



Jean-Michel Molenaar • Marion Sabourdy
Préfaces de Neil Gershenfeld et Mickaël Desmoulins

LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE

DÉCOUPEUSES, FRAISEUSES,
IMPRIMANTES 3D...

EYROLLES

SERIAL
MAKERS

La fabrication numérique pour tous

Si les imprimantes 3D demeurent incontestablement les vedettes des Fab Labs, il existe beaucoup d'autres machines à commande numérique tout aussi indispensables pour les makers : découpeuses laser ou vinyle, fraiseuses à bois ou à métal, découpeuses au jet d'eau ou au plasma, machines à broder... Cet ouvrage très illustré dresse un panorama de toutes ces machines en détaillant leurs origines, principe de fonctionnement, pilotage, typologie, applications grand public et industrielles. Émaillé de différents portraits de makers, ce guide pratique fournit aussi une multitude d'infos pour fabriquer soi-même sa machine, afin de rendre la fabrication numérique accessible à tous.

À qui s'adresse ce livre ?

- Aux makers, bricoleurs, designers, artisans, geeks...
- Aux usagers des Fab Labs, makerspaces, etc.

Au sommaire

Introduction à la fabrication numérique – Découpeuses laser – Typologie, fonctionnement et applications • Portrait de maker: Anastasia Sokolnikova • **Découpeuses vinyle** – Typologie, fonctionnement et applications • Portrait de maker: Richard Koppes • **Fraiseuses** – Typologie, fonctionnement et applications • Portrait de maker: Ismael Velo • **Imprimantes 3D** – Typologie, fonctionnement et applications • Portrait de maker: Joris van Tubergen • **Autres machines à commande numérique** • Découpeuses au plasma, au jet d'eau ou à fil chaud • Machines à électro-érosion, à coudre ou à broder • Tours numériques • Bras robotiques • Portrait de maker: Alexandre Dubor • **Conception assistée par ordinateur** – Design paramétrique • Formats de fichiers • Logiciels de CAO • Portrait de maker: Anastasia Pistofidou • **Fabriquer sa propre machine** – Moteurs, roulements, guides... • Électronique • Têtes d'outils • Logiciels • Projets open source • Portrait de maker: Jens Dyvik.

Ancien Fab manager du Fab Lab de Grenoble durant 6 ans, **Jean-Michel Molenaar** est un acteur engagé de la communauté des makers, il a contribué à l'ouverture de nombreux Fab Labs en Europe, en Afrique, au Moyen-Orient et aux États-Unis. *Professor of the practice* à l'université américaine de Tufts où il enseigne l'usage des machines à commande numérique, il dirige également une entreprise de conseil, Fab Connections.

Journaliste scientifique de formation, **Marion Sabourdy** est chargée des nouveaux médias à La Casemate, le centre de sciences de Grenoble. Enseignant la stratégie web à l'Université Grenoble Alpes, elle est aussi responsable éditoriale d'Échosciences, un réseau social autour de la culture scientifique et technique.

Directeur du Center for Bits and Atoms du MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), **Neil Gershenfeld** est le créateur du concept de Fab Lab.

Mickaël Desmoulins est président de l'association Fab&Co, association des managers de Fab Labs professionnels, industriels et business.

LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE

CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

DANS LA COLLECTION « SERIAL MAKERS »

D. KNOX. – **Petits robots à fabriquer.**

N°67575, 2018, 160 pages.

E. BARTMANN. – **Le grand livre d'Arduino (3^e édition).**

N°67488, 2018, 528 pages.

J. BOYER. – **Réparez vous-même vos appareils électroniques (2^e édition).** *À paraître.*

N°67621, 2018, 384 pages.

S. MONK. – **Mouvement, lumière et son avec Arduino et Raspberry Pi.**

N°11807, 2016, 352 pages.

C. PLATT. – **L'électronique en pratique (2^e édition).**

N°14425, 2016, 328 pages.

C. PLATT. – **L'électronique en pratique 2.**

N°14179, 2015, 336 pages.

E. DE KEYSER. – **Le Mavic Pro et DJI GO.**

N°67525, 2017, 208 pages.

E. DE KEYSER. – **Filmer et photographier avec un drone (2^e édition).**

N°67435, 2017, 224 pages.

F. BOTTON. – **Les drones de loisir (3^e édition).**

N°67444, 2017, 230 pages.

R. JOBARD. – **Les drones (3^e édition).**

N°67434, 2017, 184 pages.

M. LAURY. – **À la découverte des cartes Nucleo.**

N°67369, 2017, 280 pages.

C. BOSQUÉ, O. NOOR et L. RICARD. – **FabLabs, etc.** *Les nouveaux lieux de fabrication numérique.*

N°13938, 2015, 216 pages.

A. BANKS, MACUSER et IFIXIT. – **Réparez vous-même votre Apple.**

N°14251, 2015, 146 pages.

Jean-Michel Molenaar • Marion Sabourdy

Préfaces de Neil Gershenfeld et Mickaël Desmoulins

LES MACHINES À COMMANDE NUMÉRIQUE

DÉCOUPEUSES, FRAISEUSES,
IMPRIMANTES 3D...

EYROLLES



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

© Jarek Tuszyński p. 6 • © MIT Archives p. 7 g • © Popular Science p. 7 d • © ASME Milwaukee Section p. 8 • © Tous droits réservés pp. 11, 12, 14 b, 55 b, 127 b, 128 h, 132, 135, 136, 137 • © Marion Sabourdy pp. 13, 15, 18 b, 27, 28 h, 29 h g, 30, 32 b g, 38, 43 • © Nate Main p. 16 • © Jean-Michel Molenaar pp. 18 h, 22 b, 44 h, 55 h, 60, 61, 65, 66 • © Jasper Wallace p. 21 • © Nicolas Dartiailh p. 26 • © Institut Hasso-Plattner p. 28 b • © Jared Tarbel p. 29 h d • © Martin Tomsy p. 29 b • © Guy Sie p. 31 h • © Tinkerlog p. 31 b • © Atelier Figura/Sfondo, photo de Nicolas Berat et Michele Brusasca, p. 32 h • © Utopikphoto pour la Casemate pp. 32 b g, 36 h, 37, 75 • © Olga Mariage p. 33 • © Anastasia Sokolnikova, pp 34 h (photo de Nicolas Géraud) et b • © HP Computer Museum p. 35 • © Eduardo Chamorro p. 39 • © Metalguruschool.com p. 41 • © Mab p. 45 h • © Martin Addison p. 45 b • © Osborne01 p. 46 h • © Richard Koppes p. 47 • © Erik Schermer p. 48 • © wordsun.com p. 49 • © Ismael Velo pp. 50, 73, 74 (photo de Marion Sabourdy) • © ShopBot p. 51 • © V-Carve p. 57 • © Rocketmagnet p. 58 • © Core77.com p. 62 • © eew-protect.de p. 67 • © Jens Dyvic pp. 68 h (photo de Marion Sabourdy pour la droite), 129 h, 146 b, 147 • © Thomas Mouillon p. 68 b • © fablabhouse.com, photo d'Adrià Goula, p. 69 • © Wikihouse p. 70 h • © AKER p. 70 b • © Ted Hall p. 71 h • © Sam Calish / MIT p. 71 b • © Joseph E. Blather p. 76 • © RepRap Project p. 77 • © Formlabs p. 79 • © CharlesC p. 80 h • © NanoSteel p. 80 b • © La Casemate p. 81 h d • © DMG Mori p. 81 b • © Mcor p. 82 h • © 3D Systems p. 82 b • © FilamentOne p. 83 • © 3dprinting.com p. 84 b • © Fibonacci p. 85 • © Widex, photo de Christian Sandström, p. 86 • © Sculpteo p. 87 • © Dizinghof p. 88 • © Benoît Prieur p. 89 h • © Creative Tools p. 90 h • © Mojoptix p. 90 b • © Saul Schleimer, photo d'Henry Segerman, p. 91 h • © Enabling the Future p. 91 b • © Joris van Tubergen p. 92 h • © World Animal Protection pp. 92 b, 93 h • © Wesselvanke UK corvos p. 93 b • © MIT Center for Bits and Atoms p. 95 • © Michael Holden p. 97 b • © foamlinx.com p. 99 • © Alexandre Dubor pp. 100 h, 102, 103 • © Zhejiang Sheen Electromechanic Manufacturing Co., Ltd p. 101 • © Dassault Systèmes pp. 106, 117 h, m h, m b • © Autodesk pp. 107, 116 • © Yug p. 108 h • © TowerOfBricks p. 108 b • © Yorik p. 109 • © IaaC p. 110 • © Blender Foundation p. 112 • © OpenSCAD p. 113 h et m • © Antimony pp. 113 b, 114 h • © Matthew Keeter p. 114 m • © Onshape p. 114 b • © Tinkercad p. 115 • © Robert McNeel & Associates pp. 117 b, 118 • © Anastasia Pistofidou pp. 119, 120 • © Tuomo Tammenpää p. 122 • © Open Source Hardware Association p. 123 • © Creative Commons p. 124 • © Craig Berscheidt p. 126 h • © Linus Helgesson p. 131 h g • © RUMBA dancer p. 131 h d • © andytranft p. 133 d • © MattMoses p. 134 • © Frederic Rible et Norbert Schechner p. 138 h • © Chris Goodwin p. 140 h • © Lasersaur p. 140 b • © Willadams p. 141 h • © ShapeOko p. 141 b • © Farmbot p. 142 h • © Gerard Rubio pp. 142 b, 143 h • © Kniterate p. 143 b • © Andrew White/Re:form p. 144 • © Svein Gunnar Kjøde p. 146 h • © Shutterstock pour toutes les autres figures de l'ouvrage

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 l'autorisation de l'Éditeur ou du Centre Français d'exploitation du droit de copie, 20, rue des Grands Augustins, 75006 Paris.

© Éditions Eyrolles, 2018
ISBN : 978-2-212-14172-6

PRÉFACE DE NEIL GERSHENFELD

FAÇONNER LE FUTUR AVEC LES FAB LABS

Physicien et informaticien, le professeur Neil Gershenfeld est le directeur du Center for Bits and Atoms du MIT (Massachusetts Institute of Technology) à Cambridge aux États-Unis. Ce laboratoire unique en son genre brise les frontières entre les mondes numérique et physique. Il est le créateur du concept du Fab Lab et dirige la Fab Academy, un programme de recherche et d'enseignement des principes et des savoir-faire de la fabrication numérique.

Après les révolutions numériques dans les mondes de la communication et du calcul, nous vivons maintenant une révolution semblable dans celui de la fabrication. Celle-ci complète les deux autres et pourrait même avoir encore plus d'impact, puisqu'elle transpose la programmabilité du monde des bits vers celui des atomes dans lequel nous vivons (NDLR : d'où le nom du Center for Bits and Atoms que Neil Gershenfeld dirige).

Les révolutions numériques dans la communication et le calcul avaient été pressenties par Gordon Moore sur la base de cinq données, qui montraient le doublement du nombre de transistors dans un circuit intégré. Il avait prédit cette tendance pour dix ans, mais ce doublement s'est en réalité poursuivi pendant cinquante années supplémentaires.

La révolution numérique dans le monde de la fabrication peut, elle, être perçue par le doublement du nombre de Fab Labs d'un à plus de mille aujourd'hui. Si l'on se réfère au domaine de l'informatique, les Fab Labs, ces dispositifs de fabrication numérique de la taille d'une salle entière, correspondent aux micro-ordinateurs. Les ordinateurs ont finalement évolué jusqu'à tenir dans une poche, tout cela en même temps que l'évolution d'Internet, des e-mails, des jeux vidéo et des traitements de texte. Et c'est alors que de nouveaux types d'entreprises et d'institutions ont émergé.

Il n'est pas nécessaire d'attendre que la feuille de route de la recherche scientifique aboutisse à des répliqueurs semblables à ceux de Star Trek. Des programmes comme ceux de la Fab Academy, de la Fab Foundation et des Fab Cities contribuent pleinement à cette révolution numérique. Jean-Michel Molenaar a joué un rôle de leader dans la diffusion de ces Fab Labs, aussi bien sur un plan technique qu'organisationnel et pédagogique. Maîtriser les savoir-faire présentés dans ce livre est la voie à suivre pour participer à cette révolution et façonner un futur où tout le monde peut fabriquer (presque) n'importe quoi, n'importe où.

Neil Gershenfeld
<http://ng.cba.mit.edu>



PRÉFACE DE MICKAËL DESMOULINS

LA DISTANCE NOUS RAPPROCHE

Mickaël Desmoulin travaille à la Direction de l'Innovation de l'ingénierie convergée entre Renault et Nissan. Il pilote le Creative Lab interne de Renault, croisement d'un « Fab Lab corporate » et d'un « garage corporate ». Il est également le président de l'association Fab&Co, association des managers de Fab Labs professionnels, industriels et business.

Je me rappelle très bien la première fois que j'ai utilisé une imprimante 3D. Il s'agissait d'une imprimante grand public de bureau, dont la danse et la musique durant le processus d'impression m'avaient totalement hypnotisé. J'étais fasciné de voir cette machine prendre littéralement vie et fabriquer avec une précision numérique ce que j'avais programmé. Cette expérience fut pour moi le début d'une prise de conscience aiguë de la convergence entre le virtuel et le réel.

Contrairement à ce que j'avais pu imaginer, les machines à commande numérique, en tant qu'intermédiaires, m'ont progressivement amené à mieux comprendre le réel et à m'en rapprocher. Que ce soit au travers des propriétés des matières mises en jeu dans la fabrication, de la conception et du fonctionnement de ces machines, ou encore du rôle fondamental des modèles numériques comme outils de représentation de l'intention du projet. Les outils à commande numérique influent sur notre faculté à nous exprimer, à communiquer et à partager, en construisant un langage commun susceptible de réduire la distance entre les individus. Ils modifient notre perception du réel et notre rapport à la réalité, mais également la manière dont naissent nos idées, et en fin de compte notre être profond.

En 1882, le philosophe Friedrich Nietzsche écrivait à un ami qui remarquait que son style avait changé depuis qu'il utilisait une machine à écrire, que les outils d'écriture participaient à l'éclosion de ses pensées. Les outils peuvent ainsi rendre plus fluide le lien cerveau/main ou aider à lever certaines blocages.

Les machines à commande numérique ont ceci de particulier qu'elles systématisent l'acte de confrontation au réel et nous donnent des moyens uniques de mieux le comprendre. La technè aristotélicienne, issue de la Grèce antique, nous explique que le réel ne se laisse pas faire, qu'il faut en quelque sorte se battre contre lui. Ce système de pensée nous explique également que cette interaction, ce dialogue avec la réalité, permet d'aboutir à quelque chose qui nous dépasse et nous transcende, car il contient à la fois ce que nous y avons mis et ce que le réel a apporté quand nous y sommes confrontés. Cette dimension amenée par le réel peut avoir une valeur qui nous échappe dans la mesure où nous ne savons pas vraiment ce qu'est le réel. Les machines à commande numérique nous permettent de garder une trace et une forme de connaissance du réel, qui ne peut s'acquérir qu'en se battant avec lui. Elles

nous offrent l'occasion de transmettre et partager cette intimité qui ne peut normalement s'acquérir qu'à long terme.

À l'ère numérique, on ne considère plus le savoir comme une propriété mais comme une matière à diffuser. Il en est de même pour le savoir-faire qui, grâce au langage de conception fourni par les machines à commande numérique, nous permet d'accélérer les apprentissages et notre propre processus de sédimentation.

Une question subsiste selon moi : au-delà de la maîtrise technique de la fabrication numérique, comment permettre aux talents créatifs de s'exprimer, à la fois dans leur manière de faire et dans l'esthétique de leurs réalisations ? Comment le numérique peut-il laisser cette voie ouverte et ne pas, au bout du compte, la stériliser ? Comment peut-il rapprocher les individus et ne pas les isoler ? C'est l'un des enjeux dont les concepteurs et utilisateurs devront être conscients à l'avenir. Si cet ouvrage peut constituer une première étape, une porte d'entrée dans le monde de la conception numérique, il ne tient qu'à vous de vous confronter à ce réel, avec persévérance et élégance.

Mickaël Desmoulin

<https://www.linkedin.com/in/mickael-desmoulin>

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	1
Une nouvelle révolution industrielle ?	1
Pourquoi ce livre ?	2
Introduction. LA FABRICATION NUMÉRIQUE	5
Origines de la commande numérique par ordinateur	6
Qu'est-ce que tu fabriques ?	9
Chapitre 1. LES DÉCOUPEUSES LASER	11
Petit historique	11
Principes de fonctionnement	12
Les différents types de découpeuses laser	15
Matériaux possibles	16
Faire fonctionner la machine	17
Dessiner des objets	17
Envoyer les fichiers à la machine	17
Trouver les bons réglages.....	18
Ne jamais lancer un long travail sans un test préalable	20
Sécurité et maintenance	20
Optiques et encodeurs	22
Aligner les miroirs et les lentilles	23
Placement, puissance.....	23
Se prémunir des accidents.....	23
Applications de la découpeuse laser	24
Du côté de l'industrie	24
Que pouvez-vous fabriquer ?.....	26
Portrait de maker : Anastasia Sokolnikova	33

Chapitre 2. LES DÉCOUPEUSES VINYLE	35
Petit historique	35
Principes de fonctionnement	35
Les différents types de découpeuses vinyle	37
Matériaux possibles	38
Différents types de vinyle.....	38
Autres matériaux.....	39
Faire fonctionner une découpeuse vinyle	40
Paramètres	40
Ébarbage.....	40
Étape de finition de l'objet.....	41
Sécurité et maintenance	42
Sécurité.....	42
Maintenance.....	42
Applications de la découpeuse vinyle	43
Dessins complexes et multicolores	43
Habillage ou covering	44
Pochoirs, sablage.....	45
Circuits électroniques multicouches	46
Sérigraphie	46
Portrait de maker : Richard Koppes	47
 Chapitre 3. LES FRAISEUSES NUMÉRIQUES	49
Petit historique	49
Principes de fonctionnement	51
Les différents types de fraiseuses numériques	51
Matériaux possibles	52
Bois et matériaux dérivés	52
Plastiques et composites.....	53
Matériaux plus durs.....	54
Faire fonctionner la machine	54
Les différents outils.....	54
Les paramètres d'usinage.....	55
Génération des parcours.....	56
Installation et fonctionnement.....	61
Sécurité et maintenance	63



Attention aux explosions et incendies.....	63
Gardez votre outil en bon état	64
Applications de la fraiseuse numérique.....	64
Applications des petites fraiseuses (mais précises).....	64
Applications des grandes (et puissantes) fraiseuses.....	66
En résumé	72
Portrait de maker : Ismael Velo.....	73
Chapitre 4. LES IMPRIMANTES 3D.....	75
Petit historique	76
Principes de fonctionnement	78
La photopolymérisation.....	79
L'extrusion de matériau.....	79
La projection de matériau.....	80
La projection de liant.....	80
La fusion d'un lit de poudre.....	81
Le dépôt direct d'énergie.....	81
Le laminage de feuilles.....	82
Matériaux possibles pour l'impression 3D.....	82
Faire fonctionner une imprimante 3D	83
Sécurité et maintenance.....	84
Applications de l'impression 3D	86
Applications industrielles et commerciales.....	86
La bio-impression 3D.....	87
Que pouvez-vous fabriquer ?.....	88
Portrait de maker : Joris van Tubergen	92
Chapitre 5. LES AUTRES MACHINES	
À COMMANDE NUMÉRIQUE	95
Les découpeuses au plasma	96
Les découpeuses au jet d'eau.....	96
Les machines à électro-érosion.....	97
Les tours numériques.....	98
Les découpeuses à fil chaud.....	99
Les bras robotiques.....	99

Les machines à coudre	100
Les machines à broder.....	101
En résumé	101
Portrait de maker : Alexandre Dubor	102

Chapitre 6. **LA CONCEPTION ASSISTÉE PAR ORDINATEUR (CAO).....105**

Petit historique	105
Concepts et notions élémentaires.....	107
Pixels ou vecteurs ?.....	108
Les opérations booléennes.....	108
La géométrie de construction de solides.....	109
Design paramétrique	109
Formats de fichiers	110
Logiciels de CAO	111
Logiciels open source	111
Logiciels gratuits.....	114
Logiciels payants	116
À vos logiciels... Prêts ? Partez !.....	118
Portrait de maker : Anastasia Pistofidou	119

Chapitre 7. **FABRIQUER SA PROPRE MACHINE121**

Petit historique de l'open source hardware	122
Moteurs, roulements, guides...	124
Moteurs.....	125
Pièces mobiles	127
Solénoïdes	128
Guides et roulements	129
Électronique	129
Microcontrôleurs	130
Pilotes des moteurs	132
Capteurs.....	133
Têtes d'outils	134
Pour des imprimantes 3D	134
Pour des fraiseuses numériques	135

Pour des découpeuses laser.....	136
Autres têtes d'outils.....	137
Logiciels.....	137
Circuit en boucle ouverte vs circuit en boucle fermée.....	139
Exemples de projets open source.....	139
Imprimantes 3D.....	139
Lasersaur.....	140
ShapeOko.....	141
FarmBot.....	142
OpenKnit et Kniterate.....	142
OpenTrons.....	143
En résumé.....	145
Portrait de maker : Jens Dyvik.....	146
Annexe. TABLEAUX RÉCAPITULATIFS.....	149
Machines.....	149
Logiciels.....	150
Formats.....	154
Matériaux pour la découpeuse.....	155
Index.....	157

Il fut un temps où, lorsque vous aviez besoin d'une table, vous alliez chez le menuisier pour lui expliquer l'agencement de votre salon, le type de bois que vous aimiez et la forme souhaitée. Avec des ciseaux et des lames, des scies et de la colle, l'artisan vous construisait cette table.

Vous pouvez encore y aller. Mais peu le font aujourd'hui.

De nos jours, beaucoup d'entre nous préfèrent se rendre dans des magasins très connus, dont nous taïrons les noms, pour acheter des tables fabriquées à des milliers d'exemplaires, qui contiennent souvent plus d'air par centimètre cube que de bois...

Cette tendance n'est pas due à une faiblesse de notre société, mais résulte au contraire du progrès auquel ont contribué des individus comme Henry Ford. Si la production en grande série n'existait pas, nous serions beaucoup moins nombreux à pouvoir nous offrir certains objets du quotidien.

Pourtant, ce modèle n'est peut-être plus le meilleur pour le monde dans lequel nous vivons, et il n'a pas non plus été développé de la manière la plus saine pour notre planète.

Une nouvelle révolution industrielle ?

Heureusement, depuis quelques années, un grand nombre de lieux ont été créés auxquels (quasiment) tout le monde peut accéder pour fabriquer différents objets à l'aide de machines. Certains sont plus connectés que d'autres, mais tous sont des espaces dédiés à la transformation des idées en objets.

Certains de ces espaces, les Fab Labs, sont nés d'un cours de Neil Gershenfeld, professeur au MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) à Cambridge aux États-Unis, qui y abordait les différentes manières de (presque) tout fabriquer (« *How to Make (almost) Anything* »), en mettant à la disposition de ses étudiants un espace (ou « laboratoire ») de fabrication numérique. Neil Gershenfeld a partagé le contenu de cet espace avec le monde, ainsi que sa vision du design collaboratif et de l'accès libre (*open access*). Ces idées sont arrivées au bon moment, lorsque de plus en plus d'hommes et de femmes du monde entier ont commencé à s'autoproclamer *makers*. Elles se sont rapidement propagées autour du globe, en donnant naissance à de nombreux Fab Labs. Derrière ce cours de Neil Gershenfeld et le développement de ces espaces de fabrication, il y a le souhait, partagé par de nombreux geeks, de créer le « répliqueur » de Star Trek ou toute autre machine qui pourrait créer n'importe quoi,