièces de l'habitacle de ses voitures, en tenant compte des besoins spécifiques de l'acheteur. Citons le cas d'un client de la marque qui désirait un tableau de bord inversé en raison d'un handicap physique. La pièce a été dessinée sur mesure, puis imprimée par frittage laser, avant d'être complétée par un plaquage de cuir et vernie.

Autre exemple dans un tout autre domaine, le studio de design MADLAB.CC conçoit des bijoux et autres accessoires sur mesure qui épousent parfaitement la morphologie de l'utilisateur final. Chaque création est réalisée à partir d'un modèle 3D de la partie du corps humain à parer, comme cette série de bracelets aux formes complexes.



Série de bracelets sur mesure. (Source : MADLAB.CC)

L'expérience de Nokia

En janvier 2013, Nokia a annoncé la mise à disposition sur Internet des fichiers 3D de la coque d'un de ses téléphones, le Lumia 820. Chacun peut donc télécharger ces fichiers, les modifier et imprimer en 3D des coques et accessoires pour ce modèle. Cette opération a d'abord été un choix de communication : les médias se sont en effet emparés de la nouvelle et ont relancé l'intérêt pour Nokia. Elle a constitué en outre un test grandeur nature des opportunités de l'impression 3D, en donnant un rôle de cocréateur aux utilisateurs de ce téléphone. Enfin, cette expérience a montré que la fabrication additive offre une grande adaptabilité : le design initial du Lumia 820 s'étant avéré incompatible pour l'impression 3D, la communauté l'a modifié jusqu'à obtenir un fichier satisfaisant.



Le téléphone Lumia 820 et quelques exemples de coques personnalisées imprimées en 3D. (Source : Nokia)

Une chaîne de production bouleversée

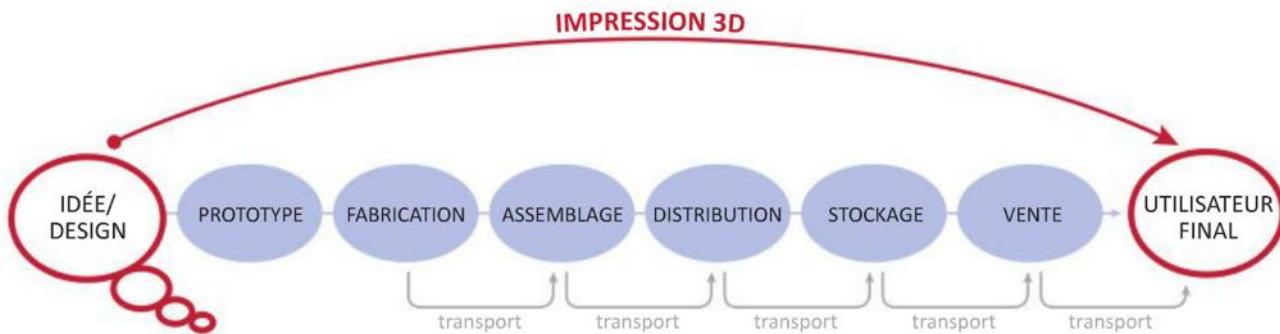
L'impression 3D avait fait son entrée par la petite porte, en s'adressant tout d'abord au monde du prototypage rapide, un secteur négligé des constructeurs industriels. Dans ce domaine, elle offrait des qualités évidentes, garantissant des itérations rapides et à moindre coût de prototypes de grande qualité.

Puis elle a évolué vers la fabrication directe de biens de consommation pour des marchés de niche et des petites séries, s'affirmant peu à peu comme un mode de production à part entière. Des structures qui jusqu'à présent n'avaient pas accès à ces outils d'impression – petites et moyennes entreprises, écoles, hôpitaux, particuliers... – peuvent désormais s'équiper d'imprimantes 3D et produire elles-mêmes des objets.

Ces machines offrent l'avantage d'être multi-usages, capables de réaliser des porte-clés, des pièces de moteur ou encore des prothèses médicales – et simultanément, dans certains cas. Par leur polyvalence, elles permettent de diminuer considérablement les investissements liés à la fabrication, contrairement aux chaînes de production actuelles, où chaque machine a un rôle précis et chaque changement suppose d'acquérir de nouveaux équipements très

onéreux. En outre, les objets imprimés en 3D nécessitant peu ou pas d'assemblage, les coûts de matériel de montage s'en trouvent encore réduits.

La fabrication additive permet également de limiter les investissements relatifs au transport, au stockage et aux inventaires, puisqu'en fabriquant à la demande, on évite de produire en grande quantité et de stocker. La chaîne logistique (distribution, stockage, vente au détail) devient même obsolète dans bien des cas, l'impression 3D faisant le trait d'union entre la conception de l'objet et sa consommation.



L'impression 3D, médiateur direct entre le designer et l'utilisateur final. (Source : CSC)

Même les cycles de lancement de produits sont remis en question. En effet, la production à l'unité permet de tester un bien de consommation sans engager d'investissements à haut risque. Désormais, les makers et jeunes entreprises qui n'avaient pas accès à une production à grande échelle peuvent lancer leurs créations sur le marché.

Pour autant, l'impression 3D n'est pas encore en passe de remplacer l'ensemble du parc industriel. La technologie en est à ses débuts et, pour le moment, elle s'adapte mal au passage à l'échelle.

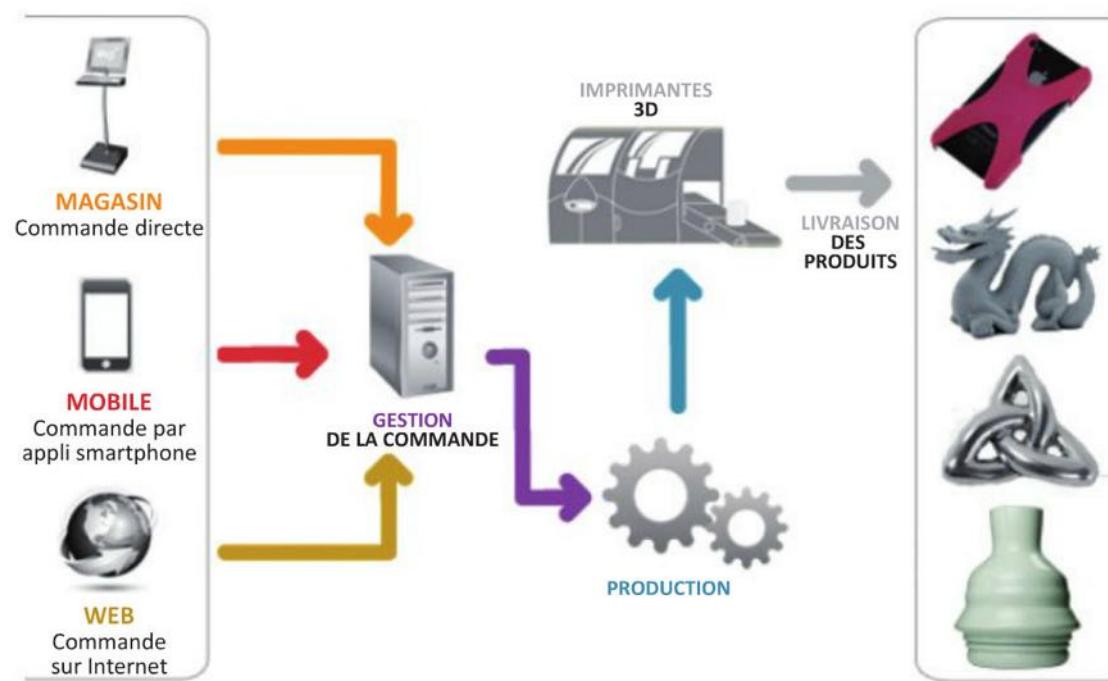
L'IMPRESSION 3D DANS LES NUAGES...

L'intégration de la fabrication additive dans une infrastructure industrielle existante pourrait être facilitée par l'arrivée du *Cloud 3D Printing* « l'impression 3D dans les nuages ». Avec cette solution, l'entreprise (un site de commerce en ligne, par exemple) sélectionne les produits qui se prêtent à la customisation et qui peuvent être imprimés en 3D, du moins en partie. Elle délègue la production de ces pièces à un prestataire de services qui prend en charge toute la phase d'impression ainsi que la logistique. Les pièces sont alors produites sur mesure, les coûts étant proportionnels à la demande.

Tout en leur évitant d'investir dans des imprimantes 3D, ce système permettrait aux entreprises de se tourner peu à peu vers cette technologie, en limitant les risques. Il leur garantirait aussi une expertise dans ce domaine, que le monde de l'industrie connaît mal.

Pour encourager ce processus, nombreux sont les services en ligne d'impression 3D qui développent des API (interfaces de programmation) facilitant l'intégration de l'impression 3D sur un site Internet ou une application mobile. Celle de Sculpteo figure ainsi au sein d'123D

Creature, l'outil d'Autodesk pour modéliser et fabriquer des figurines fantastiques, et d'eBay Exact, l'application mobile d'eBay pour customiser et faire imprimer ses objets à la demande.



L'impression 3D dans les nuages, comme le conçoit l'entreprise Sculpteo. (Source : Sculpteo)

...OU À LA MAISON

Le futur de l'impression 3D partage les visionnaires. Si certains tablent sur la diffusion des objets en ligne, imprimables à volonté par des services professionnels « dans les nuages » livrant partout dans le monde, d'autres pensent qu'à terme, il y aura une imprimante 3D dans chaque maison, qui fabriquera et réparera des objets à la demande.

Dans un avenir proche, on peut également parier sur la multiplication des lieux de fabrication de quartier, qui mettent à disposition des machines, à la manière d'un service classique de photocopies. Dans un article du *Monde* de 2006, Joël de Rosnay en parlait déjà, les baptisant MUP ou micro-usines de quartier. La fabrication additive pourrait ainsi transformer nos habitations en usines individuelles, incluant imprimante 3D et station de recyclage. Portée en grande partie par la société MakerBot, cette vision est pourtant mise à mal par les limites de cette technologie et la complexité des objets environnants.

RELOCALISATION ET RÉINDUSTRIALISATION

Mieux adaptée à une production à l'unité et à la demande, l'impression 3D s'avère plus efficace si elle est utilisée au niveau local. Pour les entreprises comme pour les particuliers, il est en effet plus pratique d'utiliser un service d'impression 3D proche ou de s'équiper directement, plutôt que de faire appel à un fabricant situé à l'autre bout du monde.

Y voyant une opportunité pour relocaliser leur production, plusieurs pays ont déjà commencé à soutenir la fabrication additive au niveau national. En 2011, près de 500 publications ont ainsi vu le jour lors de 17 conférences internationales sur cette technologie.

Les États-Unis et le Royaume-Uni arrivent en tête des organisateurs les plus actifs, suivis de l'Allemagne. En octobre 2012, la Grande-Bretagne a annoncé un investissement de 7 millions de livres dans la recherche sur l'impression 3D, dirigée par le *Technology Strategy Board*. Aux États-Unis, Barack Obama a inauguré à l'été 2012 le NAMII (*National Additive Manufacturing Innovation Institute*), soutenu par 70 millions de dollars d'investissement dont 30 millions provenant de l'État. En France, les événements dédiés à l'impression 3D se multiplient, avec notamment le 3D Print Show à Paris en novembre 2013 et le salon 3D Print à Lyon en juin 2014.

L'Association française de prototypage rapide

Fondée en 1992, l'AFPR (Association française de prototypage rapide) réunit les acteurs des domaines du prototypage rapide, de l'outillage rapide et de la fabrication rapide en France et dans les pays francophones limitrophes. Elle organise depuis sa création les Assises européennes de prototypage et de fabrication rapides, un événement annuel qui a lieu à l'École centrale Paris.

Sous son égide se sont tenues plusieurs commissions, parmi lesquelles les commissions Fabrication directe métal et Fabrication directe plastique, qui ont permis de définir les besoins en entreprise dans ces secteurs et de réunir des experts venant de la recherche et de l'industrie. Parmi les membres de ces commissions, on compte notamment le Cetim (Centre technique des industries mécaniques), Dassault Aviation, l'École centrale de Nantes, l'École nationale d'ingénieurs de Saint-Etienne, le Centre des matériaux de l'École des mines de Paris, l'Institut de recherche en communication et cybernétique de Nantes, l'Irepa Laser, le LERMPS (Laboratoire d'études et de recherche sur les matériaux, les procédés et les surfaces), le PEP (Pôle européen de plasturgie) et le SIRRIS, centre collectif de l'industrie technologique belge.

En France, l'impression 3D pourrait devenir l'une des clés de la relocalisation et de la réindustrialisation. Alors qu'aujourd'hui la production de biens est massivement externalisée en Chine ou dans d'autres pays aux salaires très bas, cette nouvelle technologie pourrait bouleverser cet écosystème puisqu'elle permet de réduire drastiquement la main d'œuvre nécessaire. Les pièces pouvant être produites en flux tendu, les problématiques de stockage et de transport seraient également allégées.

Écologie et développement durable

En favorisant la production locale et en réduisant la chaîne logistique, la fabrication additive s'inscrit déjà dans une démarche écologique. Mais elle permet également de limiter l'impact environnemental d'un objet, en optimisant son design et en le fabriquant quasiment sans déchets, avec possibilité de recyclage.

DES OBJETS AU DESIGN OPTIMISÉ

L'impression 3D permet de réaliser des formes géométriques complexes sans surcoût : nids-d'abeilles, structures organiques, engrenages... Ces possibilités quasi infinies permettent d'optimiser le design des pièces créées, qui sont du coup moins fragiles et plus légères que celles produites par fabrication soustractive.

En aéronautique notamment, la légèreté des pièces est un aspect capital, car moins l'avion est lourd, moins il dépense de combustible. Elle s'obtient principalement en imaginant des éléments en nids-d'abeilles, donc en partie creux, mais pourtant tout aussi solides – et parfois même plus – que des pièces pleines. C'est là qu'intervient l'impression 3D, seul procédé capable de les réaliser. Le poids de certaines pièces d'avion a pu être ainsi réduit de 70 % environ, entraînant une économie de plusieurs millions de litres de combustible par an.

On voit donc que le design d'un objet peut avoir d'importantes répercussions écologiques, tant au niveau de sa fabrication (quantité de matière nécessaire, procédés employés) que de son utilisation finale. Pour limiter l'impact environnemental d'une pièce, il est donc primordial d'optimiser sa forme, une tâche grandement facilitée par l'impression 3D. Cependant, il faudra bien prendre en compte tous les paramètres lors de cette optimisation : par exemple, un objet durant plus longtemps que la normale n'aura pas forcément un bilan énergétique meilleur s'il s'avère moins adapté.

Un exemple de design optimisé grâce à l'impression 3D

Econolyst, cabinet de conseil spécialisé en fabrication additive, présente un exemple de design amélioré à l'aide de cette technologie. Il s'agit d'une pièce de pompe à injection Delphi pour les moteurs de voitures, qui était jusqu'alors obtenue par forage d'une pièce en aluminium, ce qui nécessitait le recours à plusieurs machines et l'application de différents post-traitements. Aujourd'hui, sa conception et sa production ont radicalement changé grâce à l'impression 3D. Désormais imprimée en partie en 3D dans un matériau plus léger, l'acier inoxydable, cette pièce de pompe possède une forme optimisée qui lui garantit un meilleur fonctionnement.



Pompe d'origine. (Source : Delphi)



La même pompe, réalisée par fabrication additive. (Source : Delphi)

DES PERTES DE MATIÈRE MINIMES

Par son principe même de fabrication additive, l'impression 3D est une technique sans déchets ou presque, ce qui est loin d'être le cas des procédés classiques de production. Avec ces derniers, la quantité de résidus peut atteindre jusqu'à 90 % de la matière nécessaire à la réalisation de pièces en métal, par exemple. S'il s'agit de titane, l'un des métaux les plus chers de la planète, cette perte peut avoir de lourdes conséquences, aussi bien financières qu'environnementales.

LA QUESTION DU RECYCLAGE

Pour faire de l'impression 3D une technologie réellement autosuffisante et respectueuse de l'environnement, l'un des défis est de pouvoir recycler les objets produits, en réutilisant leur matière pour en imprimer d'autres. Plusieurs projets ont donc vu le jour dans ce sens, tournés essentiellement vers les imprimantes à dépôt de filament fondu, qui se prêtent bien à ce type de recherche par leur nature open source et la simplicité de leur procédé. Ainsi, l'extrudeur de bureau Filabot est une machine qui permet de transformer le plastique d'un objet (pièce imprimée ratée, brique de lait, bouteille de soda, etc.) en une bobine de filament pouvant servir pour une nouvelle session d'impression.



L'extrudeur de bureau Filabot. (Source : Whitney Trudo)

Oui, mais...

Même si l'impression 3D semble promise à un bel avenir, elle doit encore faire quelques progrès si elle veut révolutionner le monde industriel. Lenteur du procédé, choix restreint et coût élevé des matériaux imprimables, instabilité des formes... : les limites ne manquent pas à cette technologie qui doit s'améliorer pour quitter le marché de niche.

UNE FABRICATION ENCORE TROP LENTE

Le principal frein à une vaste adoption de l'impression 3D dans l'industrie est sa lenteur. Les temps de réalisation demeurent encore bien trop longs, comparés à ceux des chaînes de production de masse optimisées. Pour Todd Grimm, consultant spécialisé dans ce secteur, il faudrait une augmentation au centuple de la vitesse d'impression actuelle pour que cette technologie devienne un compétiteur sérieux aux systèmes de fabrication en place.

DES MATERIAUX CHERS ET PEU VARIÉS

Le coût des matériaux utilisés constitue également un obstacle au déploiement massif de l'impression 3D dans l'industrie et chez les particuliers. Pour le moment, ils reviennent en effet beaucoup plus cher, entre 50 et 100 fois plus, que ceux intervenant dans les procédés de fabrication traditionnels. Ce fait s'explique en partie par la complexité de ces matériaux, qui doivent notamment être capables de fondre puis de durcir très rapidement. Mais ces prix élevés sont aussi liés à l'avènement relativement récent de cette technologie : les fabricants et distributeurs spécialisés sont encore peu nombreux. Plus elle sera populaire, plus le coût des matériaux d'impression baissera.

On reproche également à la fabrication additive d'offrir une gamme de matériaux impréhensibles encore trop restreinte (environ 200 sur les milliers disponibles), même si celle-ci s'élargit mois après mois. Il est vrai que si cette technologie est tout à fait au point pour fabriquer des objets en plastique, elle est encore à ses balbutiements pour fabriquer des objets en verre ou en bois. Par ailleurs, l'impression multimatériaux demeure encore délicate, avec des logiciels de modélisation inadaptés. Mais les progrès dans ce domaine sont d'une rapidité déconcertante. Par exemple, l'impression 3D à partir de pâte de bois recyclée, encore impossible il y a quelques mois, est en train de devenir réalité.

DES FORMES DIFFICILEMENT REPRODUCTIBLES ET PARFOIS INSTABLES

Les utilisateurs réguliers de l'impression 3D s'accordent à reconnaître que la reproductibilité d'un objet fabriqué à l'aide de cette technologie n'est pas encore totalement parfaite. En raison des multiples variables de production (température, temps de refroidissement, etc.), une même pièce réalisée par la même machine pourra différer très légèrement d'une impression à l'autre.

Dans l'industrie aérospatiale, ce phénomène se traduit par des pièces de porosité variable ou présentant des problèmes de distorsion. On constate également que les entrelacs ne réagissent pas toujours de la même manière aux tensions appliquées. Dans ce secteur, où les contraintes qualité sont extrêmement fortes, ces défauts ne sont pas tolérés et doivent être corrigés.

Par ailleurs, on constate aussi que les objets imprimés avec certains matériaux comme le polyamide ou la résine ont tendance à se déformer avec le temps, particulièrement les pièces comportant des parties longues de faible épaisseur (une épée de chevalier, par exemple).

PAS TOUJOURS DE CONTRÔLE QUALITÉ

Plusieurs acteurs très impliqués depuis les débuts de l'impression 3D commencent à prévenir des dangers de l'accès à cette technologie en dehors de la chaîne industrielle de production et de contrôle. Certes, il est désormais possible d'imprimer sa propre tasse à café ou de remplacer le manche de sa poêle, mais que se passe-t-il lorsque l'utilisateur ne procède pas à tous les tests de sécurité habituellement effectués par les fabricants de ces produits ? Le risque est grand d'obtenir des objets potentiellement dangereux, hautement inflammables ou exhalant des produits toxiques.

Conclusion

Malgré ces quelques limites, qui semblent temporaires, la recherche avance à grands pas dans le domaine de la fabrication additive. Nouveaux matériaux, nouveaux modèles, nouveaux usages..., chaque mois est porteur d'avancées passionnantes qui laissent vraiment penser que cette technologie pourra bientôt être utilisée partout et par tous. Par ailleurs, plusieurs brevets du monde de l'impression 3D vont expirer dans les deux prochaines années, dont le procédé de frittage laser, ce qui devrait donner naissance à de nouveaux constructeurs et faire baisser les coûts des bacs de poudre.

Que vous soyez designer ou dirigeant de PME, amateur passionné ou expert en CAO, l'impression 3D est une technique dont il devient impossible de se passer, une fois qu'on l'a apprivoisée. Profitez des nombreux lieux, formations et événements qui fleurissent en France pour la tester !

Mais laissons le mot de la fin à Clément Moreau, cofondateur du service en ligne d'impression 3D Sculpteo, qui a partagé sa vision des objets de demain lors d'une conférence donnée à Paris à l'Université du Système d'Information (USI) en 2012 : « Une nouvelle génération d'objets manufacturés, pensés par des designers professionnels et "terminés" grâce aux "data" de l'utilisateur final, peut voir le jour. Ce sont les *e-objets*. Ces objets d'un nouveau genre, issus du numérique et fabriqués à la demande grâce à la technologie de l'impression 3D, s'adaptent aux besoins de l'utilisateur final et annoncent ce monde merveilleux à la mesure de chaque homme, où la production de masse laisse la place à la personnalisation de masse. »

RESSOURCES UTILES AUTOUR DE L'IMPRESSION 3D EN FRANCE

Cette annexe répertorie les principaux acteurs et lieux de l'impression 3D en France : constructeurs et distributeurs d'imprimantes, prestataires, espaces de fabrication... Comme cette liste risque de s'allonger au fil des mois, n'hésitez pas à consulter sa mise à jour sur le site de la collection « Serial Makers » à laquelle appartient ce livre : www.serialmakers.com.



À cette adresse, vous trouverez également beaucoup d'autres infos liées à l'impression 3D : news, modèles 3D prêts à imprimer, liens utiles, etc.

Constructeurs d'imprimantes 3D

ATC 3D

www.atc3d.com

06 10 10 70 28

Charlyrobot

www.charlyrobot.com

04 50 32 80 00

192 route de l'Usine 74350 Cruseilles

DOOD

<http://stotsi.free.fr/dood>

Exceltec

www.exceltec.eu

06 98 05 34 46

Espace mi-plaine 20 avenue des frères Montgolfier 69680 Chassieu

FoldaRap

<http://goteo.org/project/foldarap-peer-to-peer-edition>

GenerID

<http://generid.com/fr>

11 rue du Clos Courtel 35000 Rennes

Hive3D

<http://hive3d.fr>

03 87 34 69 00

1 route d'Ars Laquenexy 57078 Metz

Pearl

www.pearl.fr

03 88 58 02 02

6 rue de la Scheer 67600 Sélestat

Prodways

www.prodways.com

01 30 90 44 12

ZI Les Garennes 1/3 rue Chappe 78130 Les Mureaux

Tobeca

www.tobeca.fr

09 72 39 10 06

223 boulevard Roosevelt 41100 Vendôme

Zeepro

<http://zeepro.com>

Wanhao

www.wanhao3dprinter.fr

06 87 16 47 47

60 boulevard Waldeck Rousseau 35500 Vitré

Distributeurs d'imprimantes 3D

3D Avenir

www.3davenir.fr

01 69 47 60 74

Le Magellan 7 rue de Montespan 91024 Évry Cedex

3D Industries

www.3dindustries.fr

01 34 48 14 38

1 bis rue Rajon 95430 Auvers-sur-Oise

CADvision

www.cadvision.fr

01 39 30 65 06

2 rue Galilée 78280 Guyancourt

CKAB

www.ckab.com

01 70 61 20 53

19 galerie Feydeau 75002 Paris

Creatix3D

www.creatix3d.com

01 61 37 03 50

41 avenue des Trois Peuples 78180 Montigny-le-Bretonneux

Kallisto

www.kallisto.net

05 62 13 59 59

265 rue Léon Joulin 31100 Toulouse

Le FabShop

www.lefabshop.fr

09 81 19 70 76

ZA de la Madeleine 14 rue de l'Herminette 35350 Saint-Méloir-des-Ondes

MG2 Systems

www.mg2-systems.com

02 41 36 82 10

14 rue du Chêne Vert 49124 Saint-Barthélémy-d'Anjou

Proto3Dshop

<http://proto3dshop.multistation.com>

02 99 16 35 35

14 rue de l'Armorique 75015 Paris

SPEN Systèmes

www.spen-systemes.fr

03 80 60 83 20

Parc technologique 5-7 rue André Bourland 21000 Dijon

Lieux de fabrication numérique

/tmp/lab

www.tmplab.org

Maison pour tous aka. /tmp/mpt 30 avenue de Newburn 94600 Choisy-le-Roi

Artilect

www.artilect.fr

27 bis allée Maurice Sarraut 31300 Toulouse

Electrolab

www.electrolab.fr

Nanterre (l'adresse exacte est envoyée quelques jours avant la date fixée par le visiteur)

FabLab CCSTI Grenoble

<http://fablab.ccsti-grenoble.org>

04 76 44 88 80

La Casemate 1 place Saint-Laurent 38000 Grenoble

FacLab

www.faclab.org

Université de Cergy-Pontoise avenue Marcel Paul ZAC des Barbanniers 92230 Gennevilliers

IdeasLab

www.ideaslab.fr

03 88 14 47 55

24 boulevard de la Victoire 67084 Strasbourg Cedex

La Forge des Possibles

www.laforgedespossibles.org

09 80 51 95 97

Boulevard Sully 1 place Jacquard 85000 La Roche-sur-Yon

Le Petit FabLab de Paris

www.lepetitfablabdeparis.fr

09 77 73 56 66

156 rue Oberkampf 75011 Paris

Net-Iki

www.net-village.org/fablab

3 rue de l'Église 39290 Biarne

NYBI.CC

www.nybi.cc

9 rue d'Alsace 54140 Jarville-la-Malgrange

PiNG

www.pingbase.net

02 40 16 86 78

Pôle associatif du 38 rue du Breil 44100 Nantes

Telefab

www.telefab.fr

Télécom Bretagne 655 avenue du Technopôle 29280 Plouzané

TyFab

www.tyfab.fr

24 rue de Gasté 29200 Brest

Prototypistes

3A (Applications Additives Avancées)

www.rm4metal.com

09 81 29 32 70

Pôle technologique de Haute-Champagne rue Lavoisier BP52 52800 Nogent

3D Prod

www.3dprod.com

03 29 41 38 19

5 passage Piver 75011 Paris

AGTX

www.agtx.fr

01 39 93 77 70

10 avenue des Morillons 95140 Garges-lès-Gonesse

Aurore Arka

www.aurore.pro

05 61 16 28 00

265 rue Léon Joulin 31100 Toulouse

Axis

www.axishello.com

05 55 06 17 17

Crouzeix 87220 Feytiat

BeAM

www.beam-machines.com

03 88 65 54 00

Pôle API Parc d'innovation 67400 Illkirch

BV Proto

www.bvproto.eu

03 84 58 39 31

Rue de Leupe 90400 Sévenans

Crésilas

www.cresilas.fr

01 69 80 69 69

ZI du Fond des Prés 91460 Marcoussis

Erpro

www.erpro.fr

01 34 14 62 67

216 boulevard André Brémond 95320 Saint-Leu-la-Forêt

Impression-3D

www.impression-3d.com

01 72 75 61 91

134/140 rue d'Aubervilliers 75019 Paris

Initial

www.initial.fr

04 50 69 33 73

ZAE des Prés Bouvaux 4 route de Branchy BP105 74600 Seynod

MB Proto

www.mbproto.com

02 32 97 56 89

Chemin de la Fonderie 76340 Blangy-sur-Bresle

Poly-Shape

www.poly-shape.com

01 64 85 13 10

Bureaux et site de production : ZI La Gandonne 235 rue des Canesteu
13300 Salon-de Provence

Site de production : Espace Green Parc (Bât. C1) route de Villepècle
91280 Saint-Pierre-du-Perray

Sculpteo

www.sculpteo.com

01 83 64 11 22

89 rue du Gouverneur Général Éboué 92130 Issy-les-Moulineaux

Laboratoires de recherche et centres techniques

Cetim

www.cetim.fr

03 44 67 36 82

52 avenue Félix Louat 60300 Senlis

7 rue de la Presse 42000 Saint-Étienne

Cirtes

www.cirtes.com

03 29 55 11 71

29 bis rue d'Hellieule 88100 Saint-Dié-des-Vosges

CTTM

www.cttm-lemans.com

02 43 39 46 46

Association Transferts Technologies Mans 20 rue Thalès de Milet 72000 Le Mans

DIPI-ENISE

<http://dipi-platform.enise.fr>
04 77 91 01 61/04 77 91 01 73
74 rue des Acieries 42000 Saint-Étienne

Edonis Dental Systems

www.edonisds.com
02 32 97 53 27
1 rue de la Fonderie 76340 Blangy-sur-Bresles

ENS Cachan – antenne de Bretagne

www.bretagne.ens-cachan.fr
02 99 05 93 00
Campus de Ker Lann avenue Robert Schuman 35170 Bruz

Esteve

www.esteve-sa.fr
05 61 54 42 20
8 Claude Gonin 31400 Toulouse

IDPro

www.plateforme-idpro.fr
04 72 49 21 13
Lycée Louis Aragon 12 chemin de la Côte aux Cailloux 69700 Givors

IRCCyN

www.irccyn.ec-nantes.fr/fr
04 73 33 45 85
École centrale de Nantes 1 rue de la Noë BP2101 44321 Nantes Cedex 3

Pôle européen de plasturgie (PEP)

www.poleplasturgie.net
04 74 81 92 60
2 rue Pierre et Marie Curie 01100 Bellignat

SIRISCAN – SIREIX

www.sireix.com/siriscan
05 53 47 47 28
1 rue Alain Colas 47480 Pont-du-Casse

Valla

www.valla.fr
04 72 68 86 88
47 rue Antoine Primat 69100 Villeurbanne

ANNEXE B

GLOSSAIRE

ABS

Fondant à une température de 200 °C, l'ABS est l'un des plastiques les plus couramment utilisés par les imprimantes 3D personnelles à dépôt de filament. Il nécessite l'utilisation d'un plateau d'impression chauffant.

AMF

L'AMF (*Additive Manufacturing File Format*) est un format open source d'impression 3D qui se positionne comme concurrent du format standard STL.

CAO

Le terme CAO (Conception assistée par ordinateur) regroupe l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation qui permettent de concevoir des objets au moyen d'un ordinateur.

COUCHE

En impression 3D, une couche est une tranche du fichier 3D, virtuellement découpée en vue d'être imprimée. La fabrication d'un objet se fait couche par couche, jusqu'à former entièrement la pièce.

DÉCOUPE LASER

La découpe laser est une technique de fabrication qui consiste à découper ou à graver la matière au moyen d'un rayon laser. De nombreuses imprimantes 3D personnelles comme les premières MakerBot, les machines Ultimaker et les Printrbot utilisent ce procédé pour réaliser les pièces en bois de leur structure.

EXTRUDEUR

Sur une imprimante 3D à dépôt de filament fondu, l'extrudeur est l'élément de la machine dans lequel passe le filament. Il est équipé d'un moteur et de rouages qui permettent à ce filament de se dérouler progressivement jusqu'à la tête chauffante.

FAB LAB

Un Fab Lab (contraction de *FAB*rication *LAB*oratory) est un lieu de fabrication numérique, équipé de machines contrôlées par ordinateur et animé par une communauté d'entraide. Pour mériter le nom officiel de Fab Lab, l'espace doit respecter la charte instaurée par le MIT.

FABRICATION ADDITIVE

La fabrication additive désigne l'ensemble des techniques d'impression 3D. L'objet y est créé par addition de matière, à l'inverse de la fabrication soustractive.

FILAMENT

Le filament (d'ABS ou de PLA, le plus souvent) est le matériau de base utilisé dans les imprimantes 3D personnelles à dépôt de filament fondu. Disponible dans différents diamètres et coloris, il est conditionné sous forme de bobines.

FRITTAGE LASER

Le frittage laser est une technique d'impression 3D consistant à fabriquer un objet par fusion progressive de particules de poudre. Ce procédé permet notamment de réaliser des engrenages et des formes complexes.

HACKERSPACE

Un hackerspace est un lieu où se réunit une communauté d'entraide qui partage les mêmes valeurs et centres d'intérêt, généralement autour de l'informatique libre, de l'électronique et de la fabrication. Ce sont des lieux ouverts où le savoir est partagé.

MAKER FAIRE

Né aux États-Unis en 2006, Maker Faire est un événement rassemblant la communauté des makers où, pendant plusieurs jours, les particuliers peuvent présenter leurs inventions et se rencontrer. Il s'en organise un peu partout sur le continent américain, mais également en Europe et en Afrique. L'impression 3D y a une très bonne place, aux côtés de l'électronique et de la robotique. Les entreprises des domaines concernés y participent également.

MODÈLE 3D

Le modèle 3D d'un objet est sa représentation en trois dimensions, réalisée sur ordinateur à l'aide d'un logiciel de modélisation. Sans lui, pas d'impression 3D possible.

MUR

Terme employé en modélisation pour l'impression 3D, le mur désigne la paroi d'un objet. C'est un élément important à prendre en considération, car s'il est trop fin, la pièce ne pourra pas être imprimée.

PLA

Le PLA est l'un des matériaux les plus utilisés par les imprimantes personnelles à dépôt de filament. D'aspect assez similaire à l'ABS, ce plastique biodégradable fond à une température moins élevée (185 °C).

PLATEAU D'IMPRESSION

Le plateau d'impression est la partie plane d'une imprimante 3D sur laquelle repose l'objet en train d'être fabriqué. Il peut être fixe ou mobile, selon le modèle de la machine et la technique utilisée.

POLYAMIDE

Le polyamide, ou poudre de nylon, est le matériau d'impression 3D employé par la technique de frittage laser. Il permet d'obtenir des objets solides et légèrement flexibles, avec un touché de surface granuleux, qui peut être poli.

STÉROLITHOGRAPHIE

La stéréolithographie est l'une des techniques d'impression 3D les plus précises mais aussi les plus chères. Le matériau de base utilisé est une résine liquide qui se durcit au passage d'un rayon laser.

STL

Le STL (*Standard Tessellation Language*) est le format standard de l'impression 3D. Tout modèle 3D doit donc être enregistré dans ce format pour pouvoir être lu par l'imprimante et imprimé.

SYSTÈME DE POSITIONNEMENT 3D

Le système de positionnement 3D d'une imprimante correspond au fonctionnement global de ses axes x, y et z. Selon les machines, seul un axe sera mobile, ou deux, ou bien les trois.

TÊTE D'IMPRESSION

La tête d'impression d'une imprimante 3D (à dépôt de filament fondu ou à frittage laser) est l'élément de la machine permettant de déposer le matériau. Laisson passer la matière en goutte ou en filament, elle vient la positionner sur la couche déjà imprimée.

2PP 23, 24
3D Avenir 177
3D Industries 177
3DP 5, 29, 30, 66
3ds Max 92
3D Systems 5, 6, 29, 51, 75
3DTouch 70
3D Warehouse 96

A

ABS 65, 66, 67
acier 65, 77
d'outil maraging 26, 77
inoxydable 26, 65, 77
aérospatiale 13, 163
AFPR 173, 191
agroalimentaire 165
aide auditive 168
alumide 75
aluminium 76
AMF 98
apprêt de charge 127
Arcam 61
architecture 12, 80, 151
argent 76, 78, 79
arme à feu 142
art 3D 154
ATC 3D 176
ATCube Mini 176
AutoCAD 3D 92
automobile 10, 75, 77, 163
aviation 10, 163, 192

B

bac d'impression 115
béton 13, 65, 80
bijou 107
bijouterie 10, 61, 78, 162
biotechnologie 169
Bits from Bytes 5, 66, 70
Blender 92

bobine de filament 66, 68, 115
Bowyer, Adrian 7, 39
bronze 76, 78

C

CADvision 177
caoutchouc 72
capteur 84
cartouche de matériau 114
CATIA 92
céramique 13, 25, 29, 65, 79, 107
chaîne de production 188
chaussure 162
ChefJet 59
chocolat 82, 166
cinéma 157
d'animation 158
cire 80, 81
perdue 78, 79, 81
CKAB 177, 182
clé à molette 9
Cloud 3D Printing 189
cobalt-chrome 76
composite 69
constructeur français 174
contrôle
des axes 109
du plateau 109
qualité 195
coque protectrice 118
couleur 68, 69, 70
courroie de transmission 109
Creatix3D 177
crowdfunding 147
CRX-4001 177
Cube 48
cuir 166
Cults 179
Cura 108
customisation de masse 185

D

Darwin 7, 39
défense militaire 164
déformation 131
densité 102, 120
dentisterie 10, 60, 71, 166
dépôt
 d'apprêt de charge 127
 de filament fondu 31
dépoussiérage 121
design génératif 162, 185
développement durable 191
Digital Materials 22, 23, 66, 74
Dimension 58
distributeur d'imprimantes français 177
DLP 20
DMLS 25
DOM 176
droits de reproduction 148
D-Shape 80, 153
dureté 74, 76, 106

E

EBDM 28
E-Beam 28
EBF³ 28
EBM 28, 65, 76
échelle
 nanoscopique 23
 Rockwell 77
 Shore 74
écologie 191
effet voxel 81
électronique 84, 165
émaillage 79, 129
enseignement 170
enveloppe 99
EnvisionTEC 20, 22, 72, 73
EOS 26, 56, 63, 77, 79
Erpro 178
ExOne 62, 77
extrusion 110

F

Fab@Home 42, 166
Fab Lab 137
fabrication
 additive 3, 5, 6
 à la demande 15
 en petites séries 6
 sans assemblage 15

FabZat

179
FaceGen 143
FDM 5, 6, 31, 32
FFF 32
figurine 107
filament 31, 32, 66, 68, 69
finition 68, 121, 128
flocage 130
Foldarap 175
Formlabs 49
Fortus 58
FreeSculpt EX1-Basic 176
frittage laser 24, 26, 27, 35
 de métal 123
fromage 82, 166

G

G-code 103
GenerID 177
Grossman, Bathsheba 155

H

habitat imprimé 154
hackerspace 137
Hive3D 177
HiveBot 177
Hull, Chuck 5

I

i.materialise 136
implant 169
impression 3D
 à cire perdue 81, 162
 à dépôt de filament fondu 122
 à jet d'encre 31
 à la demande 15
 de chocolat 82, 166
 de métal 61, 122, 156, 162, 163
 en ligne 136
 grand format 58
 multimatiériaux 12, 23, 194
 par dépôt de matière fondue 31
 par encollage de papier 33
 par liage de poudre 24
 par photopolymérisation 18
 polychrome 12, 70
imprimante 3D 6
 à béton 153
 autoréplicante 39
 caractéristiques 38
 de production 56

grand format 58
personnelle 37, 39, 41, 135
professionnelle 51
industrie
aérospatiale 13, 163
automobile 163
chimique 77
lourde 163
infiltration 123

J

jouet 66, 106, 107

K

Kallisto 177
Kinect 94, 143
KISSlicer 103

L

Le FabShop 177, 183
logiciel de contrôle d'impression 107, 112
Lunavast XG2 51
Lune 80

M

Magics 108
Magics 17 100
MakerBot 43, 70
 Cupcake CNC 43
 Replicator 2 43
 Replicator 2X 44
MakerWare 108
maquette d'architecture 107, 151
masticage 127
Materialise 71, 136
matériau 11, 65, 105, 106
 alimentaire 82
 caractéristiques 106
 composite 69
 dangereux 106
 multicolore 70
 organique 13, 80
 propriétés électriques 106
 propriétés environnementales 106
 propriétés mécaniques 106
 propriétés thermiques 106
 service d'impression en ligne 116
 transparent 71
Maya 92
médecine 166
media space 137

MeshLab 100
métal 62, 63, 76, 77, 78
 précieux 78
MG2 177
Micro M3D 47
MiiCraft 51
Minecraft 139
Mineways 139
MIT Media Lab 80, 85
MJM 31
Mod3ls 179
mode 159
modèle 3D 90, 143
modeleur
 3D 90, 92
 paramétrique 91
 surfacique 90
 volumique 90
modélisation 3D 90
moule 80, 81

N

nanomatériaux 165
NASA 28, 163
Nervous System 91
netfabb Studio 100
nettoyage 121
nickel 28
niveau d'accroche 127
nylon 65

O

Objet 9, 12, 53, 66, 73, 74
Objet24 53
Objet30 53
Objet Connex 57
Objet Studio 108
open hardware 142
OpenSCAD 91
or 76, 78, 79
organe humain 11

P

PA 69
panier d'impression 118
PARC 84
Pearl 176
peinture 68, 128
 acrylique 128
 brillante 128
 glycéro 128

mate 128
Perfactory P3 Mini Multi Lens 55
Phenix Systems 174
photogrammétrie 95
photo-impression 131
photopolymère 18, 22, 23
photopolymérisation 18
PLA 32, 65, 66, 67, 68
plaquage en métal précieux 130
plastique 11, 25, 65, 66
flexible 72
multicolore 69
résistant à la chaleur 72
transparent 71
plateau d'impression 66, 118
platine 78
polissage 75, 77
polyamide 25, 66, 69
polygone 90
PolyJet 22, 66, 70, 71
PolyJet Matrix 22
polypropylène 74
polyuréthane 80
ponçage 124
Ponoko 136
préparation 124
Preumont, Sylvain 64
Printbot 47
Printbot jr 14, 47
procédé Endless 157
Prodways 174
ProJet 52, 55, 66, 71, 75, 81
ProMetal 63, 77, 79
Pronterface 108
prothèse 140
prototypage rapide 5, 6
prototypiste français 178
Prusa Mendel 32, 33, 40
PVA 68

R

raft 102
recherche
médicale 11
pharmaceutique 83
scientifique 171
recyclage 193
réindustrialisation 190
relocalisation 190
RepBio 169
Repetier 108
ReplicatorG 107, 108

RepRap 7, 39, 41
résine 66, 70, 79, 81, 107
transparente 107
résolution 54, 101
Rhinoceros 91, 92
RoHS 106

S

sable 79
scanner 3D 92, 93, 143
à lumière modulée 93
laser 94
optique 93
stéréoscopique 94
Schunemann, Esteban 64
Sculpteo 6, 69, 70, 136, 178
Sedgwick 51
service en ligne d'impression 3D 115, 116, 136
Shapeways 6, 136
simili-ABS 66, 67
site de partage de fichiers 3D 144
Skeinforge 115
SketchUp 91
SketchUp Pro 92
SLA 18
SLA-250 5
Slic3r 103
slicer 101
SLS 24, 27
socle 118
Solid Edge 90, 92
solidification 123
Solidoodle 46
SolidWorks 90, 91, 92
soustraction de matière 3
SPEN Systèmes 177
sPro 64
Stanford Bunny 67
station spatiale 80
stéréolithographie 6, 18, 35
STL 97
Stratasys 5, 6, 31, 32, 54, 58, 66
Stratasys-Objet 51
support 102
système
de positionnement 3D 42
de stockage 114

T

teinture 129
température d'impression 110
temps d'impression 119