Claude Barlier
Alain Bernard

FABRICATION ADDITIVE

Du Prototypage Rapide à l'impression 3D

2e édition

DUNOD

Conception graphique de la couverture : Élizabeth Riba
Photo de couverture : © CIRTES

© Dunod, 2015, 2020

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-082171-6

Nous avons fait tout ce qui était en notre pouvoir pour obtenir les autorisations de reproduction nécessaires pour cet ouvrage. Toute omission qui nous sera signalée se verra rectifiée dans la prochaine édition.

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.

Les auteurs

Claude BARLIER



Président du Directoire, fondateur de CIRTES SA
Président d'INORI SAS
Président Fondateur du Pôle VirtuReaL
Membre de l'Académie de Stanislas

Agrégé de génie mécanique de l'ENS Cachan, docteur de l'ENSAM Paris, HDR de l'Université Nancy I, Claude Barlier, spécialisé dans la fabrication additive (FA), dans l'usinage avancé et dans la filière numérique, est Président du Directoire, fondateur de CIRTES SA et Président d'INORI SAS.

Il débute sa carrière, comme professeur agrégé, par une chaire en classes préparatoires aux grandes écoles Math Spé T à Nancy. En 1989, il est nommé professeur de chaire supérieure puis en 1998, il devient professeur des Écoles des mines puis professeur de classe exceptionnelle de l'Institut Mines-Telecom. Dès 1981, à l'ESSTIN, il crée la cellule de projets pour l'industrie, « ESSTIN Industrie », qu'il préside jusqu'en 1992. Dans les années 1980, ses travaux de recherche sont à l'origine du procédé breveté de fabrication additive Stratoconception® et du système breveté de surveillance de l'usinage Actarus®. Plus récemment, il a initié le procédé Pack&Strat.

En 1991, à partir de ses travaux brevetés, il crée et depuis, dirige CIRTES SA à Saint-Dié-des-Vosges, SRC leader dans la fabrication additive et l'usinage avancé.

En 2000, il crée la spin-off Actarus SAS puis, avec Mines Nancy et Mines Albi, il initie l'école d'ingénieur GIP-InSIC, qu'il dirige depuis sa création jusqu'en 2018. En 2010, il crée, avec 20 partenaires industriels et financiers associés, la plateforme d'innovation INORI SAS labellisée au plan national, qu'il préside depuis.

Il est le Président fondateur de VirtuReal, pôle d'excellence européen qui regroupe sur un même site toutes ces structures complémentaires.

Auteur de nombreuses publications, de plusieurs ouvrages de référence et logiciels aux éditions Dunod, Casteilla et Foucher, il a coordonné aux éditions Dunod l'ouvrage collectif Référentiel *Conception en mécanique industrielle.*

Claude Barlier est marié et père de deux filles. Il a été élu membre titulaire de l'académie de Stanislas. Il est Chevalier de la Légion d'honneur, Chevalier de l'Ordre national du Mérite et Chevalier des Palmes académiques.

Alain BERNARD



Professeur des Universités à l'Ecole centrale de Nantes
Vice-président de l'AFPR (Association Française du Prototypage Rapide et de la fabrication additive)
Membre de l'Académie des Technologies
Membre du Collège des conseillers scientifiques et pédagogiques à la DGESIP au ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation

Agrégé de génie mécanique de l'ENS Cachan, docteur de Centrale Paris et HDR de l'Université Nancy I, Alain Bernard, 61 ans, est Professeur des Universités de classe exceptionnelle à l'École centrale de Nantes. Après avoir enseigné comme Professeur Agrégé à l'ENS Cachan (1984-1990), il est recruté comme maître de conférences à Centrale Paris (1990-1996), où il crée en 1991 le CREATE (Centre de prototypage Rapide Européen d'Assistance, de Transfert et d'Expérimentation). Il devient en 1993, vice-président de l'AFPR (Association Française de Prototypage Rapide), puis son représentant au sein de la GARPA (Global Alliance of Rapid Prototyping Associations), communauté dont il reçoit en 2009 l'Academic Carreer Award. De 1996 à 2001, il enseigne comme professeur des Universités à l'ESIAL (École Supérieure d'Informatique et d'Applications de Lorraine), et anime une équipe du Centre de Recherche en Automatique de Nancy. Depuis 2001, il développe des activités liées au génie industriel à l'École centrale de Nantes et au sein de l'Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes, devenu aujourd'hui le Laboratoire des Sciences du Numérique de Nantes (LS2N UMR CNRS 6004). Il a été Directeur de la Recherche de l'École centrale de Nantes de 2006 à 2012.

Alain Bernard est expert pour des organismes nationaux et internationaux. Il est fellow member du CIRP (The International Academy for Production Engineering) et chairman du Collaborative Working Group « Additive Manufacturing ». Il est vice-chairman du TC5 WG5.1 de l'IFIP sur le Global Product Development. Il est membre de l'editorial board de journaux internationaux, en particulier CIRP JMST (associate editor), Rapid Prototyping J, IJ PLM (editor in chief), Virtual and Physical Prototyping J, IJ Rapid Manufacturing. Il a publié plus de 180 articles de journaux et chapitres d'ouvrages scientifiques internationaux et présenté plusieurs centaines de communications en conférences internationales.

Alain Bernard est marié et père de trois enfants. Il est Officier dans l'Ordre des Palmes académiques.

Avec la contribution de :

Jean-Michel MAUCOURT
Ingénieur, conseil technologique
Expert en développement rapide de produit à Ludres (54)

qui a eu un rôle déterminant sur la collecte d'informations et la structuration de parties clés dans l'ouvrage

et de :

Dr Maria AVERYANOVA
Business development manager, AddUp à Cébazat (63)

Philippe BAUER
Coach Fabrication additive et Mechanical Design, Thales Global Services

Stéphane BAUER
Account manager IDF et Nord-Est, FARO France AEC

Éric BAUSTERT
Responsable R&D, VOLUM-e et MMB (3DS Group) à Blangy-sur-Bresle (76), expert matériaux et procédés FA, président UNM 920 et CEN TC 438

Julien BERNARD
Designer produit, VOLUM-e à Blangy-sur-Bresle (76)

Frédéric BEZAULT
Responsable Fabrication – 3D Prod à Raon-l'Étape (88)

Didier BOISSELIER
Responsable Applications et Développements Fabrication additive, IREPA LASER à Illkirch (67)

Pr Vincent BOLY
Professeur à l'ENSGSI à Nancy (54)

Hakim BOUDAOUD
Maître de conférences à l'ENSGSI à Nancy (54)

Luc CEPPETELLI
Agrégé de génie mécanique, directeur délégué à la formation technologique et professionnelle au Lycée Margueritte (55)

Jérôme CINI
PDG Ateliers CINI à Tomblaine (54)

Olivier COISSAC
Responsable de la commission UNM 920 et du comité technique européen de normalisation CEN/TC 438 « fabrication additive »

Denis CUNIN
Ingénieur, responsable CFAO – Numérisation à CIRTES à Saint-Dié-des-Vosges (88)

Pr Arnaud DELAMEZIERE
Professeur Institut Mines-Télécom, LEM 3 (UMR 7239 CNRS-Université de Lorraine), directeur du GIP-InSIC à Saint-Dié-des-Vosges (88)

Dr Benoît DELEBECQUE
Docteur-Ingénieur, responsable Développement informatique à CIRTES à Saint-Dié-des-Vosges (88)

Dr Olivier DELLEA
Docteur-Ingénieur, responsable Plate-Forme 3D Innov, chef de projet Fabrication Additive, Surfaces Nanostructurées, Département des Technologies des NanoMatériaux (DTNM) (38) CEA Tech / LITEN

David DI GIUSEPPE
Ingénieur, responsable valorisation à CIRTES à Saint-Dié-des-Vosges (88)

Thierry DORMAL
Program manager Additive Manufacturing au SIRRIS à Seraing (B)

Dr Manuel FENDLER
Expert Sr Packaging et Intégration microélectronique (HDR), responsable Plateforme Mécatronique MAPP – CEA Tech Grand Est à Metz (57)

Jonathan FRECHARD
Process monitoring manager, BeAM Machines (groupe Addup) à Strasbourg (67)

Prof. Benoît FURET
Professeur des Universités à l'Université de Nantes et chercheur au LS2N UMR CNRS 6004 (44), co-fondateur de la société Batiprint3d

Julien GARDAN
Enseignant chercheur et responsable Fabrication additive à l'EPF de Troyes (10)

Michèle GUIMON
Chef du pôle Risques chimiques, Département Expertise et Conseil Technique INRS à Paris (75)

Marc HEUDE
Responsable Éco-conception, Thales Global Services

Louis-Romain JOLY
Ingénieur, chef de groupe – SNCF – Direction Innovation et Recherche à Saint-Denis (93)

Christian LAVIGNE
Écrivain et artiste multimedia, pionnier de la cybersculpture, président d'ARS MATHEMATICA et co-fondateur d'INTERSCULPT, Paris (75)

Gaëtan LEFEVRE
Rédacteur en chef de la revue A3DM Magazine éditée par G+G Media Groupe SAS

Didier LINXE
Responsable pôle Études & Méthodes CTIF à Sèvres (92)

Catherine LUBINEAU
Directeur technique – UNM – Bureau de Normalisation par délégation d'AFNOR à Paris La Défense (92)

Frédéric MACIELA
Ingénieur-chercheur expert au Laboratoire des Matériels électriques d'EDF R&D, site des Renardières (77), chef de projet sur l'appareillage très haute tension et les matériels de sécurité des réseaux de distribution

Marc MICHEL
Fondateur de M2TECH, responsable des relations industrielles au GIP-InSIC, directeur général INORI SAS

Pascal MORENTON
Directeur de « la fabrique », CentraleSupélec, Université Paris-Saclay, équipe pluridisciplinaire 3D4Care – http://3D4Care.org

Dr Anne-Françoise OBATON
Ingénieur de recherche, Laboratoire commun de Métrologie LNE-CNAM, LNE à Paris (75)

Cosmin PATRASCU
Ingénieur, pôle Risques chimiques, Département Expertise et Conseil Technique INRS à Paris (75)

Dr Cyril PELAINGRE
Docteur-ingénieur, responsable R&D FA et FS à CIRTES à Saint-Dié-des-Vosges (88)

Pr Lionel ROUCOULES
Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes (UMR CNRS 7296), Arts et Métiers ParisTech – Campus d'Aix-en-Provence (13)

Aymeric SPERANDIO
Adjoint opérationnel au chef de département des Technologies des Nouveaux Matériaux (DTNM) (38), CEA Tech / LITEN

Joséphine STECK
Ingénieur HSE Risque émergents, Département des Technologies des Nouveaux Matériaux (DTNM) (38), CEA Tech / LITEN

Georges TAILLANDIER
Président de l'AFPR, ancien responsable FA fonderie et forge, Direction générale de l'organisation industrielle de Dassault Aviation

Jérôme THABOUREY
Ingénieur R&D CETIM Grand Est Mulhouse (68)

Philippe VANNEROT
Business development manager Marchés académiques et R&D, AddUp à Cébazat (63)

Dr Yicha ZHANG
Maître de conférences à l'Université de Technologie Belfort Montbéliard (90)

Remerciements

Cette synthèse est le fruit du travail que nous menons depuis plus de 30 ans avec nos équipes et nos partenaires scientifiques et industriels.

Nous tenons à remercier :

Les équipes InSIC, CIRTES et INORI du pôle **VirtuReaL**
Pour la contribution à la veille et à l'analyse des informations sur la chaîne numérique du développement rapide de produit

et tout particulièrement
Nathalie COLLIN et **Édith DURAND**
Assistantes au CIRTES et au GIP-InSIC, pour leur contribution à la mise en page et au suivi du manuscrit

L'équipe de l'Atelier **VOOVOYEZ**
Ingrid PELAINGRE et **Philippe SPONNE**
Pour le travail de création d'images

L'AFPR (Association Française du Prototypage Rapide et de la fabrication additive), en particulier son Président **Georges TAILLANDIER**
Pour avoir structuré la communauté depuis plus de 20 ans et pour avoir permis, au travers des nombreuses contributions de ses membres, d'enrichir l'ouvrage par la diversité de ses contenus

Et, au travers des contributeurs, les entreprises, instituts, organismes, sociétés savantes suivants :

Académie de Stanislas, Ars Mathematica, AFPR, CEA, CEA Tech, CINI, CIRTES, CPI (Luxembourg), CTIF, École centrale Nantes, Dassault Aviation, ENSAM, ENSGSI, EOS, INRS, IREPA Laser, INORI, InSIC, Institut Mines-Télécom, LNE, Lycée Loritz, Volum-e (ex-MB Proto), Mines Nancy, Mines Albi, Top Solid, Sirris, Thales, Université de Lorraine, UNM, 3A, 3DProd, 3D Systems

À nos épouses, Christine et Nicole, pour leur présence bienveillante à nos côtés, leur soutien permanent et leurs encouragements.
Claude et Alain, septembre 2020

Table des matières

Les auteurs III

Remerciements IX

Avant-propos 1

Chapitre 1 : Le développement de produit : les besoins en maquettes, prototypes et pièces séries 7

1.1 Des premiers outils de la chaîne numérique de conception et de fabrication en mécanique, à la fabrication additive 7
1.2 Notions de produit et de système, pièces et liaisons entre pièces 11
1.3 Étapes de la création industrielle d'un produit – approche séquentielle 13
1.4 Définitions et situation des besoins : maquettes, prototypes, pièces séries 15
1.5 Le besoin pour les pièces de grandes dimensions 19
1.6 Le besoin pour la maintenance industrielle et sa supply-chain 22
1.7 Le besoin de personnalisation des produits 25
1.8 Le besoin d'outils numériques de validation et d'optimisation 25
1.9 Vers une vision systémique de la fabrication additive 27

Chapitre 2 : La fabrication additive : concept de base de la fabrication par couches, définitions, notions de PR – OR – FR 31

2.1 La fabrication additive : définition 32
2.2 Principes généraux de la fabrication additive 33
2.3 Principaux procédés 34
2.4 Principales finalités (PR, OR, FR) et caractéristiques associées 40
2.5 La fabrication additive dans la chaîne numérique du Développement Rapide de Produit (DRP) 44
2.6 La fabrication additive hybride 48
2.7 Conclusion 50

Chapitre 3 : Le rôle majeur de la CAO, la sculpture numérique, la rétro-conception, les formats d'échanges de données dans la chaîne numérique **53**

3.1 Notions de CAO, modèles de base utilisables en fabrication additive 53
3.2 La sculpture numérique : principe, intégration en CAO 61
3.3 La rétro-conception : principe, procédés, utilisations 63
3.4 Les formats d'échanges de données dans la chaîne numérique 69
3.5 L'intégration de la fabrication additive en CAO 91
3.6 Les outils de validation et d'optimisation en FA 94

Chapitre 4 : Le positionnement de la fabrication additive par rapport au prototypage virtuel et par rapport à l'usinage rapide de forme **98**

4.1 Le prototypage virtuel : principe, données d'entrée, liaison avec la CAO, limites, applications 98
4.2 La simulation numérique en conception, en fabrication et dans l'utilisation du produit 103
4.3 L'usinage rapide de forme X axes : chaîne (CFAO – post-processeur – simulation – DCN), limites, applications 108
4.4 L'usinage X axes, moyen de finition des surfaces fonctionnelles pour la FA métal 116
4.5 Conclusion 119

Chapitre 5 : Les 7 procédés de base en fabrication additive : origine – présentation **121**

5.1 Principaux brevets de base 121
5.2 Classification des procédés de fabrication additive 123
5.3 Présentation des différents procédés 124
5.4 Tableau comparatif des différentes familles de procédés 159
5.5 Les techniques de post-traitement et de parachèvement pour les sept procédés de FA 159
5.6 Les procédés émergents 170
5.7 Vers une chaîne de valeur complète – notion de filière 176
5.8 Conclusion 178

Les tableaux des principaux fabricants de machines, pour chaque procédé FA, sont disponibles en téléchargement sur le site dunod.com.

Chapitre 6 : Règles de conception de produit pour la fabrication additive **179**

6.1 Potentiel de la fabrication additive pour la conception et la fabrication des pièces complexes 179
6.2 Principes généraux liés à la conception des produits pour la fabrication additive 183
6.3 Fabrication additive et éco-conception 196
6.4 Réduction de masse et fabrication additive 198
6.5 Conception générative 212
6.6 Simulation de fabrication 212
6.7 Parachèvement de pièces 215

Chapitre 7 : Aide à la détermination des conditions optimales de fabrication en fabrication additive **220**

7.1 Introduction 220
7.2 La demande de planification des processus en fabrication additive 224
7.3 Cadre général d'une ingénierie à base de connaissance pour la planification de processus 225
7.4 Prototype en développement de système d'ingénierie à base de connaissance pour la planification de processus 231
7.5 Conclusion générale 255

Chapitre 8 : Les principales applications industrielles de la fabrication additive **256**

8.1 Les sept technologies et leurs domaines d'application 256
8.2 Les applications « prototypage rapide » 258
8.3 Les applications « outillage rapide » 269
8.4 Les applications « fabrication rapide directe » 281
8.5 Application en maintenance rapide 296
8.6 L'art et la fabrication additive 300

Chapitre 9 : Études de cas de fabrication additive en développement de produit **311**

9.1 Introduction 311
9.2 Étude de cas n° 1 : La fabrication additive au service de la manufacture d'art verrier 312
9.3 Étude de cas n° 2 : La fabrication additive au service du mobilier design 320

9.4 Étude de cas n° 3 : La fabrication additive au service de la fonderie sable 327
9.5 Étude de cas n° 4 : La fabrication rapide au service de l'emballage « Emballage 3D Pack&Strat® » 333
9.6 Étude de cas n° 5 : La fabrication additive au service de nouvelles fonctionnalités – « fabrication additive par le procédé SLM » 343
9.7 Étude de cas n° 6 : La fabrication additive fonctionnalisée – exemple d'outillage instrumenté et monitoré pour le thermoformage 350
9.8 Étude de cas n° 7 : Application de la FA pour la maintenance dans le secteur ferroviaire – étude comparative 354
9.9 Étude de cas n° 8 : La fabrication additive au service de l'orthoprothèse 359
9.10 Étude de cas n° 9 : Application d'une chaîne de CFAAO sous TopSolid'Strato pour la réalisation d'un buste de mesure instrumenté pour EDF et Enedis 370

Chapitre 10 : Démocratisation de la fabrication additive : impression 3D et FabLabs 377

10.1 Introduction 377
10.2 Le FabLab : définition et expansion 378
10.3 Démocratisation et communauté 383
10.4 Un potentiel exceptionnel de production 387

Chapitre 11 : Hygiène et sécurité pour la fabrication additive 393

11.1 L'évaluation des risques… une étape fondamentale et réglementaire 393
11.2 Analyse des sept types de procédés de fabrication additive 395
11.3 Risques principaux associés à la FA 420
11.4 Conclusion 426

Chapitre 12 : Les moyens de contrôle pour la fabrication additive 427

12.1 Contrôle de la conception de la pièce 427
12.2 Contrôle du matériau avant fabrication 428
12.3 Contrôle en cours de fabrication 437
12.4 Contrôle de la géométrie et des dimensions de la pièce après fabrication 441

12.5 Contrôle de la santé matière de la pièce après fabrication – Contrôle métallurgique – CND 444
12.6 Vérification du cahier des charges – Conditions de réception des pièces 453
12.7 Conclusion 455

Chapitre 13 : La normalisation des procédés et des matériaux en fabrication additive 456

13.1 Origines de la normalisation en fabrication additive 456
13.2 Comment fonctionne la normalisation en fabrication additive ? 457
13.3 Principales normes parues et en cours de développement 461
13.4 Conclusions 462

Chapitre 14 : L'offre marché de la fabrication additive, « qui fait quoi » (disponible en ligne sur dunod.com) 463

Le chapitre 14 est disponible en téléchargement sur le site dunod.com.

Bibliographie 464

Sigles utilisés en FA 474

Comment classer les multiples procédés de FA présents sur le marché ? 474

Index 477

Avant-propos

La fabrication additive : pour concevoir et fabriquer autrement

Depuis la parution de la première édition de cet ouvrage, les technologies de **fabrication additive** n'ont cessé de se développer et de montrer leurs capacités à apporter des solutions nouvelles en termes de fabrication d'objets de géométries et de fonctionnalités complexes. La période actuelle est celle de la maturité des connaissances, grâce à de très nombreux résultats de projets collaboratifs mais aussi par des preuves de concepts avérées et prometteuses dans de nombreux secteurs industriels. De ce fait, la fabrication additive a vocation dans un futur proche à poursuivre sa pénétration technique et économique dans la plupart des secteurs de l'économie mondiale. Une forte dynamique est ainsi en place, laquelle s'appuie sur des progrès significatifs en termes :

- d'amélioration de la précision des pièces et, de manière générale, d'une meilleure maîtrise de leurs caractéristiques ;
- d'extension du domaine des possibles par rapport aux principes physiques des procédés et de la taille des objets fabricables ;
- de développement de nouveaux matériaux plus efficaces et mieux adaptés aux spécificités de la fabrication additive et des chaînes de valeur qui l'intègrent.

Récemment, beaucoup ont pris conscience que le succès économique et technologique de la fabrication additive devait être mis en perspective par la création de chaînes de valeur complètes et par une optimisation des conditions de mise en œuvre de chacun des maillons de ces chaînes de valeur. Aussi, les enjeux sont forts mais les chantiers demeurent conséquents pour permettre la diffusion des savoirs et des bonnes pratiques, tout autant que pour assurer la parfaite appropriation des potentiels et des limites de la fabrication additive.

Le potentiel de croissance est fort, mais il est encore freiné par la nécessité de qualifications longues et coûteuses, notamment dans les secteurs où la sécurité est en jeu, comme l'aéronautique ou le médical. Il est également freiné par les craintes des PMI et ETI, face aux évolutions rapides, aux investissements lourds nécessaires pour s'équiper, au besoin de former leur personnel et de mettre au point leur potentiel

technologique. Les spécialistes de la recherche et du transfert de technologie ainsi que les offreurs de technologies l'ont bien compris. Ils structurent leur offre technologique autour de l'innovation, de la qualification industrielle, de la formation et de l'accompagnement, bénéficiant pleinement des dernières avancées de la recherche.

Cette **nouvelle édition, entièrement revue et augmentée,** prend en compte toutes ces évolutions et, au-delà de l'actualisation de données, traite des nouveaux enjeux technologiques auxquels devront répondre les chaînes de valeur basées sur la fabrication additive, tant sur le plan des procédés que sur celui des matériaux et du numérique.

La fabrication additive, et les chaînes de valeurs qui l'intègrent, apportent des solutions à l'ingénieur et au designer d'aujourd'hui, des solutions leur permettant de mieux prendre en compte dès la conception les différents facteurs liés aux phases de la vie du produit, de la saisie du besoin jusqu'à son utilisation, voire sa destruction ou son recyclage. Dans le même temps, l'utilisateur est devenu de plus en plus exigeant quant à l'adéquation du produit à son attente, imposant une approche de diversification et de personnalisation des produits.

Pour satisfaire ces exigences, les produits doivent s'adapter au client, ce qui amène à produire et gérer plusieurs variantes d'un même produit, voire à proposer une possibilité de personnalisation pour ces variantes de produit. De plus, leur durée de vie est de plus en plus courte et les séries produites, pour un même produit, se trouvent très souvent réduites (de l'unité à quelques milliers). Les services études doivent proposer des solutions fiables de conception et de validation produit-process dans des délais, eux aussi, de plus en plus courts.

C'est dans ce contexte de nouveaux enjeux de compétitivité industrielle que sont apparus, au cours des années 1980, les premiers procédés de **prototypage rapide** [1], [2] **(*Rapid Prototyping* ou RP)**.

Le concept de prototypage rapide est alors principalement issu des avancées technologiques simultanées de la CAO 3D, des développements informatiques à partir d'algorithmes géométriques – particulièrement du tranchage virtuel – et de la réalisation de pièces en 3D par ajout de couches superposées de matière. Pour la première fois, il est possible de réaliser directement une pièce réelle de forme complexe intérieure et extérieure directement à partir d'une « image virtuelle » et ceci sans rupture de la chaîne numérique.

Ces procédés nouveaux de « fabrication additive » viennent compléter les capacités qu'apporte la « fabrication soustractive », la fabrication par usinage traditionnel qui, partant d'un brut capable, enlève de la matière jusqu'à obtenir les formes finies. De plus, une hybridation entre les différents procédés de FA mais aussi avec la

fabrication soustractive se développe ces dernières années, particulièrement pour permettre l'obtention de pièces de plus en plus techniques.

Simultanément, les logiciels de simulation et de calcul, puis les systèmes de prototypage virtuel sont devenus des outils numériques puissants permettant de dimensionner la pièce dans son environnement en usage, mais aussi de simuler et de valider son procédé d'obtention.

Il était attendu que les capacités de ces procédés de prototypage virtuel diminuent très vite le besoin, en quantité, de pièces obtenues par prototypage physique. Ceci est très relatif, d'une part, parce que certains phénomènes physiques d'utilisation du produit dans son environnement ne sont pas facilement modélisables et que, d'autre part, les contraintes normatives et le niveau de fiabilité requis dans de nombreux secteurs ont encore fait monter le degré d'exigence en conception/fabrication.

Dans le secteur automobile, par exemple, la tendance est d'utiliser le calcul numérique pour sélectionner, voire éliminer, des solutions avant de valider la ou les solutions retenues par prototypage physique.

Pour les procédés de prototypage rapide, le développement technologique continue à progresser très rapidement du côté des procédés mais aussi du côté des matériaux.

La notion simple de validation de l'aspect esthétique ou de la forme ne suffit plus, le besoin en prototypage est passé de la représentativité maquette à la représentativité « produit/procédé/matériau ».

Dans ce nouveau contexte, les procédés industriels de fabrication et les outillages associés conservent tout leur sens.

Le concept d'**outillage rapide (*Rapid Tooling* ou RT)** est ainsi apparu naturellement dès 1996.

Il s'agit cette fois d'utiliser les procédés de fabrication additive pour réaliser directement des outillages nouveaux, utilisables ensuite par les grands procédés industriels de la plasturgie, de la fonderie, de la mise en forme par emboutissage… par exemple pour la réalisation d'outillages rapides d'injection nécessaires à la production en série de pièces pour la fonderie. Tous les outillages sont aujourd'hui concernés, les résultats industriels les plus rapides ont été obtenus sur les outillages « basse pression/basse température », tels que modèles, pour la fonderie sable, le moulage au contact, le thermoformage… où il est facile d'identifier les procédés de fabrication additive, directement opérationnels.

L'enjeu est encore bien plus important pour ce qui concerne les procédés destinés à la grande série. Dans ce cas, les contraintes sur les outillages sont sévères tant du point de vue mécanique que thermique. Pour répondre à ces exigences, seuls les procédés

de fabrication additive utilisant les matériaux métalliques apportent une réponse industrielle. Les procédés de FA émergents sont principalement le frittage de poudre métallique, la stratoconception métal et la fusion de poudres métalliques. Leurs principaux avantages résident dans la possibilité de mettre en place des systèmes d'aide à la régulation thermique de l'outillage (*conformal cooling*), principalement du fait des possibilités de concevoir et de fabriquer des formes intérieures de complexité importante, dont l'optimisation est obtenue par des simulations numériques. Pour certains des procédés, il est également possible de mieux appréhender la modularité des outillages eux-mêmes (capacité d'intégration de formes intérieures sur une même pièce, grâce à la FA).

Dès la fin des années 1990, les applications industrielles se sont multipliées dans le domaine de la plasturgie, pour l'injection et le soufflage, mais aussi dans celui de la fonderie sous pression et même de la mise en forme par emboutissage.

Plusieurs projets européens de R&D collective ont permis d'obtenir des résultats avancés dans ces domaines.

L'intégration de capteurs est alors devenue possible et, dans ce cas, il s'agit du concept d'**outillage rapide intelligent**. Ces capteurs intégrés, associés à un système d'acquisition et de traitement des informations en continu et à un modèle numérique, permettent de créer une véritable boucle de régulation matériau/outillage/procédé.

La conception des outillages est, par conséquent, fortement remise en cause et c'est bien cette nouvelle capacité qui commence à bouleverser ce domaine traditionnel de la mécanique.

Une des premières conséquences de l'utilisation du concept d'outillage rapide est d'imposer une modélisation CAO numérique totale, non plus seulement de la pièce mais de l'outillage complet pour ses différentes parties.

Le passage d'un simple modèle surfacique de la peau d'une pièce à celui du pilotage de la CN de l'outilleur est devenu de plus en plus limité.

Si cette application d'outillage rapide reste de loin un des domaines les plus porteurs et ne cesse de se perfectionner, une autre voie se dessine depuis plus de vingt-cinq ans, celle de la **fabrication rapide (*Rapid manufacturing* ou RM)**. Une opération qui est **directe** (sans moule, outillage ou modèle intermédiaire), auquel cas la pièce est fabriquée en petite série directement grâce au procédé de FA.

Si la fabrication est indirecte, avec moule ou modèle intermédiaire réalisé avec les machines de FA qui serviront ensuite à fabriquer les pièces finies, on adopte alors un processus tel que défini précédemment, celui du *Rapid Tooling*.

Cette démarche innovante de RM peut s'appliquer avantageusement à de nombreux domaines industriels : du médical, un des précurseurs, à l'armement, l'automobile, l'aéronautique, l'électroménager, l'appareillage électrique, etc. Avantageusement, car il suffit de penser que grâce au RM, la mise au point et la fabrication d'un moule par les moyens classiques gourmands en temps et en argent, deviennent inutiles.

Elle est plus économique en petite série et sur mesure et permet une meilleure adaptation aux fluctuations de la demande, elle est souvent possible localement, ce qui réduit les coûts d'emballage, de transport et d'emmagasinage… Ainsi, le moyen de production est rapproché du lieu d'usage des produits. De nouvelles applications sont aujourd'hui disponibles pour répondre au marché important de la maintenance rapide, particulièrement pour des pièces métalliques.

Malgré le fait que la fabrication directe ne se soit développée que récemment à l'échelle industrielle, et essentiellement pour des produits de petite taille et pour de faibles volumes de production, on peut aujourd'hui inventorier de plus en plus d'applications au regard de son énorme potentiel. Son champ d'application est pratiquement sans fin si l'on envisage une autre manière de concevoir les produits.

Évolutions et perspectives d'avenir

Fabriquer des nouveaux outillages rapides intelligents grâce aux procédés de fabrication additive ou fabriquer directement certains produits par ces mêmes procédés sont les évolutions industrielles majeures des prochaines années : un bouleversement technologique, source de réduction de délais et de coûts, qu'il va falloir prendre en compte dès la conception du nouveau produit dans l'environnement de la CAO. Le lien « CAO-calcul » trouve tout son sens afin de permettre la validation de la topologie nouvelle à définir pour les pièces, topologie permettant la définition de structures moins consommatrices de matière tout en répondant aux contraintes liées à la mise en œuvre et à l'usage du produit. Les enjeux sont considérables dans des domaines où pour des fonctions similaires, une grande diversité de pièces doivent être fabriquées à partir d'une définition numérique directe ou issue d'un procédé de numérisation. La conception de la pièce doit alors tenir compte des conditions de mise en œuvre de la fabrication additive future de l'objet, et ainsi permettre de relier les caractéristiques attendues de l'objet après fabrication avec les conditions de mise en œuvre de la fabrication. Les dernières avancées technologiques à fort potentiel dans le domaine du numérique résident dans l'intégration logicielle de la conception pour la fabrication additive, la CFAAO (conception pour la fabrication additive, assistée par ordinateur).

En parallèle de la croissance de la fabrication directe en production industrielle, au-delà des gains de temps et de la diminution des coûts de conception obtenus tout au long de la phase de développement d'un nouveau produit, l'outillage rapide continue d'être une voie incontournable pour des séries moyennes et grandes, avec la possibilité d'optimiser le couple matériau-procédé en vue de réaliser l'outillage final le plus performant possible. L'une des évolutions en cours offre la possibilité de réaliser des outillages de grande série à partir des techniques d'outillages rapides. Cette évolution est déjà une réalité – ou est en passe de le devenir – pour un certain nombre de procédés de production et pour la réalisation d'un certain nombre de pièces. De nombreux progrès sont néanmoins encore nécessaires pour parvenir pleinement à cet objectif.

Mais de par leur capacité à réaliser des formes complexes internes ou externes et grâce à leur principe d'addition de matière, les procédés de fabrication additive peuvent ouvrir de nouvelles opportunités, celles de réussir enfin à adapter de manière optimale l'outillage aux exigences des pièces à produire.

Les procédés d'impression 3D

Ces dernières années, les fabricants de machines ont développé, pratiquement à partir de tous les procédés de fabrication additive, des solutions dites « d'impression 3D », accessibles à des TPE, voire au grand public. Par conséquent, il n'y a pas un seul procédé d'impression 3D mais simplement des machines qui utilisent l'un ou l'autre des sept procédés de fabrication additive. Le modèle marketing économique devenant le consommable, comme dans le domaine de l'impression papier classique.

La fabrication additive, qui permet de concevoir et fabriquer autrement, ouvre de manière considérable le champ des possibles pour les ingénieurs et designers en conception-fabrication de produits industriels et pour les créateurs d'objets. Dans le même temps, elle impose l'acquisition de nouvelles compétences aux prescripteurs et utilisateurs de ces nouveaux outils.

Cet ouvrage souhaite couvrir de nombreux points liés à cette évolution. Son contenu apporte des pistes de solutions pour les différentes étapes du développement rapide de produit. L'intérêt des technologies de FA est de proposer des solutions différenciantes à forte valeur ajoutée dans un contexte socio-économique toujours plus exigeant, tout en étant respectueux de l'environnement et de la santé des personnes qui apportent les compétences indispensables au développement et à l'achèvement de produits fonctionnels et de qualité.

1 Le développement de produit : les besoins en maquettes, prototypes et pièces séries

À partir de la fin des années 1980, les outils dits de prototypage rapide ont radicalement modifié les processus de création industrielle. Ce premier chapitre retrace l'historique des outils de conception numérique et leur intégration dans la création industrielle d'un produit.

1.1 Des premiers outils de la chaîne numérique de conception et de fabrication en mécanique, à la fabrication additive

1.1.1 La naissance des premiers outils de la chaîne numérique de conception et de fabrication

Une rapide rétrospective de l'évolution des outils de conception et de fabrication depuis les années 1970 jusqu'aux années 1990 permet de comprendre comment l'industrie manufacturière à forte dominante mécanique est passée de processus linéaires, séquentiels et très hiérarchisés, à une intégration des outils de conception et de fabrication dans une chaîne numérique, avec une approche d'ingénierie simultanée.

Dans l'industrie, jusqu'en 1970, on peut dire, pour être simple, que :

- la conception des produits se fait à partir de plans 2D sur table à dessin avec calques et instruments, les règles sont celles du dessin technique ;
- la géométrie descriptive est le seul outil mathématique qui permet de réaliser un tracé avec rigueur ;
- il est difficile de réaliser graphiquement la représentation d'un produit en perspectives 3D, c'est souvent la perspective cavalière qui est retenue ;
- la création est presque toujours issue de l'imagination à partir d'un plan en coupe 2D du mécanisme ;

- les prototypes et les modèles sont réalisés manuellement par des ébénistes, des modeleurs ou par des maquettistes ;
- les outillages sont fabriqués par les procédés conventionnels de tournage et fraisage qui génèrent des plans et des surfaces de révolutions, la finition est manuelle ;
- la production est ensuite réalisée en série à partir de ces outillages ;
- le processus est linéaire, séquentiel et très long…, des mois, voire des années…

En conclusion, il faut très souvent attendre la sortie des pièces en production pour vraiment visualiser le produit. À ce stade ultime, il n'est plus possible d'apporter des modifications, le produit et la créativité sont figés. Le produit est donc contraint par son procédé de fabrication et le marché achète les produits fabriqués.

C'est dans les années 1970 que les premiers outils numériques d'aide à la conception et à la fabrication arrivent dans les bureaux d'études, aux méthodes et dans les ateliers :

- les sociétés de développement informatique et les éditeurs proposent les premiers logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO) 2D puis de conception assistée par ordinateur (CAO) 3D ;
- la simulation numérique est à ses débuts, le plus souvent elle permet de vérifier le comportement sous charge d'une structure de géométrie imposée, elle n'est pas encore utilisée pour dimensionner une pièce ;
- les premières commandes numériques permettent aux machines-outils de déplacer simultanément 2 axes dans l'espace, les premières trajectoires dans le plan sont possibles ;
- les logiciels permettent de programmer les commandes numériques des machines, manuellement au clavier, à partir des plans papier en 2D ;
- les premiers logiciels de Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) apparaissent, ils permettent de programmer une trajectoire dans le plan, à partir de sa définition mathématique géométrique.

Dans les années 1980, l'offre CAO/FAO se structure et les premiers logiciels de FAO deviennent opérationnels pour piloter les Machines-Outils à Commande Numérique (MOCN) en 3 axes.

Les premiers systèmes de numérisation 3D sont développés dans les laboratoires.

Dans les années 1985, les premiers logiciels de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO) relient directement CAO et FAO et les premières surfaces complexes sont réalisables sur des machines-outils à commande numérique 3 axes simultanés, puis 4 et 5 axes positionnés et enfin en 5 axes simultanés. C'est seulement à cette époque qu'il est possible de mettre en place une véritable chaîne numérique continue, de la conception à la fabrication d'une pièce en mécanique.

La limite apparaît très vite, si les surfaces de formes complexes sont possibles, seules les formes accessibles aux outils sont réalisables par ce type de procédé de fabrication par usinage dit « soustractif ».

De plus, l'usinage de la pièce doit se faire à partir d'un brut « capable » – qu'il faut approvisionner – et qui nécessite plusieurs reprises successives, c'est-à-dire plusieurs posages, donc plusieurs montages d'usinages spécifiques. Ces montages doivent préalablement être étudiés et réalisés.

Tout ce travail fait appel – encore aujourd'hui – à une équipe d'ingénieurs et techniciens très compétente dans un environnement de bureau d'études et d'atelier.

1.1.2 L'origine du concept de prototypage rapide : la fabrication additive

C'est seulement à la fin des années 1980, qu'à partir du besoin de réaliser des pièces de plus en plus complexes, émerge le concept de prototypage rapide (PR).

À cette époque, ce concept est alors rendu possible par le niveau simultanément atteint par les technologies de base :

- les bases mathématiques de la modélisation géométrique 3D ;
- la performance des modeleurs de la CAO volumique ;
- les premiers algorithmes de tranchage virtuel d'un modèle géométrique ;
- la puissance des calculateurs,
- la commande numérique simultanée des axes de déplacement des machines dans l'espace 3D ;
- les travaux de recherche sur la mise en forme de matériaux en couches.

Pour la première fois, il est possible de fabriquer directement et numériquement des pièces 3D avec des formes complexes intérieures et extérieures, sans rupture de la chaîne numérique, à partir du tranchage virtuel du modèle numérique de la pièce puis de sa reconstitution physique par addition de couches à base de matériaux à l'état initial liquide, solide ou sous forme de poudre.

Le concepteur prépare la création d'une pièce en CAO sur son écran d'ordinateur, procède au tranchage virtuel puis pilote directement sa fabrication 3D en couches, sur une machine de prototypage rapide (voir § 2.1).

À partir des années 1990, le concept émerge dans le monde, différents brevets nouveaux sont déposés et les machines arrivent sur le marché. Dès 1995, la typologie de ces procédés est présentée à partir d'un document proposé par l'ADIT (Agence de Diffusion des Informations Technologiques) [1].

Depuis 1996, plusieurs ouvrages [2-4], décrivent les procédés de prototypage rapide et leurs applications.

Les applications se multiplient d'abord pour permettre la réalisation de maquettes et de prototypes mais aussi des œuvres d'art. Les premiers systèmes de numérisation 3D arrivent sur le marché.

C'est dans les années 2000 qu'apparaît la première extension du concept vers l'outillage rapide. Cette fois, il est possible de réaliser directement des outillages par les procédés de PR, afin d'obtenir des préséries de pièces en bonne matière, à partir des grands procédés industriels lourds.

Une deuxième extension du concept apparaît presque simultanément et de manière naturelle : la fabrication rapide ou fabrication directe. Cette fois, l'idée est de fabriquer directement des pièces série, à partir des procédés de prototypage, sans aucun autre procédé de mise en forme. La créativité se libère, c'est la performance et la personnalisation du produit qui priment. L'industrie fabrique les produits attendus.

La diversification des besoins et l'évolution des machines vont ensuite faire émerger très vite les « imprimantes 3D professionnelles » qui rendent ces outils accessibles aux bureaux d'études et aux petites entreprises.

Dans le même temps, aux États-Unis, un physicien du MIT imagine et propose des ateliers de fabrication qui s'ouvrent quasi librement au public – ou plutôt à certains publics ciblés –, c'est le concept de « FabLabs » ou « laboratoires de fabrication ». Ces ateliers se sont ensuite très vite développés pratiquement partout dans le monde.

Ces années dernières apparaissent des machines encore plus légères, disponibles en vente directe en kit sur Internet : « les imprimantes 3D personnelles ».

Aujourd'hui, tous ces procédés sont regroupés sous le vocable de « fabrication additive », un comité de normalisation est en place. Tous les pays s'en préoccupent et de nombreux observateurs ont identifié une véritable révolution industrielle irréversible. Depuis quelques années, tous les médias se sont emparés du sujet.

Des équipes de recherche travaillent partout dans le monde sur les matériaux et sur les procédés de fabrication additive mais aussi sur les composantes logicielles et technologiques indispensables pour l'utilisation pérenne robuste de la fabrication additive.

Toutes ces notions sont reprises dans les pages et chapitres suivants.