Impression 3D
l'usine du futur

Maquette intérieure : Maud Warg

Couverture : WIP_Design

Illustration de couverture : *Gradient aluminium Chair*
Courtesy of Joris Laarman - © Adriaan de Groot

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1er juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

© Dunod, 2016

5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-074684-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).
Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

François **BRUMENT** • Maëlle **CAMPAGNOLI**

Impression 3D l'usine du futur

70 créations innovantes

DUNOD

Imprimons le futur

VALÉRIE MONTANDON
Présidente du Lieu du Design,
Conseillère régionale Île-de-France

STÉPHANE SIMON
Directeur Général du Lieu du design

Les entreprises françaises doivent s'adapter aujourd'hui à la numérisation des systèmes de production. L'impression 3D représente une opportunité sans précédent dont certains grands groupes ont commencé à se saisir. Mais cette nouvelle révolution industrielle, qui se met en place dans tous les pays du monde, doit parvenir jusqu'au tissu des PME/PMI qui souhaitent rester dans la course à l'innovation et notamment par le design.

Conscient que l'impression 3D représente un enjeu créatif, technologique, économique, sociétal majeur pour la France, le Lieu du design, organisme associé de la Région Île-de-France, a décidé de se saisir de ce sujet pour initier et produire la première exposition française d'envergure sur ce que certains qualifient de quatrième révolution industrielle, et de s'associer une nouvelle fois aux éditions Dunod pour la publication d'un ouvrage de référence sur la fabrication additive.

C'est tout un nouvel écosystème qui se met en place, et qui ce faisant, bouleverse les chaînes de valeur de la production manufacturière traditionnelle, mais également notre quotidien, directement impacté par le développement de ces nouvelles technologies.

Aujourd'hui, le marché mondial de l'impression 3D représente 3 milliards de dollars et connaît une croissance de plus de 30 % par an. De l'aérospatial à l'automobile, en passant par l'électronique et le médical, les entreprises sont de plus en plus nombreuses à avoir recours à ces technologies de pointe. Les progrès sont permanents, tant au niveau de la performance des machines que de la variété des matériaux qui peuvent être utilisés. L'or, l'argile et bientôt le verre font partie des dernières avancées et recherches en cours. Évitant l'étape coûteuse et longue de la fabrication d'un moule, l'impression 3D permet notamment d'accélérer la conception et l'introduction sur le marché de petites séries ou encore d'obtenir des prototypes uniques et fonctionnels sur-mesure.

Cet ouvrage, reflet de l'exposition, présente un panorama de réalisations françaises et internationales, ainsi que des projets prospectifs dans de multiples domaines, des origines de l'impression 3D il y a 30 ans, à nos jours. Il révèle notamment les avantages considérables que retirent les entreprises qui font appel aux procédés de fabrication additive, ouvrant ainsi la voie à une refonte complète

des systèmes de la chaîne de conception et de production : gains logistiques, réduction des coûts de fabrication et de matières premières, mais également amélioration de la performance et de la qualité des pièces produites, innovation en matière d'écoconception.

La Région Île-de-France et Le Lieu du Design souhaitent amener les décideurs, comme le grand public, à une prise de conscience qui doit s'avérer déterminante quant aux nouvelles perspectives qu'offre l'impression 3D et à une remise en cause du modèle productif actuel. Au-delà des nouveaux possibles formels, les procédés de fabrication additive offrent des perspectives de relocalisation bien réelles, pouvant permettre le développement d'activités de proximité afin de répondre à des besoins immédiats. C'est une opportunité de développement économique dont les acteurs industriels implantés en région Île-de-France et sur l'ensemble du territoire national doivent se saisir pleinement.

Animés par la volonté partagée de développer des partenariats institutionnels forts, le Lieu du Design et le Centre Pompidou se sont rapprochés pour mener une réflexion commune et unir leurs efforts autour de ce projet d'ouvrage et d'exposition qui se déroulera en plusieurs étapes sur les années 2016 et 2017. Cette collaboration est une première entre deux institutions qui attachent une importance majeure à la valorisation des savoir-faire industriels et à la recherche, et nous nous en réjouissons.

Imprimons le futur : tel pourrait être le mot d'ordre qui réunit aujourd'hui concepteurs, fabricants, designers, usagers et les lecteurs de cet ouvrage.

◀ Affiche de l'exposition « Impression 3D : l'usine du futur » organisée par le Lieu du Design et présentée du 1er avril au 9 juillet 2016.

La créativité individuelle rencontre la créativité collective

SERGE LASVIGNES
Président du Centre Pompidou

Qualifiée de « technologie de rupture » à l'instar d'Internet, du cloud ou encore du *Big Data*, l'impression 3D traverse de nombreux enjeux de la société actuelle, investissant nos modes de consommation et de production. Entre mondes numérique et physique, elle se répercute à toutes les échelles : celle domestique du consommateur individuel ; celle, collective, des makers ou « fabricateurs numériques » ; mais aussi celle industrielle, dans de nombreux domaines (médical, aérospatial, défense, etc.). Elle génère également une nouvelle économie collaborative au sein de laquelle la place même du créateur est modifiée. Son rôle ne se limite plus à produire des objets : il doit penser toute leur chaîne de conception et de production. Entre savoir-faire artisanal et outils numériques, il est aussi impliqué dans un processus de singularisation des objets, concevant qui plus est de nouveaux protocoles de partage avec les usagers, qui peuvent alors intervenir sur un fichier numérique au sein de plates-formes d'échanges d'information pour personnaliser eux-mêmes les produits. Chris Anderson, auteur de *Makers. La nouvelle révolution industrielle,* met à ce titre en avant un « modèle industriel collaboratif ouvert ».

Alors que l'on s'interroge sur les notions d'anthropocène ou d'*oikos* – d'où est issu le terme d'écologie –, l'impression 3D peut conjointement se prêter à une approche durable – avec des matériaux bio-sourcés tels que coquilles d'huître, algues, soja, etc. –, impliquer le recyclage, le refus du gaspillage inhérent aux processus d'usinage, la réduction de l'empreinte carbone et des coûts de transport en privilégiant les circuits d'approvisionnement courts. Elle inciterait ainsi à la relocalisation de la production. Déjà, dans les années 1970, Victor Papanek[1] préconisait de « faire avec moins », tandis qu'au début des années 2000, le concept de *Cradle to cradle – Du berceau au berceau* – défend une économie circulaire de réutilisation des objets, afin de remédier à l'épuisement des ressources matérielles. L'impression de matériaux composites, biomimétiques, et la programmation de la matière ouvrent la voie à la production d'objets auto-adaptables, évolutifs.

Ces changements de paradigme affectent la notion de créativité, à la fois individuelle et collective. La philosophie de l'open source, du *Wiki*, visant à

1 Papanek Victor, *Design for the Real World, Human Ecology and Social Change,* 1984, Thames and Hudson.

l'amélioration des contenus, véhicule de nouvelles formes collaboratives de travail. Comment relier la micro-échelle à la macro-échelle ? L'auto-fabrication de voitures est en cours d'étude aux États-Unis à travers des usines de petite échelle, extension des ateliers de fabrication numérique, où se construiraient des véhicules en open design. La Poste et certains grands magasins ont déjà mis à disposition de leurs clients des imprimantes 3D pour leur permettre de fabriquer des objets. Ces produits sont certes de petite échelle et en plastique, mais ils montrent comment à travers l'impression 3D, les usagers pourront peut-être se réapproprier une maîtrise totale des process. On envisage également à terme une hybridation entre l'accroissement des compétences individuelles à travers l'impression 3D et la production industrielle. Imaginez, au-delà du *co-working*, scientifiques, bricoleurs de tous bords, chercheurs, designers et architectes, interagissant au sein des mêmes plates-formes d'échanges d'information et de production. Toutes ces questions restent ouvertes et détermineront le futur de l'impression 3D.

Le Centre Pompidou est heureux de s'associer à l'exposition *Impression 3D, l'usine du futur* proposée par Le Lieu du design, ainsi qu'à l'ouvrage qui l'accompagne. Notre institution s'inscrit résolument dans un réseau de partenariats tel que celui qui est noué aujourd'hui avec Le Lieu du design. Cette collaboration se concrétisera à travers une autre exposition en 2017 qui se tiendra cette fois au Centre Pompidou, réunissant artistes, designers, architectes. Celle-ci interrogera le statut de l'objet imprimé en 3D, qui est à la fois objet du quotidien, technologique, œuvre d'art, objet de design, prototype d'architecture. Entre conception numérique et matérialisation physique, quel est le mode d'existence, pour reprendre l'expression de Gilbert Simondon, de ces nouveaux objets imprimés ? Déjà, en 2003, l'exposition *Architectures non standard* conçue par le Centre, annonçait l'avènement d'une architecture aux composants sur-mesure et fabriqués industriellement. Pour la première fois, des imprimantes 3D étaient présentées dans un dispositif d'exposition. En 2012, le service design du Musée national d'art moderne organisa un FabLab au Bénin avec le designer Kossi Aguessy.

En 2017, le Centre Pompidou fêtera ses 40 ans. L'utopie architecturale du bâtiment de Piano et Rogers, les grandes expositions transdisciplinaires, dont celles du Centre de création industrielle (qui a fusionné avec le musée au début des années 1990) sont l'ADN du Centre Pompidou, posant des questions de société tout en faisant découvrir au public le plus large la création la plus prospective. Le projet qui nous réunit aujourd'hui y trouve toute sa place : l'impression 3D à travers laquelle la créativité individuelle rencontre la créativité collective.

SOMMAIRE

ÉDITORIAL
Imprimons le futur
Stéphane Simon, Directeur Général du Lieu du Design
Valérie Montandon, Présidente du Lieu du Design 4

AVANT-PROPOS
La créativité individuelle rencontre la créativité collective
Serge Lasvignes, Président du Centre Pompidou 6

INTRODUCTION
De l'écosystème numérique
Conversation avec François Brument,
designer et commissaire de l'exposition 12

REPÈRES
Impression 3D, quelques dates 20

VERS DE NOUVEAUX SAVOIR-FAIRE 22

Introduction 23
Endless Chair DIRK VANDER KOOIJ 25
Expose SIMON ELLISON 27
Solar Sinter MARKUS KAISER 28
Aera Fabrica ROOS MEERMANS 31
Robes Audi A4 ANOUK WIPPRECHT 32
Fractal invention SILVIA WEIDENBACH 34
Plena Luna JAUBALET 35
Or imprimé LIONEL T. DEAN 36
Voxel MIGUEL CHEVALIER 39
Iceberg JONATHAN KEEP 40
Robotic 3D spatial printing LEI YU 41
Pylos, Minibuilder, Mataerial INSTITUTE FOR ADVANCED ARCHITECTURE OF CATALONIA (IAAC) 43
Vulcan pavillon LEI YU & FENG XU 47

SUR-MESURE ET PERSONNALISATION 48

Introduction 49
L'artisan électronique UNFOLD 50
Vase#44 FRANÇOIS BRUMENT 53

Kinematics NERVOUS SYSTEM 54
Cornucopia MARCELO COELHO & AMIT ZORAN 56
Chair#71 FRANÇOIS BRUMENT & AMMAR ELOUEINI 57
L'habitat imprimé FRANÇOIS BRUMENT & SONIA LAUGIER 58
3D print canal house DUS ARCHITECTS 60
Bio Cranium 3DCERAM 64
Doris le Bot BRENDAN DAWES 65

HYPER OPTIMISATION 66

Introduction 67
MX3D bridge MX3D – JORIS LAARMAN 68
Cool brick EMERGING OBJECTS 71
Studies in recursive lattices EZCT ARCHITECTURE AND DESIGN RESEARCH 72
Dreamcatcher Motorcycle Swingarm AUTODESK 73
Falafel IREPA LASER 74
Optimizing structural elements in metal ARUP 75
Bracket MAX VAN DER KOLK 76
Fab forms MARIA SHUGRINA, ARIEL SHAMIR & WOJCIECH MATUSIK 77
VRZ 2 RALF HOLLEIS 78
Hyperform MARCELO COELHO & SKYLAR TIBBITS 80
Zoom MICHIEL CORNELISSEN 81
One shot PATRICK JOUIN 82
7 days, 7 stools THORSTEN FRANCK 84
3D printed house 3M FUTURE LAB 86
Print To Build OLLÉ GELLÉRT 89

NOUVELLES ESTHÉTIQUES 90

Introduction 91
Re-Inventing shoes UNITED NUDE 92
Foliates ROSS LOVEGROVE 93
Chairgenics JAN HABRAKEN 94
Degenarate chair DANIEL WIDRIG 96
Solid PATRICK JOUIN 98
Fractal.MGX STUDIO WERTEL - OBERFELL & MATTHIAS BÄR 101
Quin.MGX BATHSHEBA GROSSMAN 103

MUTATION DES PROCESSUS DE PRODUCTION 104

Introduction 105
3D-printing a lunar base FOSTER + PARTNERS 106

Contour crafting in space BEHROKH KHOSHNEVIS 107
3D Printing in Zero Gravity MADE IN SPACE 108
Sfero FABULOUS 110
Big Delta WASPROJECT 111
Phonak PHONAK 112
Iris 2 SILAMIR – PIXIUM VISION 113

NOUVEAUX MODÈLES ÉCONOMIQUES 114

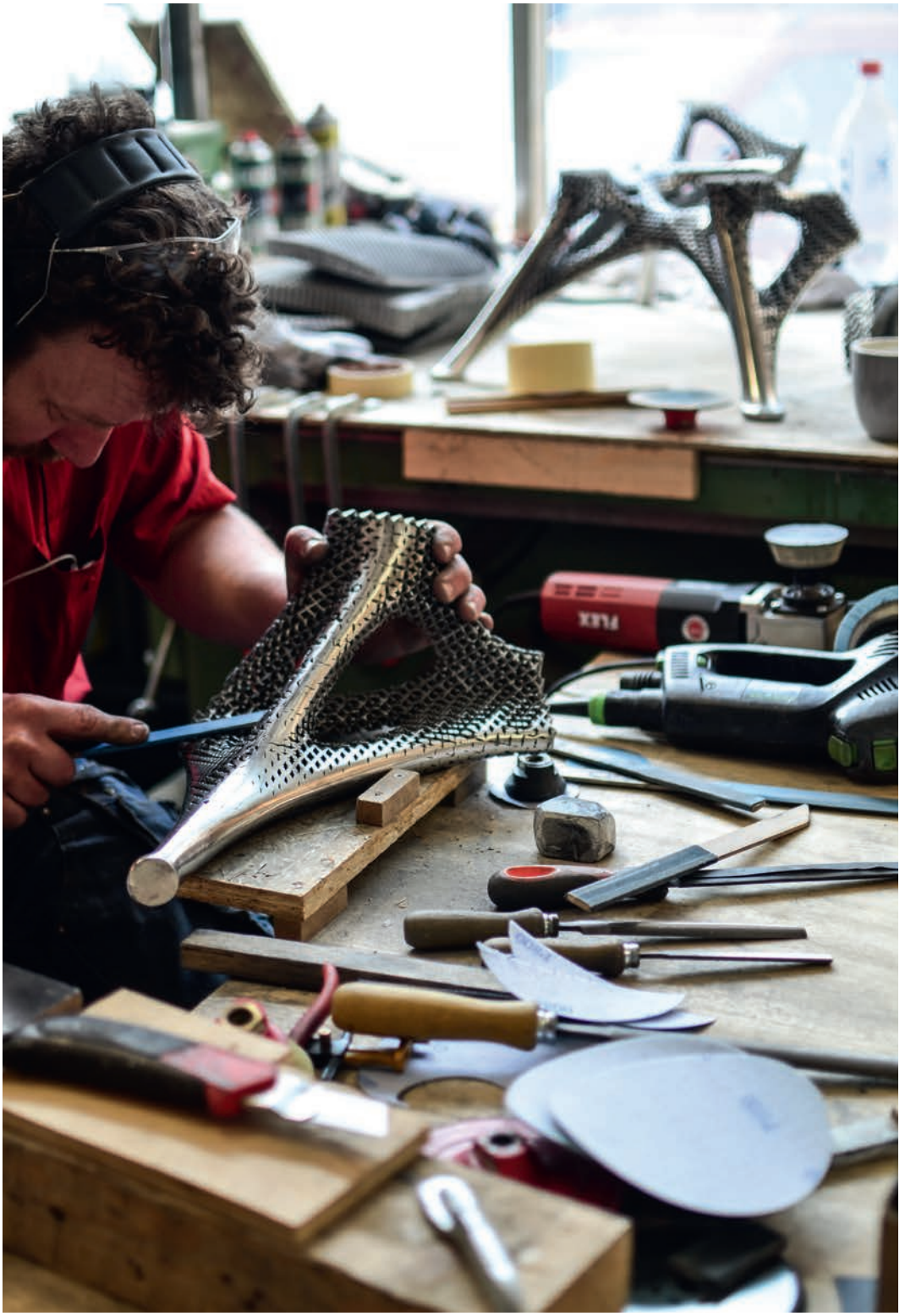
Introduction 115
Armure clutch, Tribù MAISON 203 116
Drôles d'oiseaux FRITSCH-DURISOTTI 117
LM3D Swim LOCAL MOTORS 118
Keystones KUNIKA MAEDA & MARIO MINALE 120
metaformTools STUDIO 7.5 121
Freedom Of Creation JANNE KYTTANEN 122
Bike accessories MICHAEL MUELLER 125
D frame PQ EYEWEAR – RON ARAD 126
Clubs de golf GRISMONT 127

MAKERS, OPEN SOURCE ET DO IT YOURSELF 128

Introduction 129
Rep Rap ADRIAN BOWYER 130
InMoov GAËL LANGEVIN 131
Prothèse COMMUNAUTÉ E-NABLE 132
Free Universal Construction Kit F.A.T. LAB 134
Éléphant SAMUEL BERNIER – LE FAB SHOP 136
Travel Sentry master keys ONLINE MAKERS 137
Open e-components WEILUN TSENG 138
Cloning objects HACKING HOUSEHOLDS 139
+ shelf VERA SHUR 140
3-Pring product SATOSHI YOSHIIZUMI 141
Liberty leading the people DANIT PELEG 142

RESSOURCES

Glossaire 144
Bibliographie 149
Carnet d'adresses 152
Index technique 155
Crédits 156
Partenaires 158



▲ *Gradient aluminium Chair,* design Joris Laarman, 2014.
Détail de postproduction des éléments de structure de la chaise.

De l'écosystème numérique

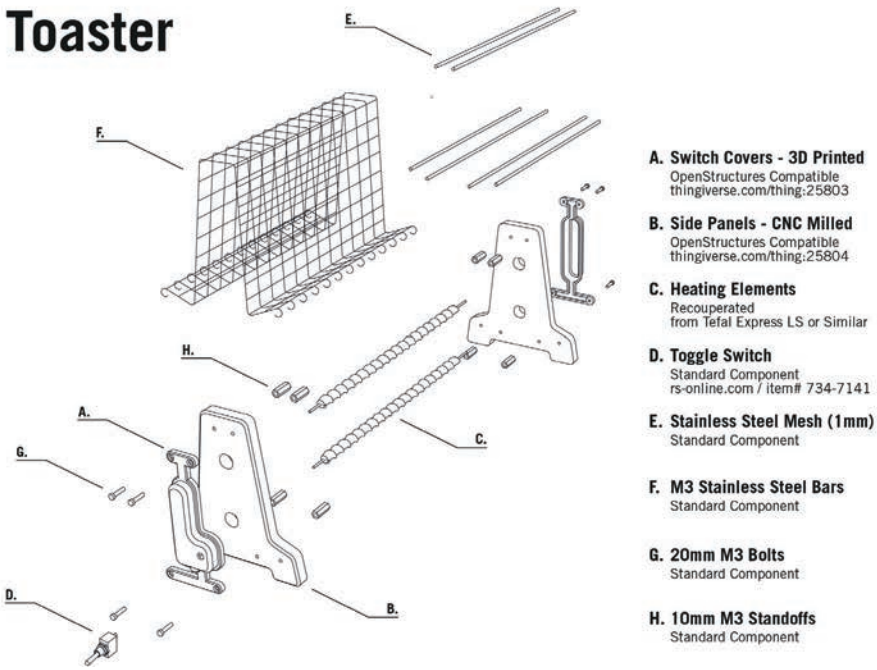
Conversation avec François Brument, designer et commissaire de l'exposition « Impression 3D : l'usine du futur »

« Impression 3D : l'usine du futur » est la première exposition française consacrée à ce sujet. Quel est son propos ?

Je tiens d'abord à préciser que si nous avons choisi ce titre, c'est parce qu'il est générique et grand public. Mais il convient d'ajouter que même si le terme, dans son usage médiatique actuel, renvoie aux technologies de fabrication additive en général, il en qualifie avant tout une parmi celles qui existent aujourd'hui, et qui consiste à solidifier des poudres avec des têtes d'impression jet d'encre. D'où son nom. Ceci étant dit, cette appellation – déposée par le MIT en 1993 – a néanmoins permis de populariser ces pratiques, bien qu'elle n'ait fait émerger que l'infime partie d'un iceberg gigantesque. Aujourd'hui, l'impression 3D est partout : dans les médias, les salons, les écoles, etc. La moindre petite machine de dépôt de fil constitue un événement, presque un spectacle ! Tout le monde en parle. Et tant mieux si cela attire le public. Mais par conséquent, tenter de faire une exposition objective et ambitieuse était important. Objective, parce qu'il s'agit de montrer les utilisations actuelles pertinentes qui sont faites de ces – nombreuses – techniques, ainsi que d'autres beaucoup plus exploratoires, tous domaines confondus. Ambitieuse, parce que les comprendre permet aussi de voir que leur mise en œuvre engage une mutation profonde des paradigmes de conception, production, distribution et consommation établis, et qu'au fond, l'enjeu n'est pas tant celui de l'impression 3D au sens large ou même des modes de fabrication digitale, mais bien celui de la chaîne numérique complète.

Que faut-il comprendre ?

Les procédés de fabrication additive ne vont pas sans la conception assistée par ordinateur, c'est-à-dire sans la chaîne numérique globale. Et c'est en fait tout cet écosystème digital qui est à l'origine de ces mutations et de cette révolution. L'usine du futur prend ses quartiers dans cet environnement nouveau, à toutes les échelles : industrielle et domestique. Le parti de l'exposition consiste donc à prendre ces technologies pour point de départ, à les décrypter ainsi que leurs usages, afin d'explorer ce nouveau monde, et de tenter d'en donner des clés de lecture simples et claires, de façon contextualisée. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les savoir-faire et les méthodologies y occupent une grande place, et que nous avons choisi de présenter les projets autour de thématiques transversales plutôt que disciplinaires. Quel que soit le domaine, la machine fonctionne toujours avec le programme et vice versa. C'est une dialectique permanente.



▲ *Transparent tools,* notice d'assemblage d'un toaster, design Jesse Howard, 2012. Ici, le designer convoque l'impression 3D et le *ready-made* pour permettre à tout un chacun de fabriquer de petits objets électroménagers et contourner ainsi le système de l'obsolescence programmée.

Aujourd'hui, nous nous trouvons à un moment charnière. Les technologies sont extrêmement pointues, mais encore en développement, ce qui ouvre un espace à l'intérieur duquel on peut imaginer des scénarios infinis, où l'on a la possibilité de faire évoluer l'outil en même temps que le projet, même si évidemment, cela nécessite une bonne connaissance des techniques et des logiciels. Cela fait aussi émerger de nouveaux métiers. Parce que l'imprimante 3D qui peut tout faire, avec n'importe quel matériau, dans n'importe quelles dimensions n'existe pas.

En quoi l'écosystème numérique fait-il muter notre paradigme contemporain ?
La seconde révolution industrielle a généré une segmentation des tâches, du travail, une hiérarchisation mais aussi une segmentation sociale. Cette

révolution-là, au contraire crée de la continuité, de la fluidité entre les étapes et les acteurs de la production, et voit émerger une dimension collaborative, et ce, même en dehors du cadre de l'open source. Un processus digital permet de faire travailler tout le monde en même temps et n'importe où, certes à des degrés différents, mais de façon partagée. Ainsi, l'usine du futur englobe de manière transversale la conception, la fabrication, la distribution, et voire même la consommation dans un espace/temps transformé. Une imprimante 3D n'est au fond qu'une autre stratégie de mise en forme de la matière. En revanche, on fabrique à partir d'un fichier, de quelque chose d'immatériel, et qui plus est ubiquitaire, avec Internet. La nouveauté réside donc dans le fait que la chaîne numérique explose, ou en tout cas réorganise, les réseaux de fabrication et de distribution. On peut concevoir un objet à un endroit, adapté aux contraintes d'une technologie spécifique, puis le fabriquer n'importe où dans le monde au coup par coup. L'utilisateur peut soudainement prendre part au processus de création, voire même devenir lui-même fabricant. Un changement de taille ! Le projet comme l'outil peuvent évoluer de manière souple. Or cette notion d'hyper

▲ *Database Lamp,* design Jesse Howard en collaboration avec Kirschner 3D pour Keyshapes, 2014. Les composants de la lampe, imprimés en 3D, peuvent être adaptés aux standards locaux de production juste avant la fabrication.

souplesse est fondamentale parce qu'elle questionne celle du standard, sur laquelle la chaîne de production industrielle repose aujourd'hui, en partie pour des raisons de rentabilité économique, et évolue vers un modèle que l'on peut qualifier d'adaptatif. L'idée de fabriquer un monde simultanément global et local, général et particulier, personnalisé, adapté, hyper optimisé, traverse la quasi intégralité des projets présentés dans l'exposition. De fait, ils remettent aussi en cause nos manières de consommer en proposant par exemple une alternative à l'obsolescence programmée des objets. Au fond, avec la révolution numérique, c'est presque notre modèle sociétal entier qui se transforme !

Cette réorganisation de la chaîne de conception, production et distribution a donc de multiples conséquences. Elle fait muter les savoir-faire, les métiers, les modes de vie, mais est également à l'origine de l'émergence de modèles économiques nouveaux ?

Absolument ! Il y a quelque temps, Amazon, l'un des leaders mondiaux de la distribution en ligne a déposé *amazon3dprinting.com*. Certes, ce n'est qu'un dépôt de nom de domaine, mais symboliquement, cela fait passer l'entreprise de distributeur à fabricant. On peut alors s'interroger : lorsqu'une marque mettra en vente des objets sur ce site, aura-t-elle encore besoin de posséder son propre outil de production ? Et dans ce contexte, si le bien manufacturé ne constitue plus sa source de rémunération, d'où proviennent les profits ? Les designers aussi deviennent des entrepreneurs ! À cet égard, Freedom Of Creation est exemplaire. Lorsqu'il a commencé, le designer Janne Kytannen concevait des objets intelligents par rapport aux technologies disponibles. Puis il a créé des gammes et acheté des machines pour proposer ses produits à la vente, ce qui l'a poussé à développer également un service. Il est donc devenu une entreprise qui a finalement été rachetée par 3D Systems, qui voyait là la possibilité de commercialiser aussi des applications directes de ses propres technologies. D'autres sociétés – c'est par exemple le cas de Phonak, un fabricant d'embouts auditifs –, ont pu optimiser de façon spectaculaire leur fonctionnement ; d'autres encore ont carrément structuré leur activité autour de ces technologies. Et puis il y a la brèche ouverte par l'open source et les modèles collaboratifs où l'on partage les compétences et les moyens à l'échelle mondiale, où l'on développe aussi des services qui peuvent avoir une résonnance politique. Mais encore une fois, c'est la souplesse offerte par l'écosystème digital qui le permet. Et puis open source ne veut pas dire gratuit. Dans le cadre de la fabrication, il y a quand même un coût matière/machine à prendre en compte. Mais c'est un espace qui permet d'explorer des territoires hybrides, alternatifs, qui répondent aussi à des besoins spécifiques, parfois nouveaux.