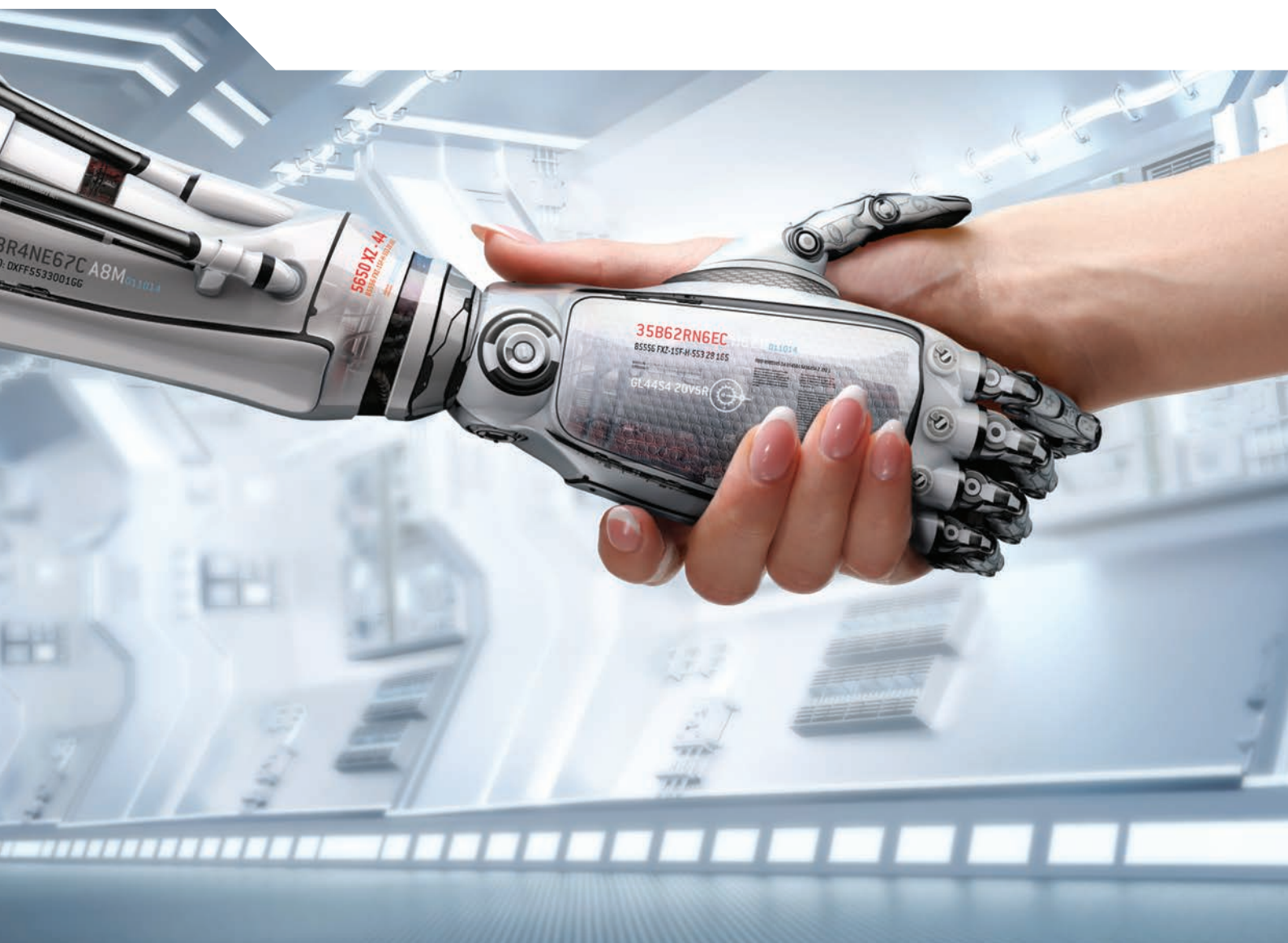




La prochaine révolution de la production

CONSÉQUENCES POUR LES POUVOIRS PUBLICS
ET LES ENTREPRISES



La prochaine révolution de la production

CONSÉQUENCES POUR LES POUVOIRS
PUBLICS ET LES ENTREPRISES

Le texte du présent rapport, à l'exception des chapitres 2 et 5, a été déclassifié par le Comité de la politique scientifique et technologique (CPST) le 17 avril 2017 selon la procédure écrite. Les chapitres 2 et 5 ont été déclassifiés selon la procédure écrite, respectivement le 12 février 2017 par le Comité de la politique de l'économie numérique et le 30 janvier 2017 par le Comité des politiques d'environnement. La version pour publication du rapport a été préparée par le Secrétariat de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues officielles des pays membres de l'OCDE.

Ce document, ainsi que les données et cartes qu'il peut comprendre, sont sans préjudice du statut de tout territoire, de la souveraineté s'exerçant sur ce dernier, du tracé des frontières et limites internationales, et du nom de tout territoire, ville ou région.

Merci de citer cet ouvrage comme suit :

OCDE (2018), *La prochaine révolution de la production : Conséquences pour les pouvoirs publics et les entreprises*, Éditions OCDE, Paris.

<http://dx.doi.org/10.1787/9789264280793-fr>

ISBN 978-92-64-28078-6 (imprimé)

ISBN 978-92-64-28079-3 (PDF)

ISBN 978-92-64-28081-6 (ePub)

Les données statistiques concernant Israël sont fournies par et sous la responsabilité des autorités israéliennes compétentes. L'utilisation de ces données par l'OCDE est sans préjudice du statut des hauteurs du Golan, de Jérusalem-Est et des colonies de peuplement israéliennes en Cisjordanie aux termes du droit international.

Crédits photo : Cover © Willyam Bradberry/Shutterstock.com.

Les corrigenda des publications de l'OCDE sont disponibles sur : www.oecd.org/editions/corrigenda.

© OCDE 2018

Vous êtes autorisés à copier, télécharger ou imprimer du contenu OCDE pour votre utilisation personnelle. Vous pouvez inclure des extraits des publications, des bases de données et produits multimédia de l'OCDE dans vos documents, présentations, blogs, sites Internet et matériel d'enseignement, sous réserve de faire mention de la source OCDE et du copyright. Les demandes pour usage public ou commercial ou de traduction devront être adressées à rights@oecd.org. Les demandes d'autorisation de photocopier une partie de ce contenu à des fins publiques ou commerciales peuvent être obtenues auprès du Copyright Clearance Center (CCC) info@copyright.com ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC) contact@cfcopies.com.

Préface

Chaque jour ou presque, nous entendons parler d'une nouvelle percée technologique, que ce soit dans le domaine de l'intelligence artificielle, de l'impression 3D ou de la conduite automatisée. Nous entrons véritablement dans l'ère de la « fabrication numérique » et de la « quatrième révolution industrielle ». C'est donc un plaisir que de présenter l'étude intitulée *La prochaine révolution de la production : conséquences pour les pouvoirs publics et les entreprises*, dans laquelle l'OCDE analyse de manière approfondie les implications que les technologies nouvelles et émergentes auront à moyen terme pour l'économie et l'action des pouvoirs publics.

Toute évolution de la production rejaillit sur la productivité, l'emploi, les compétences, la répartition des revenus, les échanges, le bien-être et l'environnement. La prochaine révolution de la production influera donc de façon déterminante sur l'action des pouvoirs publics. Il est difficile en effet de nommer ne serait-ce qu'un grand domaine d'intervention qui sera épargné. De la recherche à l'enseignement, en passant par la sécurité des données et les infrastructures, l'avenir de la production occupe à maints égards une place centrale dans les travaux de l'OCDE.

Les nouvelles technologies de production sont en train de redéfinir la disponibilité et la nature du travail. Il est donc important que les stratégies d'inclusion reposent sur une bonne compréhension de ce mécanisme. En fait, les nouvelles technologies de production créent un lien entre la productivité et l'inclusivité. C'est une problématique à laquelle l'OCDE accorde un intérêt prioritaire, car avec la multiplication des défis dus au vieillissement démographique, les pays membres de l'Organisation vont avoir besoin des gains de productivité que promettent ces technologies. Il faut surtout que les travailleurs soient dotés des compétences voulues pour les employer et que les politiques poursuivies soient conçues de manière à ce que les économies et les sociétés parviennent à s'adapter aux ajustements nécessaires.

Depuis cette année, l'OCDE s'intéresse de plus près à la transformation numérique de l'économie et de la société. Le présent rapport montre à quel point le numérique imprègne la production et y joue un rôle important, mais aussi combien son incidence pourrait être plus grande encore s'il était plus largement présent. Ce constat vaut aussi pour des domaines qui ne sont pas habituellement classés parmi ceux du numérique, comme la biotechnologie industrielle et les nouveaux matériaux.

Les nouvelles technologies de production auront également une incidence sur notre action à l'égard du changement climatique et de l'environnement naturel. Elles pourraient influencer favorablement sur l'environnement de différentes manières très intéressantes : impression industrielle de produits à partir de matériaux écologiques, écriture d'un code génétique permettant à des micro-organismes de produire des carburants, réduction sensible de la production de déchets dans des usines « zéro défaut ».

La prochaine révolution de la production touche aussi à la question de la confiance accordée aux pouvoirs publics. Si l'opinion manifeste une certaine résistance à l'égard des nouvelles technologies, c'est parce que les autorités scientifiques et réglementaires sont tombées en discrédit. Or, il importe tout particulièrement de pouvoir leur faire confiance à l'heure où certaines technologies nouvelles sont à l'origine de perturbations d'ordre économique ou social. À ce propos, le présent rapport offre une réflexion sur certaines exagérations qui entourent les nouvelles technologies de production.

Un autre point marquant de ce rapport est l'analyse détaillée qu'il donne de l'évolution de la situation en Chine. L'OCDE a travaillé sur la prochaine révolution de la production en collaboration étroite avec la Chine alors que ce pays assumait la présidence du G20. Bien qu'il lui reste de nombreux obstacles à surmonter, tout ce que la Chine réalisera rejallira sur le reste du monde.

Enfin, dans le sillage des travaux de l'OCDE sur les Nouvelles approches face aux défis économiques (NAEC), la multidisciplinarité reste essentielle pour saisir la réalité du monde dans toute sa complexité. Les nouvelles caractéristiques de la production qui sont communes à plusieurs technologies sont également exposées sous plusieurs angles de l'action publique et à partir de différents éléments et analyses. Mieux les gouvernements comprendront les ressorts de l'évolution de la production, plus ils seront à même de s'attaquer aux nouveaux défis et de réaliser les objectifs fixés dans les sphères économique, sociale et environnementale.



Angel Gurría

Secrétaire général de l'OCDE

Avant-propos

Au début de l'année 2015, l'OCDE a donné le coup d'envoi au projet Créer les conditions de la prochaine révolution de la production, afin de parvenir, sur une période de deux ans, à mieux appréhender les retombées probables sur l'économie et l'action des pouvoirs publics qu'auront un ensemble de technologies susceptibles de révolutionner la production à moyen terme.

Ces travaux ont pu être entrepris grâce au soutien financier du Fonds central pour les projets prioritaires du Secrétaire général. Ils bénéficient également des généreuses contributions volontaires de l'Australie et du Royaume-Uni. La Norvège, dont le soutien a permis d'élargir le périmètre du projet, mérite des remerciements tout particuliers. Il convient aussi de remercier la Suède, plus précisément le ministère des Entreprises et de l'Innovation et l'agence nationale pour l'innovation, Vinnova, d'avoir co-organisé et accueilli à Stockholm, en novembre 2016, une grande conférence sur l'industrie intelligente et la prochaine révolution de la production (*Smart Industry: Enabling The Next Production Revolution*). À cette occasion, les décideurs, praticiens et universitaires ont examiné et approfondi les analyses et plans d'action à mener autour des thèmes abordés dans le présent rapport. Les enregistrements vidéo de la conférence sont consultables sur le site www.vinnova.se/en/misc/Smart_Industry_Conference/.

En raison du caractère transversal des travaux sur la prochaine révolution de la production, les chapitres de la publication ont été examinés et leur diffusion autorisée par les différents comités concernés de l'OCDE, à savoir le Comité de la politique scientifique et technologique (chargé de chapeauter le projet) ; le Comité de l'industrie, de l'innovation et de l'entrepreneuriat, le Comité de la politique de l'économie numérique et le Comité des politiques d'environnement. Les observations et suggestions formulées par les délégués à l'intention de ces organes officiels de l'OCDE ont été reçues avec gratitude. Au sein du Secrétariat de l'OCDE, le projet a été piloté par la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation. Un rapport intermédiaire contenant une ébauche des messages à adresser aux pouvoirs publics a été examiné par le Comité exécutif et le Conseil de l'OCDE, puis présenté à la Réunion du Conseil de l'OCDE au niveau des Ministres, en juin 2016.

Ainsi qu'exposé dans ce rapport, de nombreuses recherches pertinentes pour l'action des pouvoirs publics restent encore à faire pour étudier la nature changeante de la production. De plus amples informations sur les travaux que l'OCDE consacre à ce thème seront mises en ligne à l'adresse <http://oe.cd/npr-industry>. Par ailleurs, un certain nombre des questions soulevées dans le rapport en lien avec les technologies numériques seront examinées tout au long de 2017 et 2018, sur la base de nouvelles données dans le cadre du projet de l'OCDE intitulé *Vers le numérique : pour une transformation au service de la croissance et du bien-être*. Des informations actualisées sur ce projet sont disponibles à www.oecd.org/sti/goingdigital.htm.

Remerciements

La publication de cet ouvrage a été dirigée par Alistair Nolan, de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE, qui est également l'auteur du chapitre 1 (« La prochaine révolution de la production : principaux enjeux et propositions d'action »).

Merci à Luis Agosto Alcorta, Adot Killmeyer-Oleche et Ayumi Fujino de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), pour les données sur les pays en développement utilisées dans le chapitre 1.

Le chapitre 2 (« Avantages et défis de la transformation numérique de la production ») a été rédigé par Christian Reimsbach-Kounatze, de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE.

Merci à Robert Cohen, de l'Economic Strategy Institute, pour l'étude de cas utilisée dans le chapitre 2.

Le chapitre 3 (« Bioproduction et bioéconomie ») a été établi par la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE.

L'auteur du chapitre 4 (« Exploiter le potentiel des nanotechnologies pour préfigurer la prochaine révolution de la production ») est Steffi Friedrichs, de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE.

Le chapitre 5 (« L'impression 3D et ses conséquences environnementales ») a été rédigé par Jeremy Faludi (Principal, Faludi Design, Université de Californie, Berkeley et Minneapolis College of Art and Design), en collaboration avec Natasha Cline-Thomas et Shardul Agrawala de la Direction de l'environnement de l'OCDE. Ils savent gré à Peter Börkey, Andrew Prag, Matthias Kimmel et Elisabetta Cornago d'avoir concouru à l'élaboration de ce chapitre sur le fond et sur la forme.

La rédaction du chapitre 6 (« Révolutionner la conception et le fonctionnement des produits grâce à l'innovation dans les matériaux ») a été confiée à David L. McDowell, *Regents' Professor*, titulaire de la chaire de transformation des métaux Carter N. Paden, Jr., et directeur exécutif de l'Institute for Materials, au Georgia Institute of Technology.

Les auteurs du chapitre 7 (« La prochaine révolution de la production et les institutions de diffusion technologique ») sont Philip Shapira, du Manchester Institute of Innovation Research de l'Alliance Manchester Business School, Université de Manchester, et Jan Youtie, Enterprise Innovation Institute, Georgia Institute of Technology.

Le chapitre 8 (« Adhésion publique et technologies de production émergentes ») a été rédigé par David Winickoff de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE.

Le chapitre 9 (« Influence de la prospective sur la prochaine révolution de la production ») a pour auteurs Attila Havas, de l'Académie hongroise des sciences, et Matthias Weber, de l'Institut autrichien de technologie. Son élaboration a également bénéficié du concours non

négligeable de Michael Keenan de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE, ainsi que des observations formulées par Duncan Cass-Beggs et Joshua Polchar, de l'Unité de prospective stratégique de l'OCDE.

Le chapitre 10 (« Tour d'horizon international des nouvelles priorités et politiques pour la R-D liée aux secteurs manufacturiers en vue de la prochaine révolution de la production ») a pour auteur Eoin O'Sullivan, Directeur au Centre for Science, Technology & Innovation Policy (CSTI), de l'Institute for Manufacturing (IfM), Université de Cambridge, et Carlos López-Gómez, Chef de l'Unité Policy Links, à l'Institute for Manufacturing (IfM), Education and Consulting Services, Université de Cambridge.

Le chapitre 11 (« Essor des instituts d'innovation industrielle avancée aux États-Unis ») a été rédigé par William B. Bonvillian, maître de conférences au MIT et ancien directeur du bureau du MIT à Washington.

Enfin, le chapitre 12 (« La Chine et la prochaine révolution de la production ») a été élaboré par Qian Dai, chargé de programme au Département de la coopération internationale du ministère chinois de la Science et de la Technologie, en qualité de consultant auprès de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE.

Concernant le chapitre 12, il convient de remercier Wei Jigang, chargé de recherche au Centre de recherche pour le développement (DRC) du Conseil des Affaires d'État de la Chine. Le directeur général du Département de recherche en économie industrielle, Zhao Wenchang, a bien voulu faire part de ses observations sur ce chapitre. Merci également à Sylvia Schwaag Serger, professeure associée et directrice exécutive de la stratégie internationale et des réseaux à Vinnova, pour ses observations, ainsi qu'à Antonio Fanelli et Fei Zheng, du Secrétariat des relations mondiales de l'OCDE, pour leur contribution notable sur le fond et dans le domaine statistique. Ces remerciements s'adressent aussi à Georg Stieler, de la société Stieler Enterprise Management Consulting (Shanghai) Co., Ltd., pour ses éclaircissements sur les données et indicateurs relatifs à l'utilisation des technologies dans les entreprises chinoises.

Alexandra Neri, associée et directrice du Département IP/TMT, Herbert Smith Freehills Paris LLP, et Brian Kahin, *senior fellow* à la Computer & Communications Industry Association et chargé de recherche en économie numérique auprès de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE ont bien voulu faire part de leurs observations sur la propriété intellectuelle. Robert D. Atkinson, président de l'Information Technology and Innovation Foundation, a gracieusement fourni des éléments utiles à divers moments du projet.

De nombreux agents de l'OCDE ont également participé à ces travaux. Alistair Nolan a administré le projet sous la conduite de Dominique Guellec, Chef de la Division de la science et de la technologie. Dominique Guellec a contribué sur le fond à l'élaboration de tous les chapitres du rapport et il est l'auteur de l'encadré du chapitre 1 consacré à la propriété intellectuelle. Andrew Wyckoff, qui dirige la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation, et Dirk Pilat, le directeur adjoint, ont accompagné tout le processus de leurs observations et conseils. Cette publication s'appuie en outre sur les travaux de recherche et d'analyse d'autres collaborateurs de l'OCDE, en particulier (par ordre alphabétique) : Koen De Backer, Sarah Box, Stuart Elliott (qui a désormais rejoint l'Académie des sciences des États-Unis), Stéphanie Jamet, Nick Johnstone, Carlo Menon et Mariagrazia Squicciarini. Durant un stage à l'OCDE, Nicolas Trausch a prêté un précieux concours en révisant les parties consacrées au lien entre automatisation et emploi.

Un grand merci également à tous nos interlocuteurs des autorités suédoises, en particulier du ministère des Entreprises et de l'Innovation et de l'agence nationale pour l'innovation, Vinnova, qui ont co-organisé et gracieusement accueilli, en novembre 2016 la conférence intitulée « Smart Industry: Enabling the Next Production Revolution » (par ordre alphabétique) : Erik Fahlbeck, Johan Harvard, Marianne Löfgren, Göran Marklund, Sylvia Schwaag Serger, Jennie Sölving et Karin Stridh.

La version finale du texte de la publication a été mise au point par Catherine Rowles-Holm, tandis que Janine Treves a participé à sa mise en page. Beatrice Jeffries a assuré des services de secrétariat tout au long du projet. Angela Gosmann a mis au point le manuscrit destiné à la publication et a participé à la préparation des épreuves. Blandine Serve et Peter Horvát ont fourni un soutien statistique.

Table des matières

Résumé	15
Liste des acronymes, abréviations et unités de mesure	18
Chapitre 1. La prochaine révolution de la production : principaux enjeux et propositions d'action	21
Introduction	22
Les technologies, point de mire du rapport	22
Diffusion des nouvelles technologies de production : que peuvent faire les pouvoirs publics ?	45
Adhésion du public et nouvelles technologies	49
Influence de la prospective sur la prochaine révolution de la production	51
De l'importance des politiques avisées dans les domaines de la science et de la R-D ..	52
Essor des instituts d'innovation industrielle avancée aux États-Unis	56
L'évolution technologique remet également en question le système de propriété intellectuelle	57
Les systèmes d'enseignement et de compétences nécessitent une attention constante	59
La prochaine révolution de la production pourrait également faire évoluer les politiques du marché du travail	61
Les politiques territoriales pourraient aussi gagner en importance	62
L'action des pouvoirs publics doit reposer sur une réflexion engagée sur le long terme	62
La Chine et la prochaine révolution de la production	62
La prochaine révolution de la production et les chaînes de valeur mondiales (CVM) ..	64
Conclusion	66
Notes	67
Références	68

Partie I

Principales technologies émergentes

Chapitre 2. Avantages et défis de la transformation numérique de la production	77
Introduction	78
Intégrer les TIC avancées aux processus de production	79
La convergence des technologies numériques impulse la transformation de la production industrielle	82
La transformation numérique révolutionne la production	94
De nouvelles possibilités d'action et de nouveaux défis sont à attendre	105

Considérations intéressant l'action des pouvoirs publics	114
Notes	121
Références	124
Chapitre 3. Bioproduction et bioéconomie	129
Introduction	130
Un cadre d'action pour la bioéconomie	132
Une réglementation insuffisante peut être dommageable	155
Le périmètre de la bioproduction : diversifier les produits et fabriquer à plus grande échelle	158
Conclusions	161
Notes	162
Références	163
Chapitre 4. Exploiter le potentiel des nanotechnologies pour préfigurer la prochaine révolution de la production	171
Introduction	172
Le nouveau visage d'une technologie générique révolutionnaire	175
Un lien entre les mondes numérique et physique	177
Le rôle moteur des nanotechnologies dans la prochaine révolution de la production ..	178
Implications pour l'action publique	180
Notes	184
Références	184
Chapitre 5. L'impression 3D et ses conséquences environnementales	187
Introduction	188
État des applications des technologies d'impression 3D	189
Évolution de la technologie d'impression 3D à brève échéance	194
Incidences environnementales probables d'une large diffusion de l'impression 3D ...	203
Potentiel en matière de durabilité environnementale	209
Réalisation des objectifs de la politique de l'environnement : priorités et mécanismes	223
Conclusion	227
Notes	231
Références	231
Chapitre 6. Révolutionner la conception et le fonctionnement des produits grâce à l'innovation dans les matériaux	237
Introduction	238
Les promesses des matériaux nouveaux et améliorés	240
L'ère des tâtonnements dans la découverte et le développement des matériaux touche à sa fin	241
L'écosystème de l'innovation dans les matériaux	245
Les nouveaux matériaux renferment un potentiel de rupture	246
De l'importance des matériaux améliorés	247
Matériaux et fabrication numériques	248
Défis à relever pour que, demain, l'innovation s'accélère dans les matériaux ...	249

Conclusions	257
Notes	261
Références	262

Partie II

Thèmes transversaux

Chapitre 7. La prochaine révolution de la production et les institutions de diffusion des technologies	267
Introduction	268
Les institutions chargées de diffuser les technologies et leurs fonctions	271
Les raisons de l'intervention des institutions de diffusion technologique	273
Les types d'institutions de diffusion technologique	276
Les institutions de diffusion technologique : évolution et défis	286
Recommandations	295
Notes	298
Références	299
Chapitre 8. Adhésion du public et technologies de production émergentes	305
Introduction	306
Technologies essentielles	307
Comprendre l'adhésion du public	312
Jeter les bases d'une adhésion du public	317
Conclusion	325
Références	326
Chapitre 9. Influence de la prospective sur la prochaine révolution de la production ...	331
Introduction	332
Pertinence de la prospective pour l'action des pouvoirs publics	333
Avantages potentiels de la prospective et contribution à la conception des politiques	342
Facteurs et conditions essentiels à prendre en compte pour tirer profit de la prospective	351
Principaux enseignements à pour l'action des pouvoirs publics et sur le plan organisationnel	355
Notes	356
Références	357
Chapitre 10. Tour d'horizon international des nouvelles priorités et politiques pour la R-D industrielle en vue de la prochaine révolution de la production ...	361
Introduction	362
Avec la prochaine révolution de la production, de nouvelles priorités se dessinent vis-à-vis des technologies de fabrication	366
Grands axes des politiques industrielles orientant les priorités et programmes de R-D dans la perspective de la prochaine révolution de la production	372
Nouvelles formes et modalités de l'action publique face à la prochaine révolution de la production	380

En conclusion : de nouvelles thématiques, lignes d'action et leçons à retenir	392
Notes	396
Références	396
Chapitre 11. Le développement des instituts d'innovation industrielle avancée aux États-Unis	401
Introduction : le déclin du secteur manufacturier aux États-Unis	402
Émergence de la fabrication avancée comme priorité d'action au niveau fédéral	406
Le modèle d'institut d'innovation industrielle avancée	415
Conclusion	428
Notes	429
Références	431
Annexe 11.A.1. Description des instituts d'innovation industrielle avancée	434
Chapitre 12. La Chine et la prochaine révolution de la production	443
Introduction	444
Le secteur manufacturier en Chine : principales technologies et évolutions récentes	444
Les technologies numériques	448
La robotique industrielle	455
L'impression 3D	457
La biotechnologie	459
La nanotechnologie	462
Les stratégies et les politiques gouvernementales	466
Principaux défis et considérations intéressant l'action gouvernementale	475
Notes	483
Références	484
Tableaux	
3.1. Instruments d'action d'un cadre pour la bioéconomie	134
3.2. Des produits biosourcés de plus en plus familiers	161
5.1. Technologies d'impression 3D : avantages et inconvénients	193
5.2. Stratégies d'amélioration de la durabilité de l'impression 3D par type d'imprimante	221
5.3. Actions prioritaires pour améliorer le bilan environnemental de l'impression 3D	223
7.1. Typologie des institutions de diffusion technologique	277
7.2. Évolutions technologiques, économiques et stratégies associées à la prochaine révolution de la production, et conséquences pour les institutions de diffusion technologique	288
8.1. Typologie des mécanismes de participation du public et exemples de politiques nationales	321
9.1. Quatre archétypes d'analyse prospective, accompagnés d'exemples	338
12.1. Système de mise en œuvre des Lignes directrices	467
12.2. Intensité de la R-D dans le secteur manufacturier et les industries de haute technologie d'une sélection de pays (en pourcentage)	479

Graphiques

1.1. Crédits budgétaires publics de R-D (sélection de pays)	54
1.2. Généralisation de l'informatique dans le cadre de travail	60
2.1. Part des entreprises manufacturières utilisant des progiciels de gestion intégrés, 2008-15	79
2.2. Pyramide des systèmes utilisés dans le cadre de l'automatisation de la production industrielle	80
2.3. Convergence des technologies clés qui sous-tendent la transformation numérique de la production industrielle	82
2.4. Part des entreprises utilisant les services infonuagiques dans chaque classe d'effectif, en 2014	90
2.5. Part des entreprises manufacturières utilisant des services infonuagiques, par pays, 2015	91
2.6. Classement des 10 premiers pays de l'OCDE en nombre d'appareils IdO connectés à l'internet.	92
2.7. Diffusion d'une sélection d'outils et d'activités TIC dans les entreprises, 2015	107
2.8. Niveau de compétence en résolution de problèmes dans des environnements à forte composante technologique, 2012	108
2.9. Classement des pays en fonction du nombre de centres de données hébergés en colocalisation et du nombre de sites de renom hébergés, 2013.	110
2.10. Principaux acteurs des technologies liées à l'IdO, aux données massives et à l'informatique quantique, 2005-07 et 2010-12	111
3.1. Agir en faveur de la bioéconomie du niveau régional jusqu'au niveau mondial . . .	134
3.2. Chaînes de valeur et d'approvisionnement généralisées du bioraffinage.	141
3.3. Représentation schématique d'une bioraffinerie intégrée	145
4.1. Évolution des brevets liés aux nanotechnologies, aux biotechnologies et aux TIC, 1990-2011.	174
4.2. Évolution des sous-domaines des nanotechnologies, 1990-2011	174
4.3. Évolution des principaux mots clés dans les articles consacrés aux nanosciences (1996-2014)	176
5.1. Pièce imprimée de façon expérimentale par projection de liant	191
5.2. Pièces imprimées au moyen des procédés SLA (gauche) et PolyJet (droite) . . .	192
5.3. Sculpture métallique réalisée par frittage laser	193
5.4. La voiture imprimée en 3D par Local Motors.	196
5.5. Courbes des coûts généralisés de l'impression 3D et du moulage par injection . . .	199
5.6. Impact environnemental d'une fraiseuse à commande numérique et de deux imprimantes 3D exploitées sans temps mort pour fabriquer des pièces pleines	205
5.7. Impact environnemental de deux fraiseuses à commande numérique et de huit imprimantes 3D exploitées sans temps mort pour fabriquer des pièces creuses	206
5.8. Impact environnemental par pièce fabriquée du moulage par injection et de diverses imprimantes 3D exploitées sans temps mort.	208
6.1. Conception simultanée et développement ascendant des matériaux pour satisfaire les systèmes en amont et les exigences du produit (fabrication et performance incluses)	239

6.2. Ordonnancement classique des étapes séparant la découverte des matériaux de leur mise en œuvre (de gauche à droite)	243
6.3. Éléments constitutifs de l'écosystème d'innovation des matériaux, infrastructure cyberphysique au cœur de l'Initiative américaine sur le génome des matériaux (MGI) axée sur l'alliance entre informatique, expérimentation et données numériques.	246
6.4. Changement de paradigme dans le développement des matériaux : remplacement de la sélection par la représentation numérique de la structure.	251
10.1. Le changement d'échelle et ses multiples dimensions	378
12.1. Évolution de la valeur des exportations sectorielles et de la part de la valeur ajoutée sur place dans la valeur des exportations brutes	445
12.2. Progression des demandes de brevets, 2000-14.	446
12.3. Évolution de l'utilisation de différents types de TIC selon les stades de développement industriel	447
12.4. Pays leaders dans les technologies de l'internet des objets et des données massives (2005-07 et 2010-12)	448
12.5. Part des pays dans les brevets relatifs aux biotechnologies, 2010-13.	459
12.6. Avantage technologique révélé dans le domaine des nanotechnologies, 2000-03 et 2010-13	463
12.7. Aides financières publiques directes à la R-D des entreprises et incitations fiscales à la R-D, 2014 (en pourcentage du PIB)	471
12.8. Dépenses de R-D des différentes régions de Chine, 2015	474
12.9. Les obstacles à l'entrepreneuriat.	478
12.10. Pourcentage d'individus de 25-64 ans diplômés de l'enseignement supérieur, selon le niveau d'études (2015)	481

Suivez les publications de l'OCDE sur :



http://twitter.com/OECD_Pubs



<http://www.facebook.com/OECDPublications>



<http://www.linkedin.com/groups/OECD-Publications-4645871>



<http://www.youtube.com/oecdilibrary>



<http://www.oecd.org/oecdirect/>

Ce livre contient des...

StatLinks 

Accédez aux fichiers Excel® à partir des livres imprimés !

En bas des tableaux ou graphiques de cet ouvrage, vous trouverez des *StatLinks*. Pour télécharger le fichier Excel® correspondant, il vous suffit de retranscrire dans votre navigateur Internet le lien commençant par : <http://dx.doi.org>, ou de cliquer sur le lien depuis la version PDF de l'ouvrage.

Résumé

La prochaine révolution de la production résultera de la convergence d'un large éventail de technologies, allant des technologies du numérique (par exemple, l'impression 3D, l'internet des objets [IdO] ou la robotique avancée), aux nouveaux matériaux (*bio-* et *nano-*) en passant par les nouveaux procédés (production fondée sur les données, intelligence artificielle [IA], biologie de synthèse). L'objet du présent rapport est d'examiner les ramifications économiques et politiques d'un éventail de technologies susceptibles de jouer un rôle déterminant dans la production à brève échéance (autour de l'horizon 2030). Dans la mesure où elles transforment la production, ces technologies auront des incidences majeures sur la productivité, l'emploi, les compétences, la répartition des revenus, les échanges, le bien-être et l'environnement.

Évolution de la productivité et des marchés du travail

Les nouvelles technologies de production pèseront fortement, à plusieurs titres, sur la disponibilité et la nature du travail. La stratégie à suivre face à l'importance grandissante des emplois fortement et peu rémunérés doit notamment intégrer la progression des tâches de production à forte intensité technologique. L'évolution technologique va inéluctablement bouleverser les secteurs tels que nous les connaissons aujourd'hui, et les entreprises en place devront faire face à la redéfinition des conditions de la compétitivité due aux nouvelles technologies. On ne sait pas exactement à quel rythme et dans quelles proportions les ajustements seront opérés dans l'avenir. Il n'empêche que les pays plus résilients et plus prospères seront certainement ceux qui sont le plus tournés vers l'avenir et qui sont dotés d'institutions efficaces, d'une population instruite et éclairée, ainsi que des capacités technologiques essentielles dans un certain nombre de secteurs.

La maîtrise des nouvelles technologies de production promet également de rendre les processus plus respectueux de l'environnement, de renforcer la sécurité au travail (grâce à la robotisation d'une partie des tâches potentiellement dangereuses), de créer de nouveaux types de biens et de services, et de permettre de les produire sur mesure, ainsi que d'accélérer la croissance de la productivité. En effet, il y a tout lieu de penser que les technologies étudiées dans le présent rapport, qu'il s'agisse des technologies de l'information et des communications, des robots ou des nouveaux matériaux, pourraient contribuer bien davantage à la productivité qu'elles ne le font actuellement. Elles sont souvent l'apanage des grandes entreprises, qui, de surcroît, sont loin de tirer profit de toutes leurs applications potentielles.

Par comparaison avec les précédentes révolutions industrielles, dues à la machine à vapeur et à l'électrification, les inventions susceptibles de transformer la production interviendront et se propageront rapidement dans le monde. En revanche, il pourrait s'écouler un temps considérable entre le moment où une nouvelle technologie sera inventée, se diffusera dans l'économie tout entière et remplira toutes ses promesses en termes de

productivité. Dans le passé, l'horizon auquel d'importantes technologies de production étaient censées porter leurs fruits a été fixé de manière irréaliste par excès d'enthousiasme.

Certes, les nouvelles technologies créent des emplois par différentes voies et les technologies de nature à améliorer la productivité bénéficieront à l'ensemble de l'économie, mais les ajustements à opérer en conséquence risquent d'être immenses. Beaucoup pâtiraient certainement d'une vague de suppressions d'emplois qui viendrait frapper un grand secteur ou plusieurs branches en même temps. Les décideurs politiques doivent par conséquent suivre l'évolution de la situation et gérer activement les ajustements à effectuer, notamment en poursuivant des politiques tournées vers l'avenir dans les domaines des compétences, de la mobilité de la main-d'œuvre et du développement régional.

Connaissances, technologie et diffusion des compétences

Outre l'aspect matériel, la diffusion des technologies doit concerner les investissements incorporels complémentaires et le savoir-faire nécessaire pour exploiter pleinement leur potentiel, tout cela couvrant un éventail allant des compétences aux nouvelles formes d'organisation des entreprises. Un déploiement et une distribution efficaces des ressources humaines et financières en sont des conditions indispensables mais non exclusives. Il est donc essentiel de coordonner les politiques d'encadrement qui favorisent la concurrence sur les marchés de produits, atténuent les rigidités des marchés du travail et suppriment les freins à la sortie des entreprises et les obstacles à la croissance de celles qui réussissent. Les nouvelles entreprises, elles, utiliseront largement les nouvelles technologies de production.

La diffusion des technologies peut être facilitée par la mise en place d'institutions efficaces spécialement dédiées à cette tâche. Il s'agira surtout de réussir la transformation numérique des entreprises, en particulier des petites et moyennes entreprises (PME). Les institutions dotées de moyens spéciaux, par exemple de services de vulgarisation (chargés d'une mission d'information et d'éducation, en particulier auprès des PME), ont tendance à être reléguées au second plan dans la politique générale d'innovation. Elles sont pourtant capables d'efficacité pour peu qu'elles soient bien conçues et bénéficient d'incitations et de ressources adaptées.

Les mutations technologiques remettront en question l'adéquation des compétences et des systèmes de formation. Certaines des nouvelles technologies de production soulignent l'importance de l'interdisciplinarité dans l'enseignement et la recherche. C'est pourquoi il est souvent nécessaire de développer les interactions entre les entreprises et les établissements d'enseignement ou de formation et ce besoin se fera certainement de plus en plus sentir à mesure que la part du contenu intellectuel dans la production augmentera. Des systèmes efficaces d'apprentissage tout au long de la vie et de formation sur le lieu de travail sont indispensables pour que l'acquisition des compétences se fasse au rythme de l'évolution technologique et qu'il soit possible de se reconvertir chaque fois que nécessaire. Il est essentiel de propager les compétences numériques et complémentaires aux machines. Il importe autant de veiller à ce que le niveau de compétence générale (aptitude à lire, écrire, compter et résoudre des problèmes) soit suffisamment élevé au sein de la population tout entière, notamment pour permettre l'apprentissage de compétences spécifiques, en constante évolution.

Investir dans les données et la science

Les données occuperont une place centrale dans la production du XXI^e siècle. L'action des pouvoirs publics devrait encourager à investir dans les données qui ont des retombées

positives dans les secteurs d'activité et entre eux. Il faudrait examiner ce qui fait obstacle à la réutilisation et au partage des données, y compris des données publiques, de même qu'il conviendrait de disposer de cadres de gouvernance des données qui traitent des questions soulevées par le respect de la vie privée et la sécurité numérique. La qualité de l'infrastructure numérique, notamment l'accès aux puissantes ressources informatiques, sera vitale pour les entreprises de nombreux secteurs.

Il importe que la science et la R-D fassent l'objet de politiques avisées. Toutes les technologies examinées dans le présent rapport sont le fruit de l'avancée des connaissances et des instruments scientifiques réalisée à la fois dans les secteurs public et privé. Les nouvelles technologies de production sont dans bien des cas trop complexes pour les capacités de recherche existantes, même celles des plus grandes entreprises, et elles mobilisent par conséquent un large éventail de partenariats de recherche public-privé. Par ailleurs, les grands défis de la recherche soulevés par la prochaine révolution de la production sont pour beaucoup pluridisciplinaires. Les indicateurs d'évaluation des programmes de recherche devraient fournir les incitations appropriées en faveur de la recherche pluridisciplinaire, de la transposition des résultats de la recherche et de l'établissement de liens entre parties prenantes.

Confiance et réflexion sur le long terme

Il importe aussi que le grand public comprenne et accepte les nouvelles technologies de production. Il existe une corrélation étroite entre la résistance populaire aux nouvelles technologies et la perte de confiance à l'égard des autorités scientifiques et réglementaires. Décideurs et institutions devraient nourrir des attentes réalistes vis-à-vis des technologies et prendre dûment en compte les incertitudes. Les avis scientifiques devraient être jugés impartiaux et dignes de confiance. Le débat public peut également concourir à renforcer la compréhension entre la communauté scientifique et l'opinion.

Judicieusement appliquée, la prospective peut étayer l'élaboration des politiques en période de changement technologique et socioéconomique. Les méthodes participatives permettent de réunir les parties prenantes pour définir une communauté de vues sur l'avenir, négocier et convenir d'actions conjointes. Les processus prospectifs peuvent aussi comporter des avantages, comme resserrer les réseaux et mieux coordonner l'action menée dans différents domaines d'intervention.

Enfin, il est essentiel d'engager une réflexion sur le long terme. En complément des tâches qui les attendent à court terme, les dirigeants des entreprises, de l'enseignement, des syndicats et des administrations doivent être prêts à encadrer les politiques et préparer l'avenir au-delà de la durée habituelle des mandats. Il est indispensable de passer en revue l'éventail des nouveaux risques et défis qui apparaissent dans le sillage des technologies émergentes, de réfléchir à la manière dont les priorités de l'action pourraient avoir à évoluer dans des domaines aussi divers que les régimes de la propriété intellectuelle, la concurrence et les politiques commerciales, et de considérer les répercussions que la production de demain aura sur la répartition.

Liste des acronymes, abréviations et unités de mesure

ADN	Acide désoxyribonucléique
AFFOA	Advanced Functional Fabrics of America (États-Unis)
ANSSI	Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (France)
API	Interface de programmation d'applications
ARMII	Advanced Regenerative Manufacturing Institute (États-Unis)
CRISPR	Courtes répétitions palindromiques groupées et régulièrement espacées
CVM	Chaîne de valeur mondiale
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency (États-Unis)
DMDII	Institut pour l'innovation dans la conception et la fabrication numériques (États-Unis)
DPI	Droits de propriété intellectuelle
DRC	Centre de recherche pour le développement (Chine)
ESB	Encéphalopathie spongiforme bovine
GM	Génétiquement modifié
HGP	<i>Human Genome Project</i> [projet de séquençage du génome humain]
IA	Intelligence artificielle
IACMI	Institut pour l'innovation dans la fabrication de composites à haute performance (États-Unis)
ICME	Ingénierie des matériaux par modélisation intégrée
IDE	Investissement direct étranger
IdO	Internet des objets
IMSI	Identité internationale d'abonnement mobile
LIFT	<i>Lightweight Innovations for Tomorrow</i> (États-Unis)
MGI	Initiative pour le génome des matériaux (États-Unis)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NAE	National Academy of Engineering (États-Unis)
NAMII	Institut national pour l'innovation dans la fabrication additive (États-Unis)
NIST	Institut national des normes et de la technologie (États-Unis)
nm	Nanomètre
NNI	Initiative nationale en faveur des nanotechnologies (États-Unis)
NSB	National Science Board (États-Unis)
OGM	Organisme génétiquement modifié
OMC	Organisation mondiale du commerce
PDG	Président-directeur général
PME	Petites et moyennes entreprises
RAPID	Institut pour des progrès rapides dans le déploiement de l'intensification des procédés (États-Unis)

REMADE	Institut pour la réduction de l'énergie grise et la diminution des émissions dans la fabrication de matériaux (États-Unis)
TIC	Technologies de l'information et des communications
US DoD	Département de la Défense (États-Unis)
US DOE	Département de l'Énergie (États-Unis)

Chapitre 1

La prochaine révolution de la production : principaux enjeux et propositions d'action

par

Alistair Nolan

Direction de la science, de la technologie et de l'innovation, OCDE

Ce chapitre introductif a pour objet de restituer le contexte dans lequel le rapport s'inscrit ainsi que de présenter les conclusions et propositions principales des chapitres dédiés aux technologies numériques, à la biotechnologie industrielle, à la nanotechnologie, à l'impression 3D et aux nouveaux matériaux. Y sont également résumés et commentés les principaux messages à retenir des chapitres consacrés aux problématiques transversales suivantes : les institutions et les mécanismes de diffusion technologique, l'adhésion du public et les technologies de production émergentes, la prospective, nouvelles les priorités et les politiques pour la R-D industrielle, les instituts d'innovation industrielle avancée aux États-Unis et le déroulement de la prochaine révolution de la production en République populaire de Chine. Il s'agit par ailleurs de décrire un certain nombre de considérations supplémentaires sur l'action à mener et d'exposer le contexte général de l'étude, en traitant notamment des questions suivantes : la relation entre productivité et technologies de la prochaine révolution de la production ; le travail, l'automatisation et les nouvelles technologies de production ; les politiques en faveur de la science et de la R-D ; les défis à relever dans les domaines de l'éducation et de la formation ; certaines tendances observées dans l'évolution du marché du travail ; les politiques territoriales ; les nouveaux défis des systèmes de propriété intellectuelle ; la nécessité d'engager une réflexion sur l'action à mener dans la durée ; et les répercussions éventuelles sur les chaînes de valeur mondiales. Le chapitre se conclut par les thèmes à étudier de plus près.

Introduction

La prochaine révolution de la production résultera de la convergence d'un large éventail de technologies, allant des technologies du numérique (par exemple, impression 3D, internet des objets [IdO] ou robotique avancée), aux nouveaux matériaux (*bio-* et *nano-*) en passant par les nouveaux procédés (production fondée sur les données, intelligence artificielle [IA], biologie de synthèse). Certaines de ces technologies sont déjà employées dans la production. D'autres pourront l'être dans un avenir proche. Dans la mesure où elles transforment la production, elles auront des incidences majeures sur la productivité, l'emploi, les compétences, la répartition des revenus, les échanges commerciaux, le bien-être et l'environnement. Toutes ces technologies évoluent très rapidement. Plus les gouvernements auront une idée fine des évolutions possibles de la production, plus ils seront à même d'aider les entreprises, les économies et la société à en tirer parti et à faire face aux défis qui en résulteront.

La production de demain dépendra d'une diversité de facteurs stratégiques, institutionnels, technologiques ou d'ordre plus général (mégatendances) (OCDE, 2015a). Par exemple, les conditions environnementales et la pénurie grandissante de certaines matières premières favoriseront l'utilisation efficiente des matières, de l'eau et de l'énergie dans la production. L'accumulation de capital humain, qui s'intensifie dans les pays de l'OCDE depuis plusieurs décennies, encouragera la production de biens à forte intensité de connaissances. L'évolution démographique influera sur la nature de la demande de consommation ainsi que sur le lieu d'implantation des sites de production. Celui-ci dépendra probablement aussi d'autres facteurs, comme l'instabilité politique de certaines régions du monde ou la situation météorologique.

Les technologies, point de mire du rapport

Il s'agit ici d'examiner les ramifications économiques et politiques d'un éventail de technologies susceptibles de jouer un rôle déterminant dans la production à brève échéance (autour de l'horizon 2030). Ce prisme technologique conduit à aborder une multitude de problématiques et de politiques. Un tel examen des caractéristiques technologiques de la production de demain autorise de surcroît une certaine souplesse. La transformation numérique dans la production, phénomène notamment désigné par l'expression « industrie 4.0 » ou « fabrication avancée » (encadré 1.1) a récemment fait l'objet de diverses études très remarquées. Le champ d'étude du présent rapport est plus vaste puisqu'il englobe des technologies majeures qui ne relèvent pas seulement du numérique, comme la biotechnologie industrielle, ou d'autres dimensions de la production au-delà de la fabrication proprement dite.

L'approche technologique permet d'apprécier l'importance de certaines facettes de l'action publique qui ne figurent pas toujours en bonne place dans l'analyse microéconomique de la productivité et de la croissance. Quelques exemples sont examinés ici : la composition du soutien public en faveur de la R-D industrielle et comment elle amplifie les effets et l'efficacité de ce soutien ; la mise en place et le financement d'institutions chargées de diffuser les technologies, et les indicateurs utilisés pour mesurer

leur performance ; le fonctionnement des partenariats de recherche public-privé ; les avantages d'une interprétation sectorielle de l'évolution technique ; la manière dont la complexité croissante et le socle numérique de nombreux systèmes de production créent de nouveaux liens d'interdépendance entre les entreprises, les technologies et diverses institutions (par exemple, celles qui fournissent des moyens de calcul intensif) ; l'évolution des besoins en compétences spécifiques aux technologies ; les stratégies prospectives des pouvoirs publics ; et la manière dont l'action publique infléchit les attitudes à l'égard des technologies et pèse, par conséquent, sur les modalités de leur adoption. L'examen de ces problématiques et d'autres questions de fond complète les analyses classiques des entreprises et des marchés. En outre, la rétrospective de certaines transformations technologiques de la production, relatée plus loin dans ce chapitre, éclairera peut-être sur la manière de faire face aux ruptures technologiques d'aujourd'hui.

Encadré 1.1. **L'industrie 4.0 et la prochaine révolution de la production**

L'expression « quatrième révolution industrielle », également appelée « industrie 4.0 », renvoie à l'utilisation, dans la production industrielle, des technologies numériques récentes et souvent interdépendantes pour concevoir des procédés ou améliorer ceux existants, conduisant parfois à l'apparition de nouveaux biens et services. Les technologies concernées sont nombreuses et diverses : programmes d'apprentissage automatique ou applications de la science des données débouchant sur des systèmes de plus en plus autonomes et intelligents, capteurs à faible coût utilisés dans l'IdO, ou encore dispositifs de contrôle novateurs rendant possible l'arrivée des robots industriels de deuxième génération.

L'expression « Industrie 4.0 » établit un contraste avec les trois précédentes révolutions industrielles, qu'il est difficile de situer avec précision dans le temps : i) la mécanisation de la production, avec l'apparition de la machine à vapeur (autour de 1780) ; ii) le développement de la production de masse grâce à l'énergie électrique (années 1870) ; et iii) l'automatisation de la production automatisée grâce à l'électronique (années 1960) (l'électronique de l'industrie 4.0 diffère à maints égards, notamment en termes de coût, de taille, de puissance de calcul, d'intelligence et d'interconnectivité ainsi que par l'intégration des objets physiques)¹.

1. Ezell (2016) fait remarquer qu'il faudrait plutôt dire « Industrie 5.0 » dans la mesure où les études occultent généralement l'émergence des secteurs fondés sur les sciences, comme l'électronique et la chimie, et la sophistication des procédés de production qui en a résulté durant plusieurs décennies après la Deuxième guerre mondiale. Cette évolution est généralement rattachée à la période marquée par l'apparition de l'électricité, à la fin du XIX^e siècle.

Nombre d'évolutions technologiques retentiront sur la production au cours des 10 à 15 prochaines années. En effet, en combinant les technologies de manière à compléter et à amplifier leurs potentialités mutuelles, on ne cesse d'élargir le champ des possibles technologiques de la production. Grâce aux avancées du développement logiciel et de la science des données, par exemple, on assiste à la naissance de nouveaux matériaux. De même, les semi-conducteurs en silicium seront probablement à terme remplacés par des substrats plus performants, avec à la clé des applications logicielles plus puissantes. Cette combinatoire rend la prévision aléatoire. En effet, la réalité vient souvent contredire le calendrier prévisionnel censé indiquer à quel moment certains paliers technologiques seront franchis (Armstrong, Sotala et ÓhÉigeartaigh, 2014). Il n'est pas rare non plus que l'on soit surpris par l'ampleur des changements. Il y a seulement quelques années de cela, très peu imaginaient que les smartphones viendraient bouleverser, voire faire disparaître, une vaste gamme de produits et de secteurs, comme le bloc-notes et l'agenda électroniques, le

métronomie et la loupe à main (fonctionnalités désormais disponibles sous la forme d'applications mobiles). Comme le montre ce rapport, plusieurs technologies productives susceptibles de provoquer une rupture pointent déjà à l'horizon, mais l'ampleur de cette rupture est encore incertaine.

Depuis quelques années, les pays multiplient les initiatives en faveur de la fabrication avancée. Le programme « Industrie 4.0 » de l'Allemagne, le réseau National Network for Manufacturing Innovation des États-Unis, la stratégie Robot du Japon ou encore les plans d'action *Made in China 2025* et « Internet Plus » de la République populaire de Chine (ci-après la « Chine ») n'en sont que quelques exemples. Comme expliqué dans les chapitres 9 et 10, beaucoup de pays ont élaboré des études et stratégies prospectives sur les activités de fabrication nationales, ainsi que des plans d'action détaillés à l'égard des technologies prioritaires. Depuis peu, les activités manufacturières occupent une place grandissante dans les stratégies nationales de recherche et d'innovation.

Les pouvoirs publics s'intéressent à plus d'un titre à la manière dont la production évolue. Les effets du changement technologique sur l'emploi et les inégalités de revenu retiennent de plus en plus l'attention des universitaires, des décideurs et du grand public, tandis que la crainte du chômage d'origine technologique s'installe partout dans le monde. La nécessité d'améliorer la productivité du travail dans les pays de l'OCDE vieillissants pousse à se concentrer sur la technologie et l'innovation, principaux déterminants de la hausse de la productivité et du niveau de vie. Les décideurs sont nombreux à s'inquiéter des conséquences d'un manque de préparation en cas de révolution technologique difficilement prévisible. En 2015, la Chancelière allemande Angela Merkel déclarait à Davos : « Je souhaite que notre robuste économie allemande soit capable de faire face au fusionnement de l'économie réelle et numérique, sans quoi nous perdrons du terrain au profit de la concurrence ». (Merkel, 2015). Comme le montre le présent rapport, ce manque de préparation pourrait revêtir plusieurs formes – un déficit de qualifications et d'infrastructures, ou encore de lacunes réglementaires – et être lourde de répercussions. Outre des destructions d'emplois, l'automatisation risque de remettre en question les avantages liés aux coûts de main-d'œuvre dont nombre d'économies émergentes sont tributaires. La robotisation massive décidée par Foxconn pourrait en être un précurseur¹.

Structure du rapport et périmètre du premier chapitre

L'objet du présent chapitre est de situer l'ensemble de l'étude dans son contexte et d'en présenter un résumé. Le reste du rapport se divise en deux grandes parties. Les cinq chapitres qui composent la première portent chacun sur un type de technologie donnée : technologies numériques, biotechnologie industrielle, nanotechnologie, impression 3D et nouveaux matériaux. La deuxième partie regroupe les chapitres qui traitent d'un thème transversal : les institutions et les mécanismes de diffusion technologique, l'adhésion du public et les technologies de production émergentes, la prospective, les nouvelles priorités et les politiques pour la R-D industrielle, les instituts d'innovation industrielle avancée aux États-Unis et le déroulement de la prochaine révolution de la production en Chine.

Ce chapitre introductif aborde également un certain nombre de considérations sur l'action des pouvoirs publics et restitue le contexte général dans lequel l'étude s'inscrit. Les sections qui suivent traitent des points ci-après : la relation entre productivité et technologies de la prochaine révolution de la production ; le travail, l'automatisation et les nouvelles technologies de production ; les politiques en faveur de la science et de la R-D ; les défis à relever dans les domaines de l'éducation et de la formation ; certaines

caractéristiques de l'évolution du marché du travail ; les politiques territoriales ; les nouveaux défis des systèmes de propriété intellectuelle ; la nécessité d'engager une réflexion sur l'action à mener dans la durée ; et les répercussions éventuelles sur les chaînes de valeur mondiales. Le chapitre se conclut par les thèmes à étudier de plus près.

La productivité et les technologies de la prochaine révolution de la production

Pour un certain nombre de raisons, les effets éventuels des nouvelles technologies de production sur la productivité revêtent un grand intérêt pour l'élaboration des politiques actuelles. Des travaux de recherche ont établi l'existence d'un lien fondamental entre innovation et productivité à long terme. À l'heure actuelle, la montée des taux de croissance économique fait partie des priorités de la plupart des pays de l'OCDE. La morosité macroéconomique observée dans une grande partie de la zone, les marchés du travail en difficulté et l'envol de la dette publique ont rendu d'autant plus urgent de renouer avec la croissance. À terme, compte tenu du déclin de la population en âge de travailler, mais aussi des contraintes environnementales, la croissance des pays de l'OCDE est appelée à devenir de plus en plus tributaire d'innovations susceptibles d'accroître la productivité.

Pourtant, depuis quelques années, nombre de pays de l'OCDE accusent un fléchissement de la croissance de la productivité. Des experts de renom expliquent ce ralentissement par un déficit général d'innovation. Ils sont issus du monde universitaire, à l'exemple de Gordon (2012), ou du milieu des affaires, comme Peter Thiel, PDG fondateur de PayPal. Entre autres arguments, les techno-pessimistes mettent en avant des obstacles à la productivité spécifiques aux États-Unis, à savoir le creusement des inégalités, la montée de la dette à la consommation ou encore le gonflement de la dette publique. D'autres arguments revêtent un caractère plus général, en particulier l'essoufflement annoncé de l'innovation, du fait que son coût augmente avec le progrès technologique (Jones, 2012). À l'opposé, les techno-optimistes font valoir, suivant divers raisonnements, que les nouvelles technologies, numériques et autres, permettront d'améliorer la productivité (Brynjolfsson et McAfee, 2014), et que l'histoire économique donne des raisons de penser que le progrès technologique pourrait encore s'accélérer (Mokyr, 2014). Ils affirment également que les indicateurs officiels de la croissance économique sous-évaluent les progrès en occultant une grande partie des avantages conférés par les nouveaux biens et services. Ainsi, les offices statistiques nationaux ne recueillent généralement aucun renseignement sur l'utilisation des applications mobiles, sur les dispositifs de déclaration fiscale en ligne ou sur les sommes que les entreprises consacrent aux bases de données (Mandel, 2012). De même, le surplus du consommateur généré par des centaines de nouveaux produits numériques n'apparaît pas dans les données officielles.

Depuis maintenant quelques années, l'OCDE s'intéresse de très près aux déterminants de la productivité économique. Ses travaux portent essentiellement sur les effets des politiques cadres, de l'innovation et de la démographie des entreprises (par exemple, OCDE [2015c], Andrews, Criscuolo et Menon [2014] et Andrews, Criscuolo et Gal [2015]). Il n'est pas question ici d'y revenir, mais d'examiner les effets que les technologies étudiées dans le présent rapport ont actuellement et peuvent avoir sur la productivité.

Les technologies émergentes retentissent sur la productivité à maints égards

Les technologies de production émergentes influenceront sur la productivité de diverses manières :

- En combinant nouveaux capteurs, dispositifs de contrôle, analytique de données, infonuagique et IdO, on obtient des machines et des systèmes de plus en plus intelligents et autonomes.

- Les systèmes intelligents peuvent éliminer la quasi-totalité des erreurs dans certains processus de production. Cela tient notamment au fait que les capteurs permettent de surveiller chaque élément, rendant ainsi inutile de réaliser des tests sur des échantillons de lots. Anticipant les besoins de maintenance, ils peuvent nettement réduire les coûts d'immobilisation et de réparation des machines. Il est possible de réaliser des économies en procédant à des simulations avant la mise en place de procédés industriels. Dans les chaînes d'approvisionnement fondées sur les données, la livraison des commandes intervient beaucoup plus rapidement, ce qui permet d'organiser la production de façon à répondre à la demande réelle, et non prévisionnelle, ainsi, de limiter l'importance des stocks ainsi que le taux d'échec des lancements de nouveaux produits.
- Étant plus rapides, robustes, précis et constants que la main-d'œuvre humaine, les robots ont considérablement amélioré la productivité sur les chaînes d'assemblage de l'industrie automobile. Ils continueront de le faire dans un nombre croissant de secteurs et de processus au gré des avancées de la robotique industrielle.
- En conjuguant biotechnologie industrielle et chimie de pointe, on peut améliorer l'efficacité des bioprocédés (la plupart des procédés biologiques présentent un faible rendement).
- En permettant d'imprimer des mécanismes déjà assemblés, l'impression 3D pourrait rendre inutile toute opération d'assemblage à certains stades de la production.
- Grâce aux progrès de la science des matériaux et du calcul, le développement des nouveaux matériaux va pouvoir s'appuyer sur la simulation. Les entreprises y gagneront en temps et en coût car, lorsqu'elles chercheront un matériau aux propriétés voulues, il leur suffira d'intégrer ces propriétés dès le stade de la conception du matériau, ce qui leur évitera d'avoir à réaliser des analyses à répétition.
- La nanotechnologie permet de rendre le plastique conducteur d'électricité. Dans l'industrie automobile, cela peut rendre superflu un procédé particulier d'application de revêtement par pulvérisation, ce qui représente une diminution des coûts de l'ordre de 100 USD par véhicule.

La productivité bénéficiera également des synergies de technologies. Par exemple, les logiciels dits « génératifs » permettent de reproduire des processus évolutifs et de créer des modèles industriels optimaux en matière de poids et de résistance, que l'intelligence humaine serait probablement incapable de concevoir. À cette fin, ils examinent les multiples variantes possibles d'un dessin ou d'un modèle donné pour successivement éliminer les moins satisfaisantes tout en améliorant les meilleures. C'est avec un tel logiciel, Dreamcatcher, que la carrosserie de la moto électrique la plus rapide au monde, Lightning, a été conçue (Kinkead, 2014), de même qu'une cloison d'avion presque 50 % plus légère que les modèles antérieurs (Autodesk, 2016). Dans certains cas, les formes obtenues par les logiciels de conception générative sont uniquement réalisables par l'impression 3D, ce qui suppose de combiner les deux technologies. La combinaison des progrès de la simulation avec ceux de la réalité augmentée offrent un exemple analogue de synergie : à terme, les ingénieurs pourront visualiser, à l'aide de visières ou de lunettes, les projections en temps réel de l'intérieur des machines.

Il y a tout lieu de penser que les technologies examinées dans le présent rapport pourraient contribuer bien davantage à améliorer la productivité qu'elles ne le font actuellement. En effet, ces technologies, même celles accessibles aux entreprises de taille modeste, comme les robots à faible coût, sont souvent l'apanage des grandes firmes, qui, de surcroît, ne tirent pas profit de toutes leurs applications potentielles. Ce phénomène de

sous-exploitation touche l'ensemble de l'industrie. Or, la robotique offre des possibilités d'amélioration logistique et pourrait abaisser de plusieurs pourcents le prix des produits, notamment les produits d'alimentation (CCA/CRA, 2009). De l'avis des fabricants, les potentialités offertes par l'automatisation sont loin d'avoir été toutes exploitées que ce soit dans des domaines qui nécessitent un niveau faible ou élevé de qualifications comme la fabrication de pièces, le chargement des machines, l'emballage, la palettisation ou l'assemblage (Rigby, 2015).

Encadré 1.2. **Quelle est l'ampleur des retombées sur la productivité ?**

Les données d'observation relatives aux retombées des nouvelles technologies de production sur la productivité proviennent essentiellement d'études dédiées à une entreprise et à une technologie données. Celles présentées ici donnent à penser que les effets sur la productivité sont potentiellement importants. Il convient toutefois de préciser que ces études varient par l'approche méthodologique et ne concernent souvent qu'un petit nombre de primo-adoptants :

- Aux États-Unis, les entreprises dans lesquelles la prise de décision repose sur les données affichent une production et une productivité supérieures de 5 % à 6 % aux niveaux prévus compte tenu des investissements réalisés par ailleurs dans les technologies de l'information et des communications (Brynjolfsson, Hitt et Kim, 2011).
- Une hausse de 10 % de la qualité des données et de l'accès à celles-ci – moyennant une présentation plus concise et cohérente sur les plateformes, ce qui en facilite le traitement – est associée à une hausse de la productivité du travail de 14 % en moyenne, ce chiffre variant fortement d'un secteur à l'autre (Barua, Mani et Mukherjee, 2013).
- Les entreprises qui adoptent l'internet des objets (IdO) voient leurs coûts diminuer de 18 % en moyenne (Vodafone, 2015).
- Dans l'industrie minière, des camions autonomes pourraient dans certains cas accroître la production de 15 % à 20 %, réduire la consommation de carburant de 10 % à 15 % et abaisser les frais de maintenance de 8 % (Citigroup-Oxford Martin School, 2015).
- Des systèmes de forage autonomes peuvent améliorer la productivité de 30 % à 60 % (Citigroup-Oxford Martin School, 2015).
- Les robots de Kiva Systems permettent aux entrepôts qui en sont équipés de traiter quatre fois plus de commandes (Rotman, 2013).
- Les centres de données de Google représentent environ 0.01 % de la consommation mondiale d'électricité (Koomey, 2011). En juillet 2016, on apprenait que le refroidissement de leurs serveurs avait été optimisé par le numéro un mondial de l'intelligence artificielle (IA), DeepMind, réduisant ainsi la consommation d'énergie de 40 % ainsi que les coûts connexes¹.
- Un accroissement de 1 % de l'efficacité de la maintenance dans le secteur de l'aéronautique, induit par l'internet industriel, pourrait permettre aux compagnies aériennes d'économiser, à l'échelle mondiale, environ 2 milliards USD par an (Evans et Anninziata, 2012).

1. Voir <https://deepmind.com/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-40/>.

Les gains de productivité promis par les nouvelles technologies pourraient mettre longtemps à se concrétiser. Dans le passé, l'horizon auquel des technologies de production étaient censées porter leurs fruits a été fixé de manière irréaliste par excès d'enthousiasme. Ce manque de réalisme tient parfois à une mauvaise évaluation des défis techniques, comme dans le cas des nanotechnologies. Comme on le voit pour les données massives et

l'IdO, la courbe d'évolution technologique ressemble souvent à une vague, avec une phase d'accélération de l'inventivité, puis une phase de ralentissement, ou vice versa (OCDE, 2015b). En termes d'adoption, les TIC avancées restent en deçà de leur potentiel. L'infonuagique, par exemple, a commencé à être utilisée à des fins commerciales dans les années 90. Pourtant, dans les pays de l'OCDE, encore moins d'un quart des entreprises y recourent à l'heure actuelle. Selon une étude (Lorentz et al., 2015), le passage à l'ère de l'industrie 4.0 pourrait durer 20 ans. Le simple fait d'être disponible ne suffit pas pour qu'une technologie soit adoptée et utilisée avec succès. Souvent, la concrétisation de ses avantages suppose d'investir dans des actifs incorporels complémentaires (par exemple, de nouvelles compétences ou formes d'organisation) et d'imaginer des modèles économiques mieux adaptés qui génèrent des revenus pour les innovateurs.

Travail, automatisation et nouvelles technologies de production

Parmi le grand public, les hauts dirigeants politiques et les chefs d'entreprise, des voix se sont récemment élevées pour s'inquiéter des répercussions des technologies numériques sur l'emploi. Ainsi, en 2014, l'ancien Secrétaire au Trésor des États-Unis, Lawrence Summers, a affirmé que le nombre limité des emplois disponibles serait le prochain grand défi économique (Summers, 2014). Dans une étude fréquemment citée, Frey et Osborne (2013) ont conclu qu'aux États-Unis, l'informatisation menaçait à terme 47 % environ des emplois (sur une période couvrant plusieurs dizaines d'années). Depuis quelque temps, les ouvrages déferlent pour annoncer la suppression de la plupart des emplois humains (par exemple, Ford, 2015 ; Brynjolfsson et McAfee, 2014). Il est craint par ailleurs que l'économie numérique ne crée pas autant d'emplois qu'en leur temps, d'autres secteurs de pointe. Par exemple, Lin (2011) a montré que la part des nouveaux métiers dans l'emploi avait chuté entre 1990 et 2000 aux États-Unis, passant de 8.2 % à 4.4 %. D'après les estimations de Berger et Frey (2015), les secteurs d'activité à caractère technologique qui sont apparus dans les années 2000 représentent actuellement moins de 0.5 % de l'emploi aux États-Unis. Selon une enquête récemment menée dans ce pays, 48 % des experts en technologie interrogés redoutent que le numérique ne provoque un chômage de masse (PEW, 2014). D'aucuns appréhendent également que les technologies numériques ne modifient la nature des marchés du travail, par exemple en favorisant l'externalisation via des plateformes d'intermédiation (*crowdsourcing*), au détriment d'une partie des travailleurs.

La crainte du chômage d'origine technologique n'est pas un phénomène nouveau. Bien avant que les luddites ne se révoltent contre la mécanisation de la fabrication des textiles en Angleterre, au début du XIX^e siècle, les technologies productives avaient déjà maintes fois suscité la peur que le marché du travail s'en trouve bouleversé. L'expression « chômage technologique » a été imaginée par John Maynard Keynes en 1930 (Keynes, 2009). Aux États-Unis, un Bureau de l'automatisation et de la main-d'œuvre a été créé en 1961 sous l'Administration Kennedy pour relever « le grand défi national des années 1960 : préserver le plein emploi à l'heure où les machines, bien sûr, remplacent les hommes » (citation reprise par Miller et Atkinson, 2013). Plus près de nous, les travailleurs américains interrogés dans les années 70 et 80 se déclaraient systématiquement préoccupés par l'automatisation (Miller et Atkinson, 2013). Si cette inquiétude s'est grandement révélée injustifiée, nombre d'observateurs font valoir qu'à certains égards, les technologies numériques lui confèrent aujourd'hui un nouveau fondement.

Les progrès du calcul ont doté les machines de capacités nouvelles tout en entraînant l'expansion et l'accélération de l'automatisation. Depuis l'époque du calcul manuel, le coût

du calcul informatique a été réduit dans une proportion comprise entre 1 700 milliards et 76 000 milliards selon l'unité considérée. L'essentiel de cette baisse est postérieure à 1980 (Nordhaus, 2007). Les ordinateurs ont ainsi acquis des fonctionnalités qui les ont mis en concurrence avec l'homme, même dans des tâches pour lesquelles on a longtemps cru que ce dernier conserverait en permanence un avantage cognitif (Elliott, 2014). Par exemple, les chercheurs ont récemment fait état de progrès de l'IA surpassant les capacités humaines dans un large éventail de tâches liées à la vision (Markoff, 2015a).

Dans les pays de l'OCDE, la plupart des tâches répétitives effectuées dans les industries de transformation sont désormais automatisées. Les véhicules de manutention de marchandises et les chariots élévateurs à fourche sont de plus en plus informatisés. De nombreux entrepôts semi-automatisés sont peuplés de robots rapides et agiles. Des aspects complexes du travail des ingénieurs en logiciels peuvent être accomplis par des algorithmes (Hoos, 2012). Une version de l'ordinateur Watson d'IBM peut assumer les fonctions de conseiller clientèle (Rotman, 2013). Le programme Quill établit des rapports de gestion et d'analyse tandis que le programme Automated Insights rédige des textes à partir de tableurs. Le « manager informatique », qui distribue des tâches assorties de délais, est à l'essai et l'expérience est bien accueillie par les équipes de personnel concernées (Lorentz et al., 2015). De récents logiciels parviennent à interpréter certaines émotions humaines mieux que l'homme, ce qui laisse présager de nouvelles formes d'interactions machine-homme (Khatchadourian, 2015). Enfin, des véhicules autonomes pourraient bientôt effectuer certaines tâches en remplacement d'un grand nombre de chauffeurs.

Il est plus facile de définir par un code informatique les tâches répétitives que celles non répétitives. Dans les deux cas, il peut s'agir de tâches manuelles ou cognitives². Ces dernières décennies, sur les marchés du travail des pays développés, l'emploi a progressé dans les métiers fortement et peu rémunérés, alors qu'il a reculé dans les postes à salaire moyen. Cette polarisation a été mise en corrélation avec le repli de l'emploi dans les métiers qui comportent de nombreuses tâches répétitives (Goos et Manning, 2007 ; Acemoglu, 2002). Comme les tâches manuelles de nombreux métiers du tertiaire sont plus difficiles à définir par des codes, l'automatisation contribue également à déplacer l'emploi des activités de transformation à salaire moyen vers les activités de service faiblement rémunérées (Autor et Dorn, 2013).

C'est en temps de crise que l'on accorde une plus grande importance aux répercussions des technologies sur le marché du travail. En particulier, les craintes pour l'emploi tendent à s'exacerber pendant les crises économiques (Mokyr, Vickers et Ziebarth, 2015), ce qui contribue certainement à expliquer le récent regain d'anxiété à l'égard de la technologie. Cette inquiétude vis-à-vis du lien entre technologie et emploi est peut-être aussi la manifestation de biais cognitifs. En effet, la nouveauté technologique attire une attention démesurée ; il est plus facile de rendre compte des emplois perdus que des emplois gagnés ; de même qu'il est difficile de savoir à quoi ressembleront les emplois de demain. On constate cependant que le récent épisode de récession a accéléré le remplacement du travail humain par les systèmes informatisés (Jaimovich et Siu, 2012).

Le progrès technologique crée aussi des emplois par différents voies

Les entreprises investissent dans les nouvelles technologies pour accroître leur productivité (mais aussi, par exemple, pour se mettre en conformité avec la réglementation et renforcer la sécurité). L'augmentation de la productivité ainsi obtenue s'accompagnera, selon le cas, d'une diminution, d'une hausse ou d'une variation nulle des effectifs de l'entreprise.

Pour l'entreprise, le résultat réel de la production dépend de l'élasticité des prix de la demande. Lorsque cette demande est sensible à la variation des prix, leur diminution, aussi modeste soit-elle, peut se traduire par une hausse des effectifs de l'entreprise (Autor, 2015).

Les gains de productivité apportés par les technologies profitent à l'économie suivant une ou plusieurs des voies suivantes : baisse des prix à la production, hausse des salaires ou augmentation des bénéfices. La baisse des prix à la production élève le revenu réel des consommateurs, ce qui peut faire grimper la demande d'autres biens et services. La hausse des salaires peut s'accompagner d'une progression de la demande et de la création d'emplois sur d'autres marchés. Le surplus de bénéfices est distribué aux actionnaires, qui, selon le cas, dépensent ce nouveau revenu en partie ou en totalité, faisant ainsi croître la demande globale. Par ailleurs, à terme, la hausse de l'épargne des actionnaires ou des travailleurs entraîne une diminution des taux d'intérêt et une augmentation des investissements, source d'emplois.

Les principaux aspects de cette relation entre technologie et emploi concernent l'équilibre quantitatif entre les emplois perdus et gagnés, les caractéristiques de ces emplois, ainsi que la durée et l'efficacité du marché du travail et des autres processus d'ajustement économique en jeu. Ces processus d'ajustement sont conditionnés par l'efficacité des institutions (par exemple des services financiers qui servent d'intermédiaire entre l'épargne et l'investissement) et de l'arsenal de politiques engagées sur les plans microéconomique et macroéconomique. Si l'équilibre concurrentiel général peut être espéré dans un horizon lointain, des obstacles peuvent surgir à plus court terme. Il est possible, par exemple, que les bénéfices ne soient pas réinvestis en raison d'une demande escomptée trop faible (ce qui, inversement, peut s'expliquer en partie par un niveau de profit trop élevé, frein à la consommation).

Les données accumulées montrent que le changement technologique a une incidence globale positive sur l'économie et les marchés du travail. On ne citera ici qu'un petit échantillon d'études de pays :

- D'après les estimations, les investissements dans les TIC ont entraîné une augmentation de la demande totale de main-d'œuvre dans 19 pays de l'OCDE au cours de la période 1990-2007 (mais l'ont fait baisser après 2007). Ils semblent ne pas avoir d'effet à long terme sur ce plan. La diminution constante du coût de l'équipement TIC a réduit la demande de main-d'œuvre par unité de production, mais a fait croître la production dans la même proportion. Cette neutralité globale en termes d'emploi s'accompagne en revanche d'un transfert de l'emploi des secteurs manufacturiers vers les services (OCDE, 2016a).
- Sous l'effet des chocs technologiques à l'origine de gains de productivité, l'emploi pourrait se contracter à court terme puis repartir à la hausse à moyen terme (Basu, Fernald et Kimball, 2006). De tels chocs réduisent le chômage pour plusieurs années (Trehan, 2003).
- De 1964 à 2013, les États-Unis ont vu 74 millions d'emplois créés parallèlement à une accélération de l'automatisation, (Levy et Murnane, 2013).
- En Angleterre et au Pays de Galles, sur une période d'un siècle et demi, le changement technologique a entraîné une création nette d'emplois (Stewart, Debapratim et Cole, 2014). La part des emplois nécessitant de la force physique a diminué, passant de 24 % en 1871 à 8 % en 2011, au profit des emplois nécessitant sollicitude et empathie, dont la part est passée de 1 % en 1871 à 12 % en 2011. Les emplois aux tâches répétitives ont été les plus fortement touchés.

Au niveau des entreprises et des secteurs aussi, l'incidence du changement technologique sur l'emploi a été globalement positive. Les technologies qui améliorent la productivité font,

selon le cas, disparaître ou gagner des emplois (Miller et Atkinson, 2013). Sont toutefois majoritaires les entreprises et les secteurs qui enregistrent une croissance de l'emploi³.

L'adaptation risque néanmoins d'être douloureuse

La première révolution industrielle a fini par entraîner une amélioration sans précédent du niveau de vie. Cependant, pour de nombreux travailleurs, cette révolution a été synonyme de difficultés. En effet, l'élévation du niveau de vie moyen a pris plusieurs décennies, soit généralement plus longtemps que la durée normale de la vie professionnelle (Mokyr, Vickers et Ziebarth, 2015).

Beaucoup pâtiraient certainement d'une vague de suppressions d'emplois qui viendrait frapper un grand secteur ou plusieurs branches en même temps. La technologie des véhicules sans conducteur est fréquemment citée en exemple. À l'heure actuelle, 15 États membres de l'Union européenne comptent un peu plus de 3 millions de conducteurs routiers. La disparition de ce métier secouerait le marché du travail, quand bien même les véhicules autonomes mettraient du temps à dominer la flotte des véhicules utilitaires. Cependant, la probabilité est faible de voir de grandes avancées technologiques toucher simultanément plusieurs secteurs (Miller et Atkinson, 2013). Quel que soit le secteur considéré, il n'est pas toujours simple d'anticiper les effets d'une nouvelle technologie sur l'emploi. Ainsi, selon toute vraisemblance, les véhicules totalement autonomes ne pourront pas complètement remplacer les conducteurs : dans le cas des livreurs, par exemple, beaucoup entretiennent avec la clientèle des interactions dont les machines sont actuellement incapables (Markoff, 2015b).

Il est souvent difficile de prévoir quels types précis d'emplois découleront des nouvelles technologies. Ainsi, après l'arrivée des ordinateurs personnels au début des années 80, plus de 1 500 nouveaux intitulés de postes sont apparus sur le marché du travail des États-Unis, de concepteur de sites web à administrateur de bases de données (Berger et Frey, 2014). Les nouvelles technologies peuvent également avoir des incidences indirectes et inattendues sur l'emploi, qui rendent difficile d'anticiper l'avenir. Par exemple, Toyota a décidé de réintégrer des travailleurs humains dans son processus de fabrication après s'être rendu compte que les spécialistes contribuaient à améliorer les procédés de production d'une manière dont les robots sont actuellement incapables (Markoff, 2015b). Dans l'avenir, une fois que la sécurité des voitures autonomes sera établie, la demande de main-d'œuvre pourrait chuter dans les ateliers de réparation automobile, à l'instar des besoins en personnel dans les compagnies d'assurance (Jain, O'Reilly et Silk, 2015).

Il n'est pas non plus possible de prédire avec précision comment les nouvelles technologies transformeront les métiers existants. Dans la banque, on a longtemps cru que les guichets automatiques (GAB), apparus dans les années 70, scelleraient la disparition des guichetiers humains. Pourtant, aux États-Unis, leur part dans les effectifs bancaires n'a que légèrement fléchi entre 1971 et 1997, passant d'un peu moins de 21 % à 18 % environ (Handel, 2012). Numériquement parlant, c'est dans les services d'appui que les banques ont opéré le plus grand remaniement, c'est-à-dire au niveau des emplois de bureau (Markoff, 2015b). En revanche, la nature des tâches des guichetiers humains a évolué et exige désormais des qualifications plus élevées (par exemple, pour le conseil financier)⁴.

Si l'automatisation progresse rapidement, le remplacement des travailleurs par la machine n'en rencontre pas moins des limites. Frey et Osborne (2013) recensent trois grandes catégories d'aptitudes dans lesquelles il est peu probable que des systèmes

commandés par ordinateur parviennent à surpasser les travailleurs dans un avenir proche : l'intelligence créative, l'intelligence sociale (qui intervient, par exemple, dans les soins et le service à la personne), ainsi que la perception et la manipulation d'objets (aptitudes notamment requises dans des environnements non structurés ou évolutifs). Le bon sens aussi, qualité difficile à définir mais essentielle dans la plupart des emplois, est extrêmement difficile à reproduire à l'aide des machines (Davis et Marcus, 2015).

Les décideurs politiques doivent surveiller l'évolution de la situation et anticiper les processus d'adaptation

Les données accumulées montrent que les technologies qui améliorent la productivité conduisent à des ajustements du marché du travail aux niveaux de revenu plus élevés. Il apparaît également que ces ajustements pourraient provoquer de fortes perturbations, mais que l'on ne sait pas exactement à quel rythme et dans quelles proportions interviendront ceux qu'il faudra inévitablement opérer dans l'avenir. Le pire scénario envisageable est que des emplois seront supprimés à une échelle et à une cadence encore inédites, que les robots rendront la répartition des revenus encore plus inégale qu'aujourd'hui et que les salaires des travailleurs non qualifiés tomberont sous les niveaux socialement acceptables. Les décideurs politiques doivent par conséquent suivre l'évolution de la situation et se préparer à de telles éventualités.

Les technologies numériques et la production de demain

Dans le chapitre 2, Christian Reimsbach-Kounatze examine le rôle des technologies numériques dans la production de demain. Deux tendances expliquent les transformations de la production liées aux technologies numériques : i) la chute des coûts, qui a permis d'élargir la diffusion ; et ii) la combinaison de différentes TIC, ainsi que leur convergence avec d'autres technologies (en particulier grâce à l'intégration des logiciels et à l'IdO).

Le chapitre 2 dépeint les effets des grandes technologies numériques (données massives, infonuagique et l'IdO) et leurs conséquences dans le champ de l'action publique. L'expression « données massives » se rapporte aux données caractérisées par leur volume, la vitesse à laquelle elles sont générées, mises à disposition, traitées et analysées, et leur variété (données structurées et non structurées). Elles ouvrent la voie à des améliorations majeures des produits, des procédés, des méthodes organisationnelles et des marchés. L'innovation fondée sur les données influera sur la production et la productivité de l'économie tout entière, que ce soit dans l'industrie manufacturière, les services ou l'agriculture.

Ainsi qu'il ressort de plusieurs chapitres du présent rapport, de nombreuses applications industrielles à fort potentiel – comme les machines et systèmes autonomes ou encore la simulation complexe – nécessitent une puissance de calcul élevée. L'infonuagique a contribué à améliorer la disponibilité, à accroître la capacité et à réduire le coût des ressources informatiques, en particulier pour les start-ups et pour les petites et moyennes entreprises (PME). Cela dit, le recours à l'infonuagique varie grandement d'un pays et d'une entreprise à l'autre, en particulier entre les entreprises de diverses tailles.

L'IdO est porteur de mutations. En effet, la connexion d'appareils et d'objets à l'internet peut rendre les processus plus efficaces, accélérer la prise de décision, resserrer la cohérence de l'offre, améliorer le service client et renforcer la prévisibilité des coûts (Vodafone, 2015). Grâce aux nouveaux capteurs et dispositifs de commande, combinés à l'analyse des données massives et à l'infonuagique, l'IdO permet de faire fonctionner des machines de plus en plus autonomes. Un autre effet notable est que l'industrie ressemble de plus en plus au secteur

des services. La raison en est que les entreprises manufacturières peuvent désormais proposer à leurs clients de nouveaux services facturés à l'usage, sur la base des données relatives à l'utilisation des produits, transmises en temps réel. Ainsi, les fabricants d'équipements de production d'énergie ont de plus en plus recours aux données des capteurs pour aider les clients à optimiser la planification de projets complexes.

TIC et données, promouvoir l'investissement et faciliter leur utilisation : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics

Les États désireux de favoriser la mise à disposition des TIC clés devraient envisager de soutenir les investissements en faveur de la R-D dans les technologies génériques comme l'analyse des données massives, l'infonuagique et l'informatique à hautes performances, l'IdO et les technologies qui renforcent la sécurité et la protection de la vie privée. Par exemple, dans sa stratégie nationale pour l'économie numérique lancée en 2014, le Canada a prévu d'investir 15 millions CAD sur trois ans pour soutenir la recherche de pointe dans les technologies quantiques et la commercialisation des résultats de ces activités.

Les pouvoirs publics devraient envisager d'agir sur la demande pour encourager les investissements en faveur des TIC génériques et leur adoption, en particulier au sein des PME, par exemple en favorisant la conduite d'activités de sensibilisation, de formation et de mentorat ou encore la mise en place de systèmes de bons. Des politiques d'action sur la demande devraient également venir compléter celles (déjà en place) qui visent à stimuler l'offre de TIC. En Allemagne, par exemple, les politiques qui soutiennent l'investissement dans la R-D liée aux applications industrielles des TIC, les activités de recherche concernant la sécurité informatique, la microélectronique et les services numériques s'accompagnent de politiques d'action sur la demande, qui concernent notamment la sensibilisation et la formation (comme en témoignent les deux centres de *big data* de Berlin et de Dresde).

Les pouvoirs publics devraient encourager à investir dans les données qui ont des retombées positives dans différents secteurs et qui revêtent une valeur sociale supérieure à leur valeur privée, tout en s'attaquant à la problématique de la faible appropriation des avantages du partage des données. Concernant ce dernier point, il faudrait réfléchir à des solutions combinant droits de propriété intellectuelle (DPI), licences et mécanismes d'incitation alternatifs (par exemple, citations et dons de données).

Les pouvoirs publics devraient promouvoir les normes ouvertes, en particulier eu égard aux interfaces de programmation d'application (API) et aux formats de données. Les normes fondées sur des modèles de référence favorables à la concurrence et technologiquement ouverts pourraient renforcer l'interopérabilité et la réutilisation des données, dynamiser les services numériques et réduire les verrouillages technologiques tout en stimulant la concurrence entre prestataires de services. Dans sa stratégie sur l'économie de l'information, le Royaume-Uni accorde une place importante à l'élaboration de normes au niveau international.

Les obstacles à la diffusion des TIC, à l'interopérabilité et aux normes devraient disparaître

L'un des principaux constats du chapitre 2 est que beaucoup d'entreprises, en particulier parmi les PME, tardent à adopter les TIC. Ainsi, leur utilisation des solutions de gestion de la chaîne d'approvisionnement, des progiciels de gestion intégrés et des applications infonuagiques reste très inférieure à celle des réseaux haut débit ou des sites internet. Ces TIC avancées sont pourtant à l'origine de la transformation numérique de la production industrielle.

Les politiques d'identification et de numérotation jouent un rôle important dans l'interopérabilité de l'IdO. Les administrations et les régulateurs devraient accorder une attention particulière à la libéralisation de l'attribution des numéros d'identité internationale d'abonnement mobile (IMSI). Ces numéros permettent aux acteurs de différents secteurs de l'économie, des constructeurs automobiles aux entreprises énergétiques, d'obtenir des cartes SIM sans passer par les opérateurs mobiles. Cette solution leur confère une plus grande souplesse au moment de choisir un réseau mobile donné et facilite le déploiement transnational de l'IdO. Les Pays-Bas ont été le premier pays à libéraliser l'attribution des numéros IMSI.

Les technologies numériques apportent aussi leur lot de risques et de difficultés d'ordre réglementaire. Ainsi, bien que l'analyse des données offre de nouveaux moyens de prendre des décisions susceptibles d'élever la productivité, les décisions fondées sur les données et l'IA ne sont pas pour autant infaillibles. Le risque que de mauvaises décisions soient prises soulève des questions quant à la répartition des responsabilités entre décideurs, fournisseurs des données et fournisseurs de TIC (logiciels inclus). Les nouvelles TIC pourraient également susciter de vives inquiétudes pour la protection de la vie privée et des consommateurs ainsi que dans les domaines du droit de la concurrence et de la fiscalité. Il est possible que les cadres réglementaires existants se révèlent dans certains cas inadaptés.

Faire face à de nouveaux risques et incertitudes : principales considérations intéressantes l'action des pouvoirs publics

Les pouvoirs publics devront peut-être intervenir si les incertitudes réglementaires empêchent l'adoption des TIC. C'est en particulier le cas lorsque des réglementations conçues pour l'ère pré-numérique ont pour effet involontaire de protéger les entreprises en place contre les nouvelles formes de concurrence. Par exemple, la suppression des obstacles réglementaires à l'entrée du marché des communications mobiles permettrait à certains constructeurs de véhicules, dont les flottes contiennent des millions d'appareils connectés, de s'affranchir des opérateurs de réseau mobile, ce qui renforcerait aussi la concurrence.

Les pouvoirs publics devraient soutenir une culture de la gestion du risque numérique (comme l'OCDE le préconise dans sa Recommandation de 2015 sur la gestion du risque de sécurité numérique pour la prospérité économique et sociale [OCDE, 2015e]). Dans l'environnement numérique, les approches traditionnelles de la sécurité risquent de ne pas protéger pleinement les actifs et d'étouffer l'innovation. Les obstacles les plus fréquents à la culture de gestion du risque numérique, en particulier dans les PME, sont le manque de savoir-faire et la croyance que la sécurité numérique est un domaine technique de la gestion informatique, qui ne relève pas de la gestion opérationnelle. Dans certains pays, les pouvoirs publics ont donc entrepris de favoriser l'information, la formation et l'éducation dans le domaine de la gestion du risque numérique. En France, par exemple, conformément à la stratégie nationale pour la sécurité numérique, le secrétariat d'État au Numérique coordonnera, avec d'autres ministères et l'Agence nationale pour la sécurité des systèmes d'information (ANSSI), un programme de sensibilisation à la cybersécurité à l'intention des professionnels.

Les obstacles au libre accès à l'internet, qu'ils soient légitimes ou non, peuvent limiter le développement du numérique. Les plus fréquents sont les conditions techniques (comme le filtrage des paquets IP) et les efforts de « localisation des données » (obligation légale d'implanter les serveurs sur les marchés locaux par exemple). Leurs effets sont particulièrement marqués lorsque les services fondés sur des données sont de médiocre qualité, en raison des insuffisances de l'infrastructure informatique. Cependant, l'ouverture de l'internet n'est pas sans danger, par exemple, si elle sert des activités malveillantes. C'est pourquoi certains obstacles trouvent leur fondement dans la loi ou dans l'impératif de sécurité.

Faire face à de nouveaux risques et incertitudes : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics (suite)

Il faudrait examiner les obstacles à la réutilisation, au partage et au couplage des données, obstacles qui peuvent être de différents ordres. Parmi les obstacles techniques figurent les contraintes résultant notamment des difficultés de lisibilité des données par les machines, selon les plateformes. Des obstacles juridiques peuvent aussi compromettre la réutilisation et le partage des données. Il arrive par exemple que les clauses de « rétention des données » qui figurent dans de nombreux contrats soient utilisées pour empêcher les clients de changer de prestataire. Enfin, l'accès non discriminatoire aux données – via les biens communs de données, l'ouverture des données et la portabilité des données – permet aujourd'hui à leurs utilisateurs de créer de la valeur par des voies que l'on n'avait généralement pas imaginées au moment de la création des données.

Il faudrait mettre en place des cadres cohérents de gouvernance des données. L'accès aux données ne doit pas être nécessairement gratuit ou non réglementé : il convient de trouver un juste équilibre entre l'ouverture des données (et les avantages sociaux qui résultent de l'amélioration de l'accessibilité et de la réutilisation des données) et les préoccupations légitimes de tous ceux dont la vie privée et les DPI s'en trouvent exposés. Cela suppose d'appliquer et de contrôler la gouvernance des données suivant une approche qui englobe toutes les administrations.

Les pouvoirs publics peuvent encourager l'utilisation responsable des données personnelles pour empêcher les violations de la vie privée. Ils pourraient promouvoir les technologies qui renforcent la protection de la vie privée et donner plus de moyens aux particuliers dans ce domaine en améliorant la transparence du traitement des données et la portabilité des données. Midata, au Royaume-Uni, et MesInfos, en France, sont des exemples d'initiatives prises dans ce sens. Il pourrait être nécessaire de rendre les autorités chargées de l'application des règles de protection de la vie privée plus efficaces (c'est-à-dire en les dotant de moyens et de compétences techniques).

Les pouvoirs publics devront peut-être évaluer la concentration des marchés et les obstacles à la concurrence au moyen de définitions actualisées des marchés visés et en tenant compte des préjudices causés aux consommateurs par les infractions à la vie privée. Cela pourrait nécessiter également l'instauration d'un dialogue entre les autorités chargées de la réglementation (en particulier dans les domaines de la concurrence, de la protection de la vie privée et de la défense des consommateurs).

Il est nécessaire d'approfondir la réflexion sur la répartition des responsabilités et obligations en cas de décisions inadéquates fondées sur les données. Les pouvoirs publics pourraient devoir établir si les réglementations et lois existantes répondent pleinement au problème de la répartition des responsabilités et des obligations (entre les décideurs, d'une part, et les fournisseurs des données et des fonctions d'analytique, d'autre part) en cas de décisions préjudiciables fondées sur les données. L'établissement d'un dialogue multipartite au niveau national et international pourrait favoriser les échanges de bonnes pratiques.

Il est nécessaire d'examiner avec attention le bien-fondé de la prise de décision entièrement automatisée, les exigences de transparence et l'intervention humaine requise dans les domaines dans lesquels les décisions automatisées sont potentiellement très préjudiciables. Les exigences de transparence pourraient devoir s'élargir aux processus et algorithmes qui sous-tendent la prise de décision automatisée. Cela dit, ces exigences de transparence pourraient aller à l'encontre des DPI ou encore de la valeur économique des processus et algorithmes qui se trouvent au cœur des opérations de certaines entreprises. D'autres études doivent être réalisées pour déterminer comment évaluer au mieux le bien-fondé des algorithmes sans violation des DPI applicables.

Bioproduction et bioéconomie

La biotechnologie industrielle implique la production de biens à partir de biomasse durable et non de ressources fossiles épuisables. Cette biomasse peut être issue du bois, des cultures vivrières et non vivrières, voire des déchets ménagers. L'expansion de la

bioéconomie est indispensable. L'actualité de 2015 (COP21 et Sommet mondial sur la bioéconomie) a propulsé le concept de bioéconomie sous les projecteurs de la scène politique. Comme décrit dans le chapitre 3, une économie de plus en plus fondée sur les biotechnologies pourrait aider à concilier les enjeux économiques et environnementaux de l'action publique ainsi qu'à atteindre des objectifs comme le développement industriel rural. Au moins 50 pays, dont ceux du G7, sont dotés d'une stratégie nationale en faveur de la bioéconomie ou de politiques connexes.

Bien des progrès et réalisations ont été obtenus dans la biotechnologie industrielle. Par exemple, plusieurs décennies de recherche en biologie ont donné naissance à la biologie de synthèse et aux technologies d'édition du génome (encadré 1.3). Alliés à la génomique moderne, qui constitue la base d'informations de toutes les sciences modernes du vivant, les outils sont en place pour amorcer une révolution biotechnologique dans la production. Les percées les plus récentes vont des biobatteries à la photosynthèse artificielle, en passant par les micro-organismes capables de produire des biocarburants. Début 2017, il a même été annoncé que des scientifiques avaient réussi à synthétiser du graphène à partir d'huile de soja (découvert en 2002, ce matériau pourrait révolutionner l'électronique et de nombreux autres secteurs, mais il était jusqu'à présent difficile d'en obtenir en grande quantité).

Encadré 1.3. **Quelles sont ces technologies ?**

Génomique : discipline qui fait appel aux techniques de recombinaison de l'acide désoxyribonucléique (ADN), de séquençage de l'ADN et à la bio-informatique pour séquencer, assembler et analyser la fonction et la structure des génomes. À bien des égards, elle s'apparente à une technologie de l'information, à une différence près : le code n'est pas numérique, mais génétique.

Chimie verte : discipline qui implique de concevoir des procédés chimiques inoffensifs pour l'environnement débouchant sur la fabrication de produits chimiques ayant une plus faible empreinte écologique.

Ingénierie métabolique : discipline utilisant le génie génétique pour modifier le métabolisme d'un organisme. Il peut s'agir d'optimiser des voies biochimiques existantes ou d'intégrer des composés métaboliques, le plus souvent, dans des bactéries, de la levure ou des plantes, afin de produire avec un rendement élevé des molécules à usage médical ou biotechnologique.

Biologie de synthèse : discipline consistant à concevoir et à modifier des éléments biologiques, des fonctions et des systèmes nouveaux, et à reconstruire des systèmes biologiques naturels existants.

Aussi remarquables soient ces nouvelles avancées, c'est avec le déploiement de bioraffineries de pointe que la biotechnologie industrielle pourra jouer à moyen terme un rôle environnemental déterminant (Kleinschmit et al., 2014). En substance, une bioraffinerie transforme de la biomasse en produits commercialisables (denrées, alimentation animale, matériaux, produits chimiques) et en énergie (combustible, électricité, chaleur). Sur la base d'une récente enquête de l'OCDE, les différentes lignes de conduite adoptées dans le monde pour développer les bioraffineries de pointe sont résumées dans le chapitre 3.

Les stratégies en faveur du bioraffinage doivent se préoccuper de la durabilité de la biomasse employée. Les pouvoirs publics peuvent concourir à la mise en place de chaînes d'approvisionnement durables. Il est surtout urgent qu'ils soutiennent les efforts engagés pour établir une définition complète ou universelle de la durabilité (en ce qui concerne les

matières de base), des outils de mesure et des accords internationaux sur les indicateurs requis afin de stimuler les activités de collecte de données et de mesure (Bosch, van de Pol et Philp, 2015). Il est par ailleurs indispensable de disposer de normes de performance environnementale applicables aux bioproduits dans la mesure où très peu rivalisent actuellement avec les produits pétrochimiques en termes de coût et que la réglementation impose souvent une exigence de durabilité.

Des bioraffineries de démonstration sont en activité en phase pilote et commerciale. Indispensables pour répondre aux questions techniques et économiques entourant la production avant l'étape des investissements coûteux à grande échelle, elles n'en sont pas moins des investissements à haut risque dans la mesure où les technologies concernées n'ont pas encore été éprouvées. Il est donc nécessaire de les financer au moyen de partenariats public-privé pour limiter les risques encourus par les parties privées et démontrer la volonté des pouvoirs publics de poursuivre dans la durée des politiques cohérentes dans les domaines de l'énergie et de la production industrielle.

Alors que les biocombustibles font l'objet d'initiatives depuis déjà plusieurs décennies, les pouvoirs publics ne prêtent guère attention aux produits chimiques fondés sur les biotechnologies, qui présentent pourtant un potentiel immense de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Weiss et al., 2012).

Comme exposé dans le chapitre 3, les pouvoirs publics pourraient soutenir de diverses manières la bioproduction et l'ingénierie métabolique (qui consiste à utiliser le génie génétique pour modifier le métabolisme de micro-organismes afin de les transformer en produits utiles) aux stades de la R-D et de la commercialisation. Il s'agit par exemple d'accompagner la R-D à la confluence de la biotechnologie industrielle et des nouveaux procédés chimiques inoffensifs pour l'environnement, d'améliorer les méthodes de calcul et d'analyse de données ou encore de perfectionner les technologies numériques liées à la biologie de synthèse (qui implique l'écriture d'un nouveau code génétique) et à l'ingénierie métabolique.

Plusieurs types de mesures sont nécessaires pour que le potentiel de la production fondée sur les biotechnologies puisse être concrétisé : notamment, soutien public à la recherche, élaboration d'une échelle de durabilité de la biomasse, programmes d'étiquetage des produits à l'intention des consommateurs, initiatives en faveur de l'enseignement et de la formation. L'acheminement vers un système de production de l'énergie et de matériaux fondé sur les ressources renouvelables sera long et semé d'embûches techniques et politiques. À la différence des transitions antérieures, du bois au charbon, puis du charbon au pétrole, la tâche est compliquée par les défis planétaires qui se posent aujourd'hui et qui la rendent d'autant plus urgente.

Bioproduction et biotechnologie industrielle : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics

Les pouvoirs publics pourraient aider à la création de chaînes d'approvisionnement durables pour la bioproduction. Le suivi et le contrôle de la collecte des cultures et des déchets sont des tâches essentielles. À l'heure actuelle, il n'existe aucune définition exhaustive ou universelle de la durabilité (pour ce qui concerne les produits d'alimentation). Il n'existe pas non plus d'outil idéal pour la mesurer, ni de consensus international concernant les indicateurs à utiliser pour obtenir des données sur lesquelles s'appuieraient les mesures (Bosch, van de Pol et Philp, 2015). Pas plus qu'il n'existe de normes de performances

Bioproduction et biotechnologie industrielle : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics (suite)

environnementales pour les biomatériaux. Les différends se multiplient autour de la biomasse et risquent de conduire à l'émergence de barrières commerciales internationales. Qui plus est, une mosaïque de réglementations et de normes volontaires composent la gouvernance internationale en matière de biomasse durable. La mise en place d'une instance chargée du règlement des différends pourrait contribuer à y remédier.

Les bioraffineries de démonstration sont indispensables pour répondre aux questions techniques et économiques avant de réaliser des investissements coûteux à grande échelle. Les investissements à réaliser dans les bioraffineries et les installations de démonstration présentent des risques élevés et les technologies ne sont pas encore éprouvées. Il faut en assurer le financement au moyen de partenariats public-privé pour réduire les risques associés aux investissements privés.

L'un des principaux enjeux de la bioproduction tient à son caractère pluridisciplinaire. Les chercheurs devront être en mesure de collaborer à la croisée d'une multitude de disciplines : agriculture, biologie, biochimie, chimie des polymères, science des matériaux, ingénierie, évaluation environnementale, économie, mais aussi politiques publiques. Les subventions de la recherche et de la formation devront contribuer à donner les technologies requises, mais aussi les experts techniques nécessaires (Delebecque et Philp, 2015). Les pouvoirs publics disposent d'un certain nombre de solutions éprouvées pour relever ce défi, par exemple créer des filières diplômantes dans la recherche qui offrent des débouchés dans le monde de l'entreprise plutôt qu'en milieu universitaire.

En termes de réglementation, les pouvoirs publics devraient se concentrer sur trois objectifs :

- Favoriser l'utilisation d'instruments, en particulier les normes, afin de faire disparaître les obstacles aux échanges de bioproduits.
- S'attaquer aux contraintes réglementaires qui freinent les investissements.
- Fixer pour les bioproduits des règles équivalentes à celles applicables aux biocombustibles et à la bioénergie (Philp, 2015).

Une meilleure réglementation des déchets pourrait également doper la bioéconomie. Il faudrait par exemple qu'elle soit moins normative et plus souple, de manière à autoriser le bioraffinage des résidus agricoles et forestiers ainsi que des déchets ménagers.

À travers la passation des marchés publics, les administrations pourraient jouer un rôle de premier plan dans la tenue du marché. Les biomatériaux ne peuvent pas toujours faire l'objet de marchés publics car ils ne constituent parfois qu'une partie d'un produit (par exemple ceux qui entrent dans la fabrication des écrans de téléphones portables). Il est beaucoup plus facile en revanche de passer des commandes publiques de biocarburants (par exemple, pour les parcs de véhicules publics).

Exploiter les potentialités offertes par les nanotechnologies

Dans le chapitre 4, Steffi Friedrichs étudie la relation entre nanotechnologie et production. Le préfixe *nano-* signifie un milliardième de l'unité considérée. Par exemple, 1 nanomètre (nm) est un milliardième de mètre. Dans leur acception la plus large, les nanotechnologies désignent l'ensemble des phénomènes et processus intervenant à une échelle comprise entre 1 et 100 nm (à titre de comparaison, une feuille de papier mesure environ 100 000 nm d'épaisseur). Les interactions qui s'opèrent à ce niveau sont fondamentales pour la vie et le monde matériel.

L'échelle nanométrique est le domaine où les atomes, dépourvus de propriétés physiques propres, forment des liaisons entre eux, constituant ainsi les unités fonctionnelles les plus petites (nanométriques) de la matière, dont on observe les propriétés, les fonctionnalités et les mécanismes dans les mondes inorganique et organique.

Ainsi que l'explique Friedrichs, la maîtrise de la matière à l'échelle nanométrique constitue une technologie généraliste qui trouve des applications à tous les niveaux de la production. Les domaines concernés sont très divers, comme en témoignent les innovations récentes : le calculateur quantique (physique), les matières invisibles (chimie des solides), les tissus artificiels et les cellules solaires biomimétiques (biologie) ainsi que les appareils nanométriques employés à des fins de diagnostic médical et de traitement thérapeutique (à l'aide des nanosystèmes électromécaniques créés par les ingénieurs). La nanotechnologie peut aider à remplacer les processus de production énergivores par d'autres moins coûteux. Par exemple, pour la fabrication des cellules photovoltaïques, elle permet de remplacer la fusion de zone, énergivore, par l'impression « roll-to-roll » à l'air ambiant. Elle rend aussi possible l'écran souple. Enfin, elle peut servir de fondement à de nouveaux produits de pointe à usage unique (comme les laboratoires sur puce dans le domaine de la diagnostique).

Beaucoup de grandes entreprises se sont d'abord tournées vers les nanotechnologies pour obtenir des innovations de procédé et atteindre des objectifs environnementaux (par exemple, utiliser moins de solvants organiques en travaillant sur des nanoparticules en suspension dans de l'eau). Elles ont en outre davantage recouru aux nanomatériaux avancés dans les processus de fabrication des produits de haute technologie (par exemple, pour le polissage des composants électroniques et optiques).

Dans les années 80, les études de prospective scientifique et technologique annonçaient que la progression serait fulgurante de l'étape initiale de la découverte des techniques de maîtrise de la matière à l'échelle nanométrique jusqu'à objectif final de la construction de n'importe quel système fonctionnel complexe à partir de ses plus petits éléments constitutifs (Drexler 1986). Ces prévisions ont péché par optimisme en sous-estimant l'ampleur des défis techniques à relever. Cela dit, les techniques de production à grande échelle des nanomatériaux se sont considérablement améliorées au cours des dix dernières années. À court et moyen termes, les nanotechnologies vont servir à améliorer les produits et procédés de fabrication existants et, à long terme, elles déboucheront probablement sur des innovations à l'origine de produits et de procédés totalement nouveaux. Les politiques nécessaires pour soutenir la poursuite de l'évolution et de l'utilisation des nanotechnologies sont décrites dans le chapitre 4.

Nanotechnologies : principales considérations intéressantes l'action des pouvoirs publics

Les nanotechnologies rendent nécessaire d'intensifier la collaboration institutionnelle et si possible internationale. Mobiliser l'ensemble des outils de recherche et d'ingénierie nécessaires à la mise en place d'infrastructures complètes de R-D concernant les nanotechnologies risque d'avoir un coût prohibitif. Les équipements de pointe coûtent plusieurs millions d'euros et nécessitent souvent la construction de bâtiments adaptés. En outre, les instruments de recherche les plus puissants n'existent parfois que sous forme de prototypes. Il est donc presque impossible de rassembler des infrastructures nanotechnologiques complètes dans un seul établissement ou même une seule région. D'où l'impératif de mettre en place une collaboration interinstitutionnelle et/ou internationale

Nanotechnologies : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics (suite)

pour pouvoir exploiter tout le potentiel des nanotechnologies. Les programmes de R-D financés par les pouvoirs publics devraient être ouverts aux établissements universitaires et aux entreprises d'autres pays. Cela permettrait de tisser des liens de collaboration ciblés entre des partenaires idoines. C'est le cas, par exemple, de la collaboration mondiale qui s'est nouée dans le cadre du programme Horizon 2020 de l'Union européenne.

Les petites entreprises ont besoin d'être soutenues pour innover et commercialiser le fruit de ces efforts. Le coût relativement élevé de la R-D dans les nanotechnologies empêche les petites entreprises d'innover et de réussir dans ce domaine. Les grandes entreprises dominent le secteur car, fortes de leur masse critique de R-D et de production, de leur capacité à acquérir et à exploiter des instruments coûteux, ainsi qu'à se procurer et à utiliser des connaissances externes, elles sont en meilleure posture pour assimiler les nanotechnologies. Les responsables publics pourraient s'employer à faciliter l'accès des PME aux équipements nécessaires : i) en augmentant les subventions de la recherche accordées aux PME ; ii) en subventionnant/exonérant de redevances l'utilisation de ces équipements ; ou iii) en délivrant des bons d'utilisation aux PME.

L'interdisciplinarité doit être soutenue et encouragée. Les nanotechnologies tendent à prospérer à l'interface des disciplines traditionnelles, autrement dit lorsque des infrastructures de recherche et d'ingénierie spécialisées sont disponibles – favorisant ainsi la multidisciplinarité – et que l'expertise des disciplines traditionnelles est mise en commun. De telles conditions peuvent prendre la forme de réseaux virtuels, comme celui constitué en Allemagne pour soutenir la nanotechnologie biomédicale, ou pour soutenir les établissements de recherche, à travers par exemple les projets de collaboration interdisciplinaire dans la recherche menés au Royaume-Uni. De par leur vocation généraliste, les nanotechnologies influent sur un large éventail d'activités industrielles. Les moyens d'action pourraient devoir être conçus de manière à faciliter les démarches multidisciplinaires.

Il faut lever les incertitudes réglementaires qui entourent l'appréciation des risques et l'homologation des produits issus des nanotechnologies dans le cadre d'exercices de collaboration internationale. Ces incertitudes entravent la commercialisation des innovations associées aux nanotechnologies. Des produits en attente d'autorisation de mise sur le marché peuvent devoir rester dans les cartons pendant plusieurs années avant qu'une décision ne soit prise. Cela a poussé des start-ups pourtant prometteuses à mettre la clé sous la porte, tandis que de grandes entreprises ont pu mener à bien leurs projets de R-D et de mise au point de produits novateurs. Dans un rapport de 2016 sur le traitement de certains produits issus des nanotechnologies dans les flux de déchets, l'OCDE a conclu qu'il fallait redoubler d'efforts pour intégrer les nanotechnologies en toute sécurité dans ses différents domaines d'utilisation (OCDE, 2016b). Les pouvoirs publics devraient soutenir la définition de règles transparentes et opportunes d'évaluation des risques présentés par les produits issus des nanotechnologies, tout en œuvrant à l'harmonisation internationale des recommandations et des mesures d'exécution.

L'action des pouvoirs publics devrait soutenir les nouveaux modèles économiques et de financement de l'innovation. Il convient notamment que ces nouveaux modèles tiennent compte de la nature de plus en plus collaborative de la R-D dans le cas des inventions complexes et des progrès du numérique dans la recherche et les processus de production. Il est nécessaire, par exemple, que les responsables des politiques imaginent des modèles qui permettent de partager librement les données préconcurrentielles sans compromettre la capacité des universités à lever des fonds.

Impression 3D, production et considérations environnementales

L'impression tridimensionnelle, ou impression 3D, se développe rapidement sous l'effet conjugué de la baisse du coût des imprimantes et des consommables, de la qualité toujours plus grande de ses productions et de l'innovation. On annonce pour le marché mondial de l'impression 3D une croissance annuelle de 20 % environ à l'horizon 2020 (MarketsandMarkets, 2014). De récentes innovations permettent d'utiliser de nouveaux matériaux en impression 3D – dont le verre et le métal – et de réaliser des objets composites à structures multiples – comme des batteries et des drones. Les imprimantes à ADN et l'impression de tissus et d'organes à partir de cellules vivantes sont en cours de mise au point. La recherche avance dans le domaine de la matière programmable pour l'impression 3D⁵. De même, il existe désormais des imprimantes 3D hybrides, qui associent la technique de fabrication additive aux fonctions d'usinage et de fraisage à commande numérique.

L'impression 3D offre un certain nombre de possibilités d'améliorer la productivité. Ainsi, l'impression 3D de mécanismes préassemblés pourrait réduire le nombre d'étapes requises dans certains processus de production. Le prototypage rapide peut raccourcir les processus de conception (Gibson, Rosen et Stucker, 2015). Enfin, on est désormais capable d'imprimer des objets autrement impossibles à fabriquer, comme des composants métalliques « noyés » dans d'autres composants, métalliques de manière parfaitement homogènes. Pour l'heure, l'impression 3D sert essentiellement à la construction de prototypes, de modèles et d'outils, la fabrication de pièces détachées de biens de consommation ne représentant que 15 % de ses emplois (Beyer, 2014).

Dans l'industrie manufacturière, l'usinage est le principal procédé employé pour fabriquer des prototypes ou des éléments sur mesure en série limitée. L'impression tridimensionnelle révolutionne déjà le marché des pièces usinées, qu'il s'agisse des pièces en plastique ou en métal. Chez Boeing, par exemple, l'impression 3D a supplanté l'usinage pour la fabrication de plus de 20 000 pièces de 300 modèles différents (Davidson, 2012). Cela dit, l'usinage n'est qu'une petite niche industrielle, qui ne représente, en valeur, qu'une très faible part des ventes de produits manufacturés.

Dans le chapitre 5, Jeremy Faludi analyse, en collaboration avec Natasha Cline-Thomas et Shardul Agrawala, les incidences environnementales de l'impression 3D. Comme ils l'expliquent, la diffusion de l'impression 3D dépendra de son évolution technologique à court terme en ce qui concerne la durée d'impression, le coût, la qualité et la taille des objets imprimés ainsi que le choix des matériaux. Le principal facteur habilitant ou inhibiteur, selon le cas, se trouve être la charge financière liée à l'abandon des méthodes de production de masse au profit de l'impression tridimensionnelle. Les coûts de revient devraient chuter dans les années à venir à mesure que la production progressera en volume (McKinsey Global Institute, 2013), mais il est difficile de prédire avec exactitude la vitesse à laquelle la technologie se déploiera. Il convient d'ajouter à cela que le coût de la conversion varie d'un secteur à l'autre. L'impression 3D devrait pénétrer rapidement les industries où les coûts sont élevés et les volumes restreints, comme le prototypage, l'équipement automobile, l'aérospatiale et la production de certains instruments médicaux. Elle gagnera par contre plus lentement celles où les coûts et volumes sont d'importance moyenne.

Il est intéressant d'analyser les incidences environnementales de l'impression 3D sur deux technologies importantes que sont l'usinage et le moulage par injection. Ces deux procédés industriels très répandus correspondent aux deux extrémités d'un spectre qui va de la création de prototypes uniques à la production en très grande série. Rien que dans ces

deux cas, les incidences environnementales de l'impression tridimensionnelle sont très diverses. Le type d'imprimante, la fréquence d'utilisation, la disposition et la géométrie des pièces, la consommation d'énergie et la toxicité des matériaux d'impression sont autant d'éléments qui entrent en ligne de compte. Certains systèmes expérimentaux affichent déjà un impact environnemental nettement inférieur, par unité produite, à celui du moulage par injection, de l'ordre de 70 % dans certains cas. L'industrie ne semble pas portée vers ce genre de solutions, mais les pouvoirs publics pourraient encourager des choix conformes à l'intérêt général.

Deux des avantages fréquemment attribués à l'impression 3D sur le plan de la durabilité environnementale, à savoir l'élimination des déchets et du transport, méconnaissent le fait que cette technique exige des matériaux extra-purs, souvent impossibles à recycler, et que les matières premières doivent être acheminées vers le site d'impression. Certaines méthodes d'impression réclament un tel degré de pureté des matériaux que le recyclage en devient inenvisageable.

Il n'empêche que l'impression 3D peut rendre possible une utilisation des matériaux plus conforme aux impératifs de durabilité environnementale. En effet :

- Elle permet de façonner de nombreux matériaux comme seul le plastique pouvait l'être jusque-là.
- Elle abaisse les obstacles à la substitution des matériaux en diminuant le rôle des économies d'échelle dans certains processus.
- Elle peut permettre d'employer des intrants chimiques en plus faible quantité tout en modifiant plus profondément les propriétés des matériaux, grâce à différents procédés d'impression.

L'impression 3D de certaines pièces est par ailleurs susceptible de réduire leur empreinte écologique en raison de l'emploi qui en est fait, indépendamment de l'ampleur des incidences environnementales de leur fabrication. Cette diminution de l'empreinte écologique peut s'obtenir de deux manières : i) en réduisant le poids des produits ou en améliorant l'efficacité énergétique par d'autres moyens (General Electric a abaissé de 15 % la consommation de carburant d'un moteur à réaction en le rendant plus léger grâce à des pièces fabriquées par impression tridimensionnelle [Beyer, 2014]) ; et ii) en imprimant les pièces de rechange de produits obsolètes qui seraient autrement éliminés. Par exemple, une machine à laver qui n'est plus fabriquée risque d'être mise au rebut pour peu qu'une seule pièce casse. Un tel gaspillage peut être évité grâce au fichier numérique correspondant à l'image de la pièce en question.

Impression 3D et durabilité : principales considérations intéressantes pour l'action des pouvoirs publics

Pour favoriser la durabilité dans le domaine de l'impression 3D, les pouvoirs publics devraient avant tout encourager l'emploi de procédés sobres en énergie et de matériaux ayant une faible empreinte environnementale et des caractéristiques de fin de vie intéressantes. De par leur conception et leur fonctionnement, les imprimantes peuvent réduire la consommation d'énergie par unité produite : en recourant à des procédés chimiques et non à la fusion de matériaux ; en se mettant automatiquement en veille à l'arrêt de la production ; et en faisant l'objet d'une utilisation optimale (partage d'imprimantes entre utilisateurs et, pour certains modèles, impression simultanée de plusieurs pièces).

Impression 3D et durabilité : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics (suite)

L'emploi de biomatériaux compostables peut aussi réduire l'impact des matériaux sur l'environnement. Enfin, les imprimantes peuvent être conçues et utilisées de manière à consommer moins de matériau de support (qui s'ajoute au matériau d'impression) et, ainsi, à produire moins de déchets. Les dispositifs à mettre en place à cet effet devraient :

- Cibler sur ces priorités les fonds alloués au financement de la commercialisation des résultats de la recherche (dans le cadre des programmes de subvention ou d'investissement existants ou à venir).
- Compte tenu des intérêts de l'ensemble des acteurs concernés, étudier les moyens de supprimer les obstacles liés à la propriété intellectuelle, de manière à permettre la production, par impression tridimensionnelle, de pièces de rechange de produits obsolètes pour lesquels il n'existe pas de chaîne d'approvisionnement (comme la machine à laver évoquée plus haut, dont la réparation dépend d'une seule pièce). Le consommateur équipé d'une imprimante 3D devrait pouvoir retrouver sur son ordinateur le fichier de conception assistée par ordinateur (CAO) nécessaire à l'impression de la pièce voulue. Or la plupart de ces fichiers sont soumis à des droits de propriété. Une solution pourrait être d'encourager des tiers à imprimer des pièces de rechange pour des produits de consommation moyennant, s'il y a lieu, le paiement de redevances au fabricant du produit original.
- Instituer un système de certification volontaire permettant de noter les imprimantes 3D en fonction de leur compatibilité environnementale, mesurée à l'aune de différents critères. Ce système pourrait s'accompagner de programmes d'achat préférentiel au sein des administrations et d'autres grandes institutions.

Les nouveaux matériaux et la prochaine révolution de la production

Dans le chapitre 6, David McDowell analyse l'évolution récente des nouveaux matériaux, leurs multiples répercussions sur la conception et le fonctionnement des produits ainsi que l'action à mener dans ce domaine. Grâce aux avancées de l'instrumentation scientifique, avec par exemple les microscopes à force atomique, les scientifiques peuvent étudier les matériaux comme jamais auparavant. Les progrès des outils de simulation informatique ont également été déterminants. Aujourd'hui, des matériaux aux propriétés entièrement nouvelles font leur apparition : des solides d'une densité comparable à celle de l'air ; des alliages exotiques et des matériaux composites ultralégers et ultrarésistants ; des matériaux à mémoire de forme, capables de se régénérer ou de s'auto-assembler ; ou encore des matériaux qui réagissent à la lumière et au son. Tous ces matériaux sont désormais une réalité (The Economist, 2015).

Grâce aux progrès du calcul informatique, il est à présent possible de modéliser et de simuler la structure et les propriétés d'un matériau pour décider en connaissance de cause de la manière dont il peut être employé dans des produits. Certaines propriétés comme la conductivité, la résistance à la corrosion et l'élasticité peuvent être intégrées de manière intentionnelle dans de nouveaux matériaux. Ce mode de conception assisté par ordinateur accélère la mise au point de matériaux nouveaux ou améliorés, facilite l'intégration de matériaux connus dans des produits nouveaux et permet de perfectionner les produits et procédés existants (par exemple, il est théoriquement possible de remplacer le silicium présent dans les circuits intégrés par d'autres matériaux aux propriétés électriques plus intéressantes). Au cours de la prochaine révolution de la production, les ingénieurs ne concevront plus seulement des produits, mais aussi leurs matériaux de fabrication (Teresko, 2008).

L'importance que revêtent les nouveaux matériaux pour le secteur manufacturier transparait, entre autres, dans l'initiative engagée aux États-Unis en faveur du génome des matériaux, *Materials Genome Initiative* (MGI). Lancée par le Président Obama en juin 2011, la MGI a pour objectif de diviser par deux le temps nécessaire pour découvrir, mettre au point, produire et déployer des matériaux avancés, tout en en diminuant les coûts.

Les nouveaux matériaux et la prochaine révolution de la production : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics

Les décisions prises aux échelles nationale et internationale peuvent fortement peser sur l'évolution de l'écosystème de l'innovation dans les matériaux, élargir les réserves potentielles de collaborateurs et encourager l'adoption de stratégies d'investissement plus efficaces. Aucune entreprise ou organisation ne peut à elle seule détenir l'intégralité de la palette des technologies associées à un tel écosystème collaboratif. Il convient en conséquence de recourir à un modèle d'investissement public-privé, en particulier pour la construction d'infrastructures cyberphysiques et la formation de la main-d'œuvre de demain.

Les nouveaux matériaux vont soulever des problèmes inédits et donner un regain d'importance à certaines préoccupations de fond. Ainsi, l'émergence de nouveaux risques de cybersécurité n'est pas à exclure puisqu'il est concevable qu'à moyen terme, une source de données sur la conception de matériaux assistée par ordinateur et fondée sur des simulations par ordinateur soit la cible d'un piratage informatique. L'évolution des nouveaux matériaux appelle également une intervention publique efficace dans des domaines au demeurant importants, généralement en lien avec le fonctionnement de l'interface science-industrie. Ainsi, des politiques judicieusement conçues sont nécessaires pour faciliter l'ouverture des données et la science ouverte (notamment afin de partager les simulations de structures de matériaux ou bien les résultats d'expérience en contrepartie de l'accès à des outils de modélisation) [Nature, 2013]). Les progrès des nouveaux matériaux requièrent en outre une collaboration étroite entre l'industrie, les universités, les organismes de financement de la recherche et les laboratoires publics.

L'heure est à l'interdisciplinarité, dans la recherche comme dans l'enseignement. La recherche en matériaux est interdisciplinaire par nature. Outre la science et l'ingénierie des matériaux, concernées de plein droit, la physique, la chimie, le génie chimique, le génie biologique, les mathématiques appliquées, l'informatique et le génie mécanique, entre autres disciplines, apportent également leur contribution. S'agissant de l'enseignement, les étudiants appelés à devenir des experts de la synthèse, du traitement ou de la fabrication de matériaux doivent comprendre les ressorts de la modélisation et acquérir un bon bagage théorique tandis que ceux qui deviendront modélisateurs ou théoriciens doivent être capables d'appréhender les problèmes rencontrés par l'industrie.

Une coordination est nécessaire à l'échelle de l'ensemble de l'infrastructure d'innovation dans les matériaux, que ce soit au niveau national ou international. Les organisations professionnelles déploient d'importants efforts pour mettre en place une infrastructure d'information précoce sur les matériaux et les normes connexes en matière de données (Robinson et McMahan, 2016). Compte tenu de la nécessité de fédérer les éléments des infrastructures cyberphysiques en combinant des investissements et des capacités d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie, la coordination internationale est indispensable, car il serait trop coûteux (et inutile) de reproduire des ressources accessibles par des services web assortis d'une aide aux utilisateurs. Enfin, il faut des politiques avisées en raison de la nécessité de faire évoluer la culture du partage des données et, en particulier, de faciliter une culture de la cybercollaboration, en amont de la phase concurrentielle.

Les nouveaux matériaux et la prochaine révolution de la production : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics (suite)

La réflexion engagée entre les organismes de recherche, les entreprises, les laboratoires publics de recherche, les organismes de normalisation et les organisations professionnelles œuvrant à la mise au point de matériaux nouveaux et améliorés a essentiellement porté, jusqu'ici, sur les formats de données. Il convient à présent de la recentrer sur la manière d'exploiter ces données dans l'aide à la décision sur la découverte et la mise au point des matériaux, et de traiter en parallèle nombre des questions susmentionnées. Il est à cet égard important de pouvoir accéder aux ressources informatiques et infonuagiques à hautes performances, ce que les partenariats public-privé pré-concurrentiels et les politiques publiques peuvent faciliter. Ces questions font l'objet de différents travaux, notamment au sein du groupe d'experts d'ingénierie des matériaux par modélisation intégrée (Integrated Computational Materials Engineering Expert Group, ICMEg) en Europe.

L'ère des tâtonnements dans la mise au point des matériaux touche à sa fin. Une approche du développement fondée sur la simulation fera gagner du temps et de l'argent car lorsque les entreprises chercheront un matériau aux propriétés voulues, il leur suffira d'intégrer celles-ci dès le stade de la conception du matériau, ce qui leur évitera d'avoir à réaliser des analyses à répétition. La simulation permettra d'obtenir de meilleurs produits, comme des structures complexes plus résistantes. En intégrant la modélisation et la science des données dans l'aide à la décision liée au développement de produits, on pourrait aussi réduire le temps écoulé entre la découverte d'un matériau et son utilisation à des fins commerciales. Aux États-Unis, le programme AIM (*Accelerated Insertion of Materials*) de la DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) a démontré la réalité de ces gains de temps. Enfin, les grandes entreprises vont de plus en plus rivaliser dans la mise au point de nouveaux matériaux. En effet, l'application d'un procédé de fabrication breveté à des matériaux également brevetés offre la garantie de se démarquer durablement de la concurrence (The Economist, 2015).

Diffusion des nouvelles technologies de production : que peuvent faire les pouvoirs publics ?

Si la création technologique peut être une grande source de richesses, la plupart des entreprises et des pays – en particulier dans le monde en développement – se cantonneront au rôle d'utilisateurs. Favoriser la diffusion technologique devrait donc être pour eux un objectif prioritaire. Même dans les économies les plus avancées, cette diffusion peut être lente ou partielle. Par exemple, une enquête menée en 2015 auprès de 4 500 entreprises allemandes révèle que seulement 18 % connaissaient alors l'expression « Industrie 4.0 » et que 4 % appliquaient des processus de production numériques et connectés en réseau ou comptaient le faire (ZEW-IKT, 2015).

La diffusion revêt deux aspects. Premièrement, elle consiste à intensifier la création et la croissance des entreprises qui servent de vecteurs des nouvelles technologies. Les travaux de recherche conduits par l'OCDE ces dernières années ont mis en lumière le rôle des nouvelles et des jeunes entreprises dans la création nette d'emplois et d'innovations radicales. Cependant, Criscuolo, Gal et Menon (2014) ont constaté que la proportion de start-ups allait en diminuant dans bien des pays depuis le début des années 2000. Les pouvoirs publics doivent prendre en considération un certain nombre de facteurs qui jouent sur le dynamisme de ces entreprises, comme l'application en temps voulu des procédures de faillite et l'exécution rigoureuse des contrats (Calvino, Criscuolo et Menon [2016]).

Deuxièmement, la diffusion correspond à l'application, par les entreprises existantes, des technologies qui améliorent leur productivité. Un point important à souligner en l'occurrence est que le recours aux technologies clés est généralement moins fréquent chez les petites entreprises que chez les grandes. Par exemple, d'après une enquête menée auprès d'entreprises implantées en Europe, 36 % de celles comptant entre 50 et 249 salariés utilisent des robots industriels, contre 74 % des entreprises de 1 000 salariés ou plus (Fraunhofer, 2015). Ainsi qu'il apparaît dans le chapitre 2, bien que l'infonuagique ait accru la disponibilité et l'accessibilité des ressources informatiques, les petites entreprises sont moins susceptibles d'utiliser ces technologies que les grandes dans pratiquement tous les pays.

La diffusion dépend du contexte national et international

Plusieurs facteurs intervenant aux niveaux national et international influencent le processus de la diffusion : i) les connexions mondiales fondées sur les échanges – qui constituent un vecteur de diffusion technologique et une incitation à adopter les technologies – et l'investissement direct étranger (IDE) ; ii) la mobilité internationale des travailleurs qualifiés ; iii) les relations et flux de savoir existant au sein des économies nationales, sous la forme par exemple d'interactions entre établissements scientifiques et entreprises ; iv) l'existence et l'évolution des normes (le secteur des semi-conducteurs, par exemple, en utilise un millier [Tassey, 2014]) ; vi) le volume des investissements immatériels complémentaires réalisés par les entreprises dans la R-D, les compétences, les capacités managériales et d'autres formes de capital intellectuel (OCDE, 2015c) ; et vii) l'efficacité des voies employées par les entreprises pour se procurer les ressources dont elles ont besoin pour croître. Si les entreprises susceptibles de prendre la tête de la prochaine révolution de la production sont incapables d'attirer les ressources humaines et financières nécessaires à leur croissance, les technologies évolueront et se diffuseront à pas de fourmi.

Comme récemment étudié dans divers travaux de l'OCDE, une mauvaise affectation des ressources peut être due à une concurrence insuffisante sur les marchés de produits, à la rigidité du marché du travail, aux freins à la sortie du marché pour les entreprises, aux obstacles à la croissance de celles qui réussissent, ainsi qu'aux conditions des politiques en vigueur. Ainsi, la réactivité des investissements en capital fixe des entreprises de changer leur stock de brevets a plus que triplé là où le droit relatif à la protection de l'emploi est plus laxiste (comme aux États-Unis) comparé aux pays où il est plus strict (comme au Portugal). De même, les investissements en capital fixe sont pratiquement deux fois plus sensibles aux variations du stock de brevets dans les pays où l'exécution des contrats est la moins coûteuse (comme en Norvège) que dans ceux où elle est la plus onéreuse (par exemple, l'Italie) (Andrews, Criscuolo et Menon, 2014).

Au-delà des conditions-cadre, les institutions et mécanismes de diffusion technologique peuvent être efficaces

Dans le chapitre 7, Philip Shapira et Jan Youtie analysent les fonctions et incidences des institutions et mécanismes de diffusion technologique. Comme ils l'expliquent, la diffusion des technologies repose sur des intermédiaires, ainsi que sur des structures et procédures qui facilitent l'adoption et la mise en œuvre de connaissances, de méthodes et de moyens techniques. Les systèmes d'innovation englobent plusieurs sources de diffusion technologique, comme les universités et les organisations professionnelles. Cependant, certaines institutions, comme les services de vulgarisation scientifique, ont tendance à être reléguées au second plan dans la politique générale d'innovation. Elles sont pourtant

capables d'efficacité pour peu qu'elles soient bien conçues et bénéficient d'incitations et de ressources adaptées.

Les arguments traditionnellement avancés en faveur des institutions et mécanismes de diffusion des technologies reposent sur les carences et les asymétries observées dans la circulation de l'information, entre autres dysfonctionnements du marché. Les entreprises (en particulier les PME) sont fréquemment dépourvues des renseignements, des connaissances et compétences techniques, des formations, des ressources, de la stratégie et de la confiance dont elles auraient besoin pour adopter de nouvelles technologies. Les fournisseurs et les consultants indépendants peuvent se heurter à des coûts de transaction élevés lorsqu'ils cherchent à diffuser une technologie. Enfin, les fonds nécessaires au déploiement à grande échelle ne sont pas toujours débloqués. Les institutions chargées de diffuser les technologies s'emploient à orienter et à accompagner, notamment dans leurs choix d'investissement, les entreprises désireuses de se doter des capacités requises pour adopter de nouvelles technologies. Dans le contexte particulièrement dynamique de la prochaine génération des technologies de production, l'argument de la défaillance du marché pèsera sans doute davantage encore lorsqu'il s'agira de justifier les interventions des institutions. Il faudra aider les utilisateurs potentiels à faire le tri dans une masse pléthorique d'informations et à prendre des décisions sur fond d'évolution rapide des technologies et des besoins en compétences spécialisées.

Des initiatives nouvelles de diffusion font leur apparition, pour certaines au stade expérimental

Des initiatives originales ont été prises, pour certaines à titre expérimental, face à la nécessité de disposer de stratégies nouvelles pour promouvoir les changements d'ordre institutionnel, l'échange de connaissances, le renforcement des capacités et les actions de diffusion technologique dictées par la demande. Les nouvelles technologies de production ont stimulé l'établissement de partenariats qui transcendent les secteurs d'activité et cherchent à résoudre les problèmes liés à la transposition des résultats de la recherche dans la production à grande échelle. Parallèlement aux centres de technologie appliquée établis de longue date, comme les instituts Fraunhofer en Allemagne, les approches fondées sur le partenariat ont le vent en poupe (voir aussi le chapitre 10). Manufacturing USA, par exemple, s'appuie sur des organisations privées à but non lucratif qui forment le cœur d'un réseau d'organisations professionnelles et universitaires pour mettre au point des normes et des prototypes dans de nombreux domaines, tels que l'impression 3D ou la fabrication et la conception numériques (voir aussi le chapitre 11 pour une présentation détaillée de Manufacturing USA).

Dans un mouvement comparable à l'essor de la mise en accès libre des publications et données de recherche, on voit apparaître des « bibliothèques » qui favorisent la mise en commun de briques technologiques. BioBricks, par exemple, est un standard ouvert mis au point par le MIT (Massachusetts Institute of Technology) pour permettre l'utilisation partagée de composants biologiques synthétiques par l'intermédiaire d'un registre (*Registry of Standard Biological Parts*). En biotechnologie, les ressources à code source libre coexistent avec les solutions traditionnelles, couvertes par un droit de propriété.

Les politiques de diffusion technologique traitent du financement des activités situées à mi-chemin entre recherche et commercialisation, ainsi que des lacunes à combler pour commercialiser les résultats de la recherche. Aux États-Unis, par exemple, la Fondation nationale pour la science (National Science Foundation, NSF) a mis en place le programme

Innovation Corps (I-Corps) en 2011 afin d'accélérer la commercialisation des résultats de la recherche à forte composante scientifique. Des équipes de chercheurs et des entrepreneurs en herbe reçoivent des bourses pour participer à une formation dont l'objet est d'encourager l'interaction continue avec les clients et les partenaires. Les participants enrichissent ainsi leurs connaissances et sont plus à même de fonder une entreprise autour des travaux de recherche financés par la NSF (Weilerstein, 2014).

La passation de marchés publics axés sur l'innovation a également pris de l'importance dans de nombreux pays et implique souvent des PME. Des incitations sont utilisées, comme le crédit d'impôt pour la R-D, ou la voie réglementaire et normative pour encourager les activités de R-D précommerciale, parmi lesquelles se rangent les études de faisabilité et le prototypage. L'efficacité des institutions chargées de diffuser les nouvelles technologies dépend en partie de la capacité des entreprises à les assimiler. Cela donne une idée de l'ampleur des efforts à fournir pour soutenir la demande au moyen de dispositifs comme les chèques-innovation, qui incitent les bénéficiaires à se rapprocher de ceux qui peuvent leur apporter des connaissances ou des technologies nouvelles. Plusieurs pays (dont le Royaume-Uni, l'Irlande et les Pays-Bas) encouragent le recours à ce dispositif.

Diffusion des nouvelles technologies de production : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics

Il est nécessaire que la diffusion des technologies et des institutions correspondantes fasse partie des efforts déployés par les pouvoirs publics pour mettre en œuvre la prochaine révolution de la production. Bien qu'ils en soient généralement conscients, les décideurs ont tendance à oublier l'importance primordiale de diffuser les technologies à haut niveau dès qu'il s'agit d'y réfléchir et d'y consacrer des ressources.

Il est nécessaire que les institutions chargées de diffuser les technologies poursuivent des buts concrets assortis d'échéances réalistes. La mise en œuvre de nouveaux modes d'assimilation et de diffusion technologique demande du temps, de la patience et des tâtonnements. Or les pouvoirs publics veulent souvent des résultats rapidement et sans prise de risques. Les indicateurs d'évaluation devraient mettre l'accent sur le renforcement des capacités à long terme plutôt que sur des résultats limités à court terme.

Il peut y avoir un décalage entre les objectifs des institutions chargées de diffuser les technologies et les réalités auxquelles elles sont confrontées sur le terrain. Alors que certaines technologies de production sont mises en avant pour les solutions qu'elles apportent à des problèmes de société, nombre d'institutions publiques chargées de la diffusion des technologies continuent de s'appuyer sur des modèles de financement et d'évaluation qui privilégient la génération de revenus. Il n'est pas rare, de surcroît, que l'accent soit mis sur la propagation des toutes dernières technologies quand beaucoup d'entreprises et d'utilisateurs n'exploitent déjà pas tout le potentiel de celles dont ils disposent et ne sont pas en mesure d'assimiler des technologies sophistiquées.

Il est nécessaire que l'élaboration des politiques soit mieux étayée et ouverte à l'expérimentation. Il est pour cela vital d'acquérir une compréhension plus fine des modes d'organisation et des pratiques efficaces. Compte tenu des préoccupations soulevées par la question de la responsabilité des pouvoirs publics et du climat d'austérité qui règne dans un grand nombre d'économies, les institutions actuellement chargées de la diffusion technologique pourraient se montrer réticents au changement, ce qui aurait pour effet de ralentir l'apparition de la génération suivante.

Diffusion des nouvelles technologies de production : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics (suite)

Les responsables des politiques devraient en outre s'abstenir de certaines pratiques. Les efforts déployés pour diffuser les nouvelles technologies visent souvent les utilisateurs précoces prévisibles, à savoir les multinationales, les start-ups de haute technologie et les quelques entreprises spécialisées dans la mise au point de technologies. Outre ces primo-adoptants par définition, l'action des pouvoirs publics devrait cibler également les PME existantes, qui sont beaucoup plus nombreuses. De plus, les mesures prises pour soutenir les institutions chargées de diffuser les technologies ne devraient pas être présentées comme ayant pour objectif de rétablir les emplois supprimés dans les activités manufacturières. Il faudra du temps pour renforcer la capacité des communautés touchées à absorber les nouvelles technologies de production (cinq à dix ans, voire davantage). Il est donc nécessaire que les institutions chargées de diffuser les technologies disposent des pouvoirs et ressources qui leur permettront de se placer dans une perspective de long terme.

Adhésion du public et nouvelles technologies

Dans le chapitre 8, David Winickoff aborde la question de l'adhésion du public aux nouvelles technologies et de l'influence que les pouvoirs publics peuvent exercer sur les attitudes à leur égard. Il est déjà arrivé, dans le passé, que les craintes populaires bloquent la mise au point et la diffusion d'une nouvelle technologie, et ce alors même que sa faisabilité technique et économique avait été démontrée, que des arguments solides plaident en faveur de son adoption et que des investissements importants avaient déjà été réalisés. Par exemple, nombre de pays ont investi dans la construction de réacteurs nucléaires dans les années 60 et 70, mais, dans plusieurs cas, la mobilisation politique a eu raison de ces programmes malgré l'avis des experts qui en garantissaient la sûreté (Winner, 1986).

La pression de l'opinion publique peut peser sur le cadre réglementaire qui conditionne l'adoption des technologies. Ainsi, dans le domaine des biotechnologies, la controverse autour des organismes génétiquement modifiés (OGM) a fortement influencé la réglementation applicable aux nouvelles semences et l'autorisation de nouvelles cultures en Europe. (Watson et Preedy, 2016). Les inquiétudes de la population peuvent également avoir un effet bénéfique sur la sécurité et l'acceptabilité. Par exemple, les études scientifiques et l'action des défenseurs de l'environnement menées dans les années 60 et 70 ont abouti à un encadrement plus strict des pesticides et autres produits chimiques (Davis, 2014). De même, la réglementation peut faciliter l'adoption d'une technologie en imposant les conditions de son utilisation : dans les années 60, la mobilisation en faveur de la sécurité automobile a entraîné la promulgation de normes plus exigeantes et déterminé l'évolution de tout le secteur (Packer, 2008).

Les biotechnologies sont depuis longtemps l'objet de controverses publiques en raison des risques qu'elles font peser sur la société. Que ce soit dans les pays développés ou en développement, les semences génétiquement modifiées (GM) suscitent des inquiétudes quant aux risques encourus du point de vue de la santé et de la sécurité, quant à la possibilité de maîtriser et de neutraliser leur diffusion et quant aux effets de la propriété intellectuelle sur le phénomène de concentration dans l'industrie agroalimentaire (Josanoff, 2005). Les pays ont répondu à ces craintes de diverses manières. Des réglementations très divergentes, dictées selon l'attitude du public à l'égard des biotechnologies, ont conduit à des perturbations des échanges internationaux, voire des différends, dont l'Organisation mondiale du

commerce (OMC) a été saisie (Pollack et Shaffer, 2009). Les pouvoirs publics devront anticiper les préoccupations que les toutes dernières avancées des biotechnologies, en particulier l'édition du génome, ne manqueront pas de faire naître au sein du grand public.

D'autres technologies étudiées dans le présent rapport préoccupent l'opinion à différents titres. Parfois, c'est à cause des risques encourus, comme dans le cas des incidences potentielles des nanotechnologies sur la santé humaine (voir chapitre 4). Une autre source d'inquiétude réside dans les programmes publics de collecte et d'exploitation de données massives. C'est le cas au Royaume-Uni, où l'absence de réponse aux interrogations concernant le respect de la vie privée et la confidentialité des données a déclenché une vaste polémique impliquant des médecins cliniciens, des groupes de sensibilisation aux maladies et le grand public. L'image des autorités nationales de la santé en est sortie ternie. La prochaine révolution de la production pourrait bien soulever des questions absolument inédites sur le plan sociétal. Pour ne citer qu'un exemple : les machines devenant de plus en plus autonomes, qui sera tenu pour responsable de leurs actes ? Comment s'exercera le contrôle ?

Adhésion du public et nouvelles technologies : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics

Nourrir des attentes réalistes vis-à-vis des technologies peut aider à entretenir la confiance. En matière de technologies émergentes, il faut s'abstenir de tout battage médiatique. Dans le cas de la recherche sur les cellules souches, par exemple, les scientifiques, les bailleurs de fonds et les médias avaient promis monts et merveilles (Kamenova et Caulfield, 2015).

Les avis scientifiques doivent être crédibles. La résistance du public face aux nouvelles technologies et la perte de confiance à l'égard des autorités scientifiques et réglementaires sont étroitement corrélées. La fin des années 1990 a vu éclater au Royaume-Uni une polémique née de la non-prise en considération de l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB), ou « maladie de la vache folle » dans les stratégies d'évaluation et de gestion des risques des organismes publics de réglementation. Cet épisode a entamé le crédit accordé à ces autorités lorsqu'elles ont dû se prononcer peu de temps après au sujet des risques présentés par les OGM (Pidgeon, Kasperson et Slovic, 2003). Les pays doivent renforcer les systèmes d'experts en promouvant les interactions avec le public, en communiquant clairement sur les sources d'incertitudes et en rendant plus transparents le fonctionnement de ces systèmes ainsi que les procédures de désignation de leurs membres (Jasanoff 2003).

L'évaluation sociétale de la technologie peut éclairer la politique scientifique et technologique. Dans de nombreux pays de l'OCDE, la politique d'innovation est aujourd'hui guidée par une forme ou une autre d'évaluation sociétale de la technologie, réalisée par divers acteurs parmi lesquels on retrouve les comités nationaux d'éthique ainsi que d'autres organismes publics chargés de considérer, dans une perspective large, les risques sociaux, sanitaires et sécuritaires. Ces évaluations reposent notamment sur une évaluation classique des risques mais peuvent également embrasser les conséquences sociales à plus long terme de technologies qui ne présentent pas de risques manifestes dans l'immédiat pour la santé et la sécurité.

Il conviendrait de tenir compte des considérations éthiques et sociales dans les grands programmes de recherche. Depuis le projet de séquençage du génome humain (*Human Genome Project*, HGP), les mécènes de la science de nombreux pays cherchent à y faire entrer des considérations éthiques, juridiques et sociales. Les responsables de la planification de

Adhésion du public et nouvelles technologies : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics (suite)

ce projet, conscients que la cartographie et le séquençage du génome humain allaient avoir des conséquences majeures pour les individus, les familles et les sociétés, ont décidé de consacrer plus de 3 % de leur budget à l'étude de ses répercussions éthiques, juridiques et sociales. Depuis, nombreux sont les pays qui s'efforcent d'associer les sciences sociales et humaines aux flux de financement. Les stratégies de prochaine génération intègrent les considérations sociales non pas en bout de chaîne mais au stade de la mise au point des technologies. C'est le cas du programme Horizon 2020 de l'Union européenne et de la NNI (*National Nanotechnology Initiative*), initiative nationale en faveur des nanotechnologies, aux États-Unis.

Le débat public pour la compréhension mutuelle entre la communauté scientifique et l'opinion est important, il devrait éclairer la politique d'innovation. Il peut prendre différentes formes. C'est au Danemark, notamment, que les organisations civiques et réunions citoyennes ont vu le jour. Le débat peut également intervenir dans le cadre de consultations nationales et d'enquêtes publiques, qui devraient comporter une procédure ad hoc pour engager le dialogue avec le public, permettre à celui-ci d'exprimer ses inquiétudes et les faire remonter afin qu'elles puissent être dûment prises en considération.

Influence de la prospective sur la prochaine révolution de la production

Ainsi qu'Attila Havas et Matthias Weber le décrivent dans le chapitre 9, la plupart des pays cherchent à mieux anticiper l'avenir dans les domaines scientifique et technologique. L'un des buts énoncés dans l'*America Competes Act*, par exemple, est de reconnaître les domaines émergents et novateurs. À l'évidence, une meilleure anticipation des tendances facilite l'élaboration de politiques ainsi que l'affectation de fonds et d'autres ressources à destination de la recherche.

La prospective est une forme d'analyse particulière qui consiste à scruter l'avenir et à en modéliser les contours. Tout processus prospectif vise à isoler et à examiner, de manière systématique et transparente les facteurs d'ordre social, technologique, économique, environnemental et stratégique qui ont une incidence sur l'avenir. La prospective a une orientation pratique, elle est participative (associant souvent des chercheurs, des acteurs du monde de l'entreprise, des responsables politiques et des associations de la société civile) et elle prend en compte plusieurs scénarios d'avenir. Sa finalité première n'est pas de faire des prédictions. À travers l'élaboration de feuilles de routes et l'étude des projections, la prospective aide à se préparer à plusieurs futurs possibles. En outre, ainsi que le montre le chapitre 9, le processus prospectif peut grandement bénéficier aux institutions et à la prise de décision.

La prospective peut – et devrait – prendre diverses formes sur le plan thématique et méthodologique ou encore au regard de l'horizon temporel considéré. Plusieurs exercices de grande envergure ont récemment été consacrés aux activités de transformation et de production, notamment par la NAE (2015) et Foresight (2013).

Les pouvoirs publics sont vite accaparés par les impératifs du court terme. La prospective permet de porter le regard vers un horizon plus lointain et d'examiner le champ des possibles. En période d'incertitudes, penser l'avenir comme un faisceau de possibilités est une condition préalable indispensable pour concevoir des politiques qui permettront de faire face à l'imprévu.

De surcroît, la complexité du monde fait que nombre de phénomènes ne peuvent être appréhendés isolément et doivent au contraire être examinés sous différents angles. L'histoire de la prévision technologique regorge d'erreurs monumentales, même de la part de spécialistes pourtant familiers avec les technologies concernées⁶. Ces erreurs mettent en relief l'importance de s'appuyer sur divers points de vue. Lorsqu'elle est fondée sur des méthodes participatives, la prospective peut intégrer le degré d'hétérogénéité requis.

La démarche prospective aide aussi à mobiliser et à rapprocher des parties prenantes. En général, les activités de prospective visent non seulement à explorer les futurs possibles, mais aussi à faire émerger une communauté de vues autour d'un avenir souhaitable. Ces scénarios, et les feuilles de route qui les accompagnent, peuvent servir à réunir les principaux intéressés autour de priorités communes. Associer des acteurs issus de différents domaines de l'action publique peut aussi favoriser la coordination horizontale (entre domaines d'intervention ou entre le parlement et l'exécutif) et verticale (entre les ministères et les organismes d'exécution).

Prospective : principales considérations intéressant l'action des pouvoirs publics

Les pouvoirs publics peuvent créer les conditions propices pour rendre la prospective efficace. La prospective doit faire partie intégrante des processus de prise de décision. Les processus prospectifs devraient intervenir suffisamment près de la prise de décision pour exercer une influence, tout en conservant une distance qui garantisse leur indépendance intellectuelle. La prospective devrait être calée sur les cycles de l'action publique de façon à disposer des informations nécessaires en temps utile. Il faudrait également l'institutionnaliser d'une quelconque manière – sous la forme de programmes réguliers et/ou par la mise en place d'organisations spécialisées – pour créer une culture de la prospective. La réalisation ponctuelle de campagnes prospectives n'aura probablement guère d'influence sur la formulation des politiques. Il importe enfin de fournir un effort soutenu pour développer les compétences nécessaires à l'exercice de la prospective.

Les processus de prospective peuvent aider à élargir et à repenser le cadrage des grands enjeux de l'action publique. Établissant des passerelles, la prospective peut favoriser l'innovation d'organisation. L'architecture des administrations répond généralement à une stricte séparation des domaines de compétence. Leur structure est parfois décalée par rapport à l'évolution rapide des disciplines scientifiques et technologiques. Dans ces conditions, il n'est pas toujours facile de savoir quelles sont les autorités compétentes quand des travaux de recherche sont de nature transversale ou suivent de nouvelles orientations (par exemple, lorsque l'on passe de la recherche à visée scientifique et technologique à la recherche axée sur des problèmes de société). Il arrive aussi que les administrations fonctionnent en vase clos, les mêmes intervenants étant encore et toujours associés à la prise de décision. La prospective peut aider à en atténuer les effets.

De l'importance des politiques avisées dans les domaines de la science et de la R-D

Toutes les technologies examinées dans le présent rapport sont les fruits de la science. La microélectronique, la biologie de synthèse, les nouveaux matériaux et les nanotechnologies, pour ne prendre que ces exemples, sont apparus grâce à l'avancée des connaissances et

des instruments scientifiques. La recherche fondamentale financée par des fonds publics a généralement été déterminante. Durant plusieurs décennies, par exemple, la recherche en IA a bénéficié des crédits publics, y compris pendant les périodes stériles, au point qu'aujourd'hui, l'IA attire massivement les investisseurs privés et trouve des utilisations capitales dans le domaine de la production.

Les grandes découvertes sont pour beaucoup issues de la recherche fondamentale et correspondent à des applications initialement non prévues. C'est le cas des ciseaux génétiques CRISPR-Cas9 (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*, « courtes répétitions palindromiques groupées et régulièrement espacées »), auxquels la revue *Science* a décerné le titre « Breakthrough 2015 ». Les origines de cette technologie sont à trouver dans une découverte faite accidentellement au cours de travaux de recherche sur un gène de la bactérie *Escherichia coli* (*E.coli*), à la fin des années 1980. L'outil CRISPR-Cas9 permet de modifier une séquence d'ADN en des endroits précis d'un chromosome, rendant ainsi plus facile et moins onéreux de concevoir et de constituer des organismes présentant les caractéristiques souhaitées. Son utilisation s'est rapidement propagée dans tous les secteurs et les disciplines. Tout aussi fortuitement, l'avancée de la compréhension des principes de l'auto-construction biologique voit une application imprévue dans l'auto-assemblage fondé sur l'IA (des systèmes et matériaux servant à l'auto-assemblage de dispositifs microscopiques ont été mis au point à l'aide de virus artificiels chargés de guider le processus⁷).

Les pays et les entreprises ne peuvent pas tous être de grands producteurs de technologies. Cela dit, les pays mieux dotés en capacités de recherche – dans des domaines comme l'informatique, la biologie, la physique et la chimie – pourraient bénéficier d'un avantage d'antériorité dans un certain nombre de secteurs. Il ressort du chapitre 2 que l'invention de technologies en lien avec l'innovation fondée sur les données est l'apanage d'une poignée de pays, ce que l'on retrouve dans la plupart des domaines étudiés dans ce rapport.

Les technologies de production émergentes sont dans bien des cas trop complexes pour les capacités de recherche existantes, même celles des plus grandes entreprises (les chapitres 4 et 6 contiennent des exemples concernant les nanotechnologies et les nouveaux matériaux respectivement). Tasse (2014) le constate également dans les cas de la nanoélectronique et d'autres technologies de production émergentes. La complexité de nombreux défis de la recherche transparaît dans l'éventail des partenariats de recherche public-privé, dont il est notamment question dans les chapitres 10 et 11.

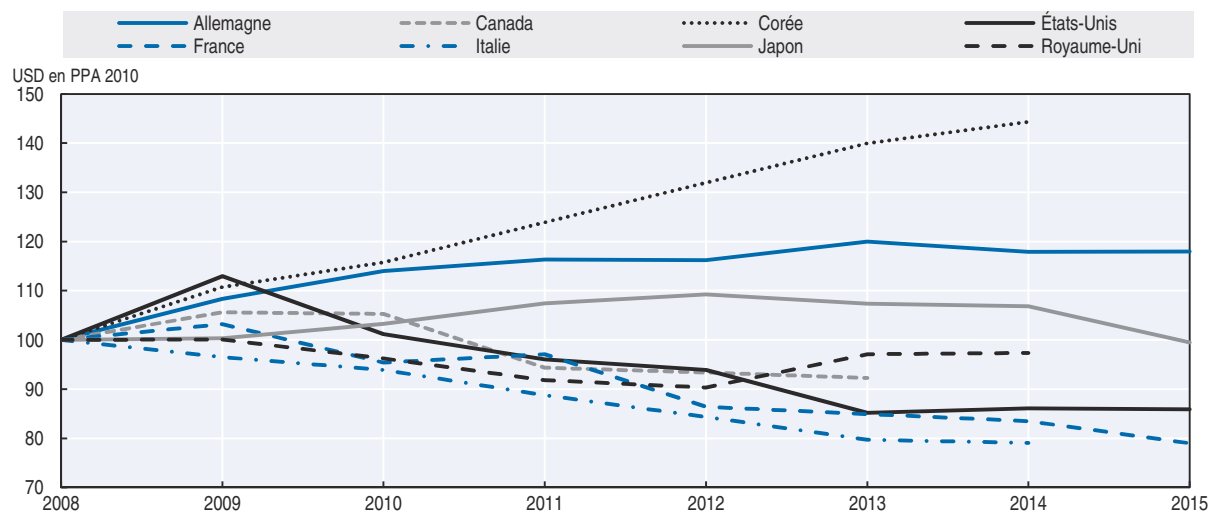
L'examen des nouvelles technologies de production réalisé pour les besoins du présent rapport met en évidence un grand nombre d'objectifs possibles des activités de R-D et de commercialisation qui bénéficient d'un soutien public. Ces objectifs touchent différents domaines : l'informatique quantique (chapitre 2), l'utilisation accrue de l'analytique de données et des technologies numériques en ingénierie métabolique (chapitre 3) ou encore la mise au point de matières premières écologiques pour l'impression 3D (chapitre 5). Au regard du spectre des disciplines scientifiques et technologiques, des centaines d'autres thèmes sont envisageables⁸.

Le dynamisme de la science, des systèmes de recherche et leur influence sur la production dépendent souvent de l'action des pouvoirs publics

Bien souvent, les choix des pouvoirs publics déterminent le dynamisme de la science et de la recherche ainsi que leur influence sur la production. C'est le cas notamment de l'ampleur du soutien public à la recherche, qui accuse un recul depuis quelques années dans certains pays (graphique 1.1).

Graphique 1.1. **Crédits budgétaires publics de R-D (sélection de pays)**

Indice : 2008 =100



Source : Calculs effectués à partir de l'ensemble de données « Crédits budgétaires publics de R-D » (CBPRD) de la base de données de l'OCDE sur les statistiques de recherche et développement. Données extraites de l'IPP.Stat le 14 mars 2017.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933568528>

Outre l'ampleur du soutien public destiné à la recherche fondamentale et appliquée, les décideurs doivent être attentifs : aux procédures d'affectation des fonds à la recherche publique ; à une diversité de caractéristiques institutionnelles et d'incitations propices à la science ouverte ; aux contextes de nature à inciter les entreprises, les chercheurs du secteur public et les établissements publics de recherche à commercialiser les résultats de la recherche, tout en préservant l'intérêt général. Ils doivent aussi veiller à nouer des partenariats public-privé bien pensés ; à mettre en place des régimes d'immigration efficaces, transparents et simples pour le recrutement de travailleurs hautement qualifiés ; à faciliter l'établissement de liens et de réseaux transfrontaliers entre les chercheurs ; et à constituer une panoplie de mesures de soutien, judicieuse et pragmatique, qui réunit des instruments fondés aussi bien sur l'offre que sur la demande.

Les défis fondamentaux de la recherche sont bien souvent pluridisciplinaires et systémiques

Dans le chapitre 10, Eoin O'Sullivan et Carlos López-Gómez examinent les nouvelles priorités et politiques pour la R-D industrielle de différents pays. Ils montrent qu'en soutenant la R-D industrielle, les décideurs fixent l'ordre des priorités de la recherche technologique des domaines concernés et mettent en place des institutions, programmes et initiatives pour veiller au développement, à la démonstration et au déploiement des résultats de la recherche dans les systèmes industriels. Les auteurs constatent que la convergence (des disciplines de recherche, des technologies et des systèmes), le changement d'échelle (des technologies émergentes) et la capture de la valeur économique nationale (de l'innovation dans l'industrie) sont des thèmes qui retiennent de plus en plus l'attention. En conséquence, on voit apparaître des programmes de recherche liés au secteur manufacturier, tandis que les établissements de recherche et d'innovation élargissent le périmètre de leur mission, au-delà de la recherche fondamentale, resserrent les liens avec les principaux acteurs des systèmes d'innovation, rendent plus explicite l'obligation de collaboration interdisciplinaire et interinstitutionnelle et se dotent de nouveaux types

d'infrastructure d'innovation (outils, technologies génériques et installations) à l'appui de la convergence et du changement d'échelle.

O'Sullivan et López-Gómez montrent que les priorités des gouvernements dans les domaines de l'industrie et dans les organisations institutionnelles reflètent les différences nationales présentes dans le dynamisme de la recherche selon les domaines industriels. En Allemagne, par exemple, l'accent est mis sur l'intégration des technologies numériques dans l'équipement de production industrielle et les « usines intelligentes », et plus particulièrement sur les systèmes embarqués, les systèmes cyberphysiques et l'IdO. Au Japon, l'administration centrale a récemment insisté sur l'importance d'intégrer les applications de la robotique avancée et de l'IA dans l'ensemble des chaînes d'approvisionnement spécialisées.

Comme exposé dans le chapitre 10, les institutions, programmes et initiatives de la R-D industrielle publique ont désormais en commun d'assumer des fonctions de soutien à l'innovation qui dépassent le simple cadre de la R-D fondamentale (par exemple, démonstration de prototypes, formation, mise en place d'une chaîne logistique) ainsi que d'accorder une attention accrue aux « grands défis » (concernant notamment la fabrication durable, la nanofabrication et le stockage d'énergie).

O'Sullivan et López-Gómez observent qu'il est de plus en plus difficile de déterminer quelles doivent être les priorités de ces initiatives et programmes. Cela est dû à la convergence technologique et à la complexité croissante des modes de production modernes. Lorsqu'ils évaluent les incidences des investissements de R-D, et définissent ainsi les priorités de l'action, les décideurs doivent tenir compte du fait que les contours des domaines de la recherche industrielle sont de plus en plus flous. Si rien n'est fait pour soutenir les efforts pluridisciplinaires et ceux liés aux défis de la recherche, les programmes de R-D technologique risquent de devenir cloisonnés. Nombre de ces défis supposeront de s'appuyer sur des disciplines de la recherche liée au secteur manufacturier qui sont traditionnellement distinctes (matériaux avancés, outils de production, TIC ou gestion opérationnelle par exemple). Or, bien souvent, les établissements et programmes de recherche financés par des fonds publics se sont vu confier une mission circonscrite à la recherche et ils ne sont pas libres d'entreprendre des activités complémentaires d'innovation ou de s'associer à d'autres acteurs de l'innovation. Il leur est donc parfois impossible de réunir la bonne combinaison de capacités, de partenaires et d'installations dont ils auraient besoin pour relever les défis du changement d'échelle et de la convergence.

Les auteurs du chapitre 10 soulignent que les indicateurs traditionnels de performance n'incitent pas toujours comme il conviendrait à resserrer les liens institutionnels, à consolider l'interdisciplinarité ainsi qu'à encourager l'application et l'intensification de la recherche. Pour mieux évaluer les institutions et les programmes, il y aurait peut-être lieu de se doter de nouveaux indicateurs, en complément de ceux déjà utilisés (comme le nombre de publications et de brevets) et en particulier dans les domaines suivants : démonstration réussie par lignes pilotes et bancs d'essai, développement des compétences des techniciens et ingénieurs, participation à des consortiums, présence des PME dans de nouvelles chaînes d'approvisionnement, et contribution à l'attraction de l'IDE. Les responsables des politiques devraient déterminer si les indicateurs de performance tiennent correctement compte du caractère systémique de la prochaine révolution de la production.

Bien souvent, pour que les innovations passent du laboratoire à l'usine, il importe d'investir dans des centres de recherche appliquée et des sites pilotes de production. Il est

également crucial de tisser des liens et de nouer des partenariats entre les différents acteurs de la R-D industrielle. Comme précédemment noté, cela donne une idée de l'ampleur et de la complexité des défis à relever dans le domaine de la production avancée. La réalisation de ces tâches nécessite des capacités et infrastructures éparpillées entre de nombreux acteurs de l'innovation. Par exemple, certaines peuvent nécessiter de faire appel aux compétences techniques et aux connaissances des ingénieurs de fabrication et chercheurs industriels, mais aussi des concepteurs, des fournisseurs, des équipementiers, des techniciens d'atelier et des utilisateurs.

Par ailleurs, l'infrastructure de R-D industrielle doit judicieusement combiner outils et installations pour gérer les défis de la convergence et du changement d'échelle, ainsi que pour tirer profit des potentialités qui en découlent. Métrologie avancée, technologies de mesure en temps réel, technologies de caractérisation, d'analyse et d'essai, bases de données partagées, mais aussi outils de modélisation et de simulation n'en sont que quelques exemples parmi d'autres. À cela s'ajoutent les installations de démonstration – tels que les bancs d'essai, les lignes pilotes et les démonstrateurs d'usine, qui fournissent un environnement de recherche propice, car pourvu de la panoplie idoine d'outils et de technologies génériques – et les techniciens indispensables à leur bon fonctionnement.

Essor des instituts d'innovation industrielle avancée aux États-Unis

Dans les années 2000, l'emploi manufacturier a fondu d'un tiers aux États-Unis, 64 000 usines ont fermées, les dépenses d'équipement et de production ont reculé et la productivité a décliné. Des études donnent à penser que ce déclin des capacités productives a porté atteinte au potentiel d'innovation du pays, pourtant longtemps considéré comme son premier atout économique. Dans le chapitre 11, William Bonvillian examine les origines, l'évolution et les perspectives d'avenir de ce qui représente la principale riposte des pouvoirs publics : le réseau national des instituts d'innovation industrielle, National Network of Manufacturing Institutes (rebaptisé Manufacturing USA en 2016).

Les instituts d'innovation industrielle réunis au sein de Manufacturing USA ont pour objectif de favoriser la production manufacturière avancée en tissant des liens de collaboration entre les entreprises (grandes et petites), les universités et les administrations, afin de mettre au point des technologies et processus de production novateurs et d'assurer la formation de la main-d'œuvre. L'éventail des technologies considérées est nettement plus étendu que dans les autres initiatives nationales en faveur de la fabrication avancée (encadré 1.4). L'administration fédérale a alloué aux différents instituts entre 70 millions et 120 millions USD pour cinq ans. Chaque consortium d'entreprises, universités et agences gouvernementales correspondant est tenu d'accorder un montant au moins équivalent.

Quelques-uns seulement sont en activité depuis suffisamment longtemps pour que l'on puisse dresser le bilan de leur action au regard de l'énoncé de leur mission. Des enseignements et des défis sont déjà visibles. Certains de ces enseignements sont spécifiques aux États-Unis, par exemple ceux qui concernent l'équilibre du partage des compétences entre les autorités fédérales et les États. D'autres viennent étayer des conclusions formulées ailleurs dans ce rapport : les instituts pourraient gagner leur indépendance financière en cinq ans (voir aussi le chapitre 7 sur le danger de la vision à court terme des mesures engagées pour dynamiser l'innovation industrielle) ; les modèles de gouvernance devraient garantir l'établissement de liens de collaboration pérennes entre un large éventail d'entreprises et de chercheurs, non seulement pour les besoins de la recherche, mais aussi pour les essais, les démonstrations, le retour d'information et la mise

au point des produits ; il faudrait édifier un réseau de soutien global pour garantir que les instituts communiquent et travaillent sur les problèmes communs (les enseignements tirés sont légion s'agissant de constituer des conseils de direction et des structures juridiques, de gérer la propriété intellectuelle, d'établir des niveaux de participation, d'organiser des campagnes régionales d'information et d'éducation, etc.) ; malgré le rôle central du développement technologique, les instituts doivent mener à bien d'autres tâches complémentaires pour faire en sorte que les niveaux de maturité technologique requis (TRL), c'est-à-dire 5-7, soient atteints, en amont du « pipeline de l'innovation », afin que les technologies qui évoluent soient bien mises en application, en particulier par les petites et moyennes entreprises ; les capacités de formation de la main-d'œuvre et des ingénieurs doivent être renforcées, notamment du fait que les responsables des contrats et programmes au sein des instituts ont généralement un profil technique et ne sont pas des experts de la formation.

Encadré 1.4. **Champ d'action technologique de Manufacturing USA**

Début 2017, Manufacturing USA comptait 14 instituts : huit parrainés par le Département de la Défense (DoD), cinq par le Département de l'Énergie (DOE) et un par l'Institut national des normes et de la technologie (NIST). Si l'initiative allemande en faveur de l'industrie 4.0 (*Plattform Industrie 4.0*), met l'accent sur l'IdO, le rayon d'action des instituts américains est beaucoup plus vaste et laisse entrevoir l'ampleur potentielle des répercussions de la révolution de la production. Ces instituts sont actuellement les suivants : l'Institut national pour l'innovation dans la fabrication additive (National Additive Manufacturing Innovation Institute [NAMII]), l'Institut pour l'innovation dans la fabrication de composites à haute performance (Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation [IACMI]), l'Institut pour l'innovation dans la conception et la fabrication numériques (Digital Manufacturing and Design Innovation Institute [DMDII]), l'Institut des innovations de demain dans les métaux légers (Lightweight Innovations for Tomorrow Institute [LIFT]), Power America, qui traite de l'électronique de puissance de la prochaine génération, l'Institut américain pour la fabrication de systèmes photoniques (American Institute for Manufacturing [AIM] Photonics), NextFlex, spécialisé dans l'électronique hybride flexible, l'AFFOA (Advanced Functional Fabrics of America), spécialisé dans les tissus fonctionnels à haute performance, l'Institut pour l'innovation dans la fabrication intelligente (Smart Manufacturing Innovation Institute), l'Institut pour des progrès rapides dans le déploiement de l'intensification des procédés (Rapid Advancement in Process Intensification Deployment Institute [RAPID]), l'ARMI (Advanced Regenerative Manufacturing Institute), spécialisé dans la biofabrication, l'Institut pour la réduction de l'énergie grise et la diminution des émissions dans la fabrication de matériaux (Institute for Reducing Embodied Energy and Decreasing Emissions [REMADE]) et l'Institut de robotique avancée (Advanced Robotics Manufacturing Institute).

L'évolution technologique remet également en question le système de propriété intellectuelle

L'avenir des technologies de production émergentes pourrait dépendre de la manière dont les systèmes de propriété intellectuelle et de brevets s'adapteront. L'un des défis auxquels le système de propriété intellectuelle est confronté tient à la possibilité de numériser des objets physiques. Les pouvoirs publics doivent veiller à la validité des régimes de propriété intellectuelle dans un contexte de mutation technologique (encadré 1.5).

Encadré 1.5. Mutation technologique et propriété intellectuelle à brève échéance

L'homme est doué d'une faculté d'invention supérieure aux machines. Certes, des logiciels sont déjà capables, ou le seront bientôt, de produire des inventions brevetables. C'est surtout le cas en chimie, pharmaceutique et biotechnologie, disciplines dans lesquelles inventer consiste souvent à combiner des molécules existantes pour former de nouveaux composés ou à leur découvrir de nouvelles propriétés. Par exemple, l'outil d'apprentissage automatique KnIT, mis au point par IBM, a été utilisé avec succès pour reconnaître des kinases présentant des propriétés particulières parmi un ensemble de kinases connues. Ces propriétés ont ensuite fait l'objet d'une expérimentation. Les propriétés particulières de ces molécules ont donc été mises en évidence par un logiciel, et des brevets ont été déposés sur ces découvertes.

L'IA finira pourtant par l'emporter. La question sera peut-être alors de savoir s'il est possible d'inventer sans recourir à la créativité, pour peu que l'on possède le logiciel approprié. Or les inventions obtenues de cette manière ne sauraient être considérées comme brevetables puisqu'elles n'impliquent pas d'activité dite inventive (caractère distinctif minimal requis pour qu'une demande de brevet soit accordée).

L'impression 3D va accélérer la numérisation des objets physiques. La numérisation de la musique, des images et des textes, apparue dans la deuxième moitié des années 1990, a transformé les secteurs concernés, phénomène dans lequel les droits d'auteur occupent une place centrale. L'industrie de la musique, en particulier, a vu chuter les frais de reproduction, de création, d'accès et de diffusion. L'internet ayant supplanté les rares places de marché qui existaient dans les années 2000, la baisse des coûts de reproduction (malgré les dispositions prises pour mettre fin au piratage) a affaibli le régime de protection des droits d'auteur et l'achat de musique en ligne s'est répandu. Les maisons de disques et autres intermédiaires ont vu leurs recettes fondre et les artistes ont cherché des moyens de compléter leurs revenus (grâce à la vente de tickets de concert et de T-shirts). Dans le même temps, on a assisté à une hausse du volume produit et à un afflux de créations et d'auteurs. Pourrait-il en aller de même dans le cas des objets physiques ?

Des scanners permettent de numériser un grand nombre d'objets et, par conséquent, de les distribuer en ligne, voire de modifier le code source (sous réserve qu'il soit en accès libre). Il est donc possible de fabriquer à domicile des biens qui ne sont pas produits en série, généralement en en téléchargeant les dessins et modèles mis en ligne par leurs auteurs à des fins de partage ou de commercialisation. Dans certaines branches d'activité, l'impression 3D pourrait avoir des retombées similaires à celles observées dans le secteur de la musique, en mettant l'innovation à la portée de tous. Des sites internet proposent déjà des objectifs numériques, souvent avec l'intégralité de leurs programmes sources (pour permettre de les imprimer, mais aussi de les modifier). La possibilité de reproduire et de modifier des objets qui sont protégés intégralement ou en partie (à travers certains de leurs éléments constitutifs) par la propriété intellectuelle peut soulever de nouvelles difficultés.

L'impression tridimensionnelle pourrait créer des complications sur le plan de la recevabilité des brevets. Par exemple, un tissu humain obtenu par impression 3D, dans la mesure où il présente un avantage par rapport aux tissus humains normaux, pourrait sans doute faire l'objet d'un brevet, ce qui est néanmoins impossible si le tissu en question est obtenu de manière naturelle¹. L'impression 3D peut également remettre en question le système des marques commerciales et des droits d'auteur (par exemple, dans le cas des bijoux et sculptures). Les manquements aux règles en vigueur seraient probablement très difficiles à établir puisqu'ils interviendraient généralement au domicile de leurs auteurs. Les pouvoirs publics auront donc la lourde tâche de trouver un moyen de protéger la propriété intellectuelle, ce qui sera nécessaire pour stimuler certaines formes d'innovation, sans pour autant entraver la diffusion de l'impression 3D ni l'essor des innovations connexes.

Selon toute vraisemblance, les progrès de l'IdO obligeront à adopter une interprétation commune des droits de la propriété pour ce qui est des données produites par des appareils connectés. Il est tout à fait imaginable qu'un capteur soit fabriqué par une société, exploité à l'aide d'un système mis au point par une autre et déployé dans un milieu (par exemple, un corps humain) impliquant un troisième propriétaire. D'où la nécessité de déterminer qui sera le titulaire des droits sur les données obtenues.

1. Exemples tirés de Nemeč et Voorhees (2014).

Les systèmes d'enseignement et de compétences nécessitent une attention constante

Les systèmes de compétences et de formation ont du mal à suivre le rythme imposé par les mutations technologiques. Bien que dépourvu d'un chapitre spécialement dédié aux compétences, le présent rapport fait état à plusieurs reprises d'une pénurie actuelle de compétences à l'égard de certaines technologies de production. On observe en effet que la question des compétences est rarement absente de la réflexion en cours sur la production dans les pays de l'OCDE.

Il est essentiel, et dans l'intérêt de la productivité, que les pouvoirs publics s'emploient à améliorer l'adéquation de l'offre et de la demande de compétences sur les marchés du travail (OCDE, 2015c). Selon toute vraisemblance, les nouvelles technologies de production y contribueront surtout en élargissant ou en accélérant le changement. Comme précédemment noté, la cadence et l'ampleur des mutations du marché du travail imputables aux technologies sont incertaines. En revanche, de nombreux métiers sont appelés à périr ou à disparaître. Par exemple, la maintenance préventive, qui repose sur les capteurs, la production auto-organisatrice et l'impression 3D d'objets complexes risquent de faire disparaître des emplois de techniciens de service, de planificateurs de production et d'ouvriers dans les activités d'assemblage et de gestion des stocks. À l'opposé, ces mêmes débouchés technologiques conduiront probablement à l'apparition de nouveaux métiers. La maintenance préventive, par exemple, fera émerger de nouvelles tâches liées à la configuration des systèmes et à la science des données. La production auto-organisatrice mobilisera des compétences spécialisées en modélisation des données. Enfin, l'impression 3D créera des emplois dans le domaine de la CAO. À mesure que le déploiement des robots progressera, on aura de plus en plus besoin de coordonnateurs chargés de les superviser et d'intervenir en cas de dysfonctionnement. Un nouveau métier très recherché pourrait être celui de « Data scientist » industriel (Lorentz et al., 2015).

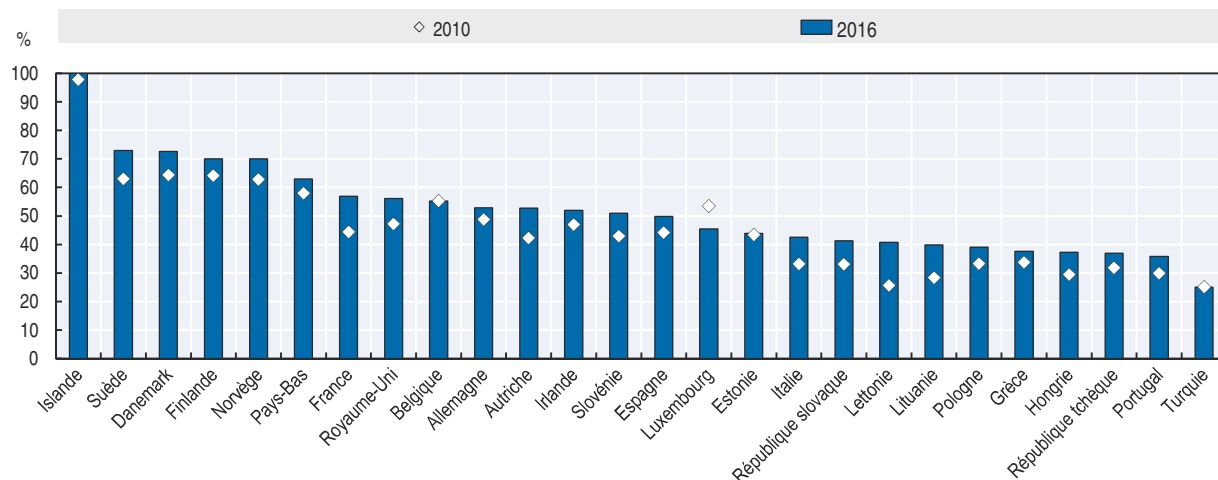
D'une manière générale, il y a tout lieu de penser que les nouveaux métiers seront de plus en plus qualifiés (les tâches ne cessent de gagner en complexité depuis les années 80, à un rythme plus élevé encore dans les métiers révolutionnés par l'informatisation [Spitz-Oener, 2006]). De même, on assistera certainement à un recul des besoins en compétences susceptibles d'être assurées par des machines, à la faveur des compétences qui leur sont complémentaires. Compte tenu des limites techniques (actuelles) de l'automatisation, on peut s'attendre à voir d'autres compétences prédominer dans les futurs métiers de la production, telles que l'adaptabilité, l'aptitude à résoudre des problèmes et le bon sens (Davis et Marcus, 2015).


Les compétences numériques pourraient gagner en importance dans la plupart des métiers. Beaucoup d'entreprises qualifient de frein le manque de compétences numériques (Capgemini, 2013). En 2013, plus de 60 % des actifs européens jugeaient leur niveau dans ce domaine insuffisant pour postuler à un emploi (OCDE, 2014) (graphique 1.2).

Il est essentiel de remédier à la répartition inégale des compétences pour atténuer les disparités salariales. Cela se justifie notamment par le fait que les tâches les moins exigeantes en termes de niveau d'instruction sont aussi celles qui sont le plus appelées à être automatisées (Frey et Osborne, 2013). De récents éléments viennent étayer cette prévision : Graetz et Michaels (2015) constatent en effet que le recours aux robots industriels se traduit par une diminution des heures travaillées, cette diminution touchant en premier lieu les travailleurs peu qualifiés et, dans une moindre mesure, les travailleurs dotés de compétences intermédiaires.

Graphique 1.2. **Généralisation de l'informatique dans le cadre de travail**

Part des employés utilisant un ordinateur connecté à l'internet au travail



Source : OCDE (2016), Base de donnée accès et utilisation des TIC, http://stats.oecd.org/index.aspx?DatasetCode=ICT_BUS, consultée en mars 2017. StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933568547>

Un certain nombre de nouvelles technologies de production mettent en lumière l'importance de l'interdisciplinarité dans l'enseignement et la recherche. Par exemple, les progrès accomplis en biologie de synthèse requièrent l'interaction de biologistes, physiciens, chimistes de synthèse et programmeurs informatiques. L'interdisciplinarité n'est pas un défi nouveau. Il y a tout lieu de penser que, du côté de l'offre, des solutions naîtront des liens de collaboration noués entre les établissements d'enseignement et de recherche, mais aussi de leur mise en concurrence. Les pouvoirs publics ont également un rôle à jouer. Par exemple, la pratique de l'évaluation par les pairs influe sur le mode d'affectation des fonds publics en faveur de la recherche pluridisciplinaire. Il convient néanmoins d'étudier de plus près les pratiques établies au sein des établissements de recherche, des équipes de chercheurs ou des services dédiés – que ce soit dans le secteur privé ou public – qui favorisent l'interdisciplinarité dans l'enseignement et la recherche. Les décideurs pourraient s'employer à reproduire, lorsqu'il y a lieu, les solutions adoptées par les établissements qui ont réussi à promouvoir la recherche interdisciplinaire, à l'instar de l'initiative Bio-X de l'université de Stanford.

Il faudra peut-être aussi intensifier les interactions avec l'industrie à mesure que la part du contenu intellectuel dans la production augmentera. La formation post-licence mériterait, par exemple, d'être revue à certains égards. Aux États-Unis, les doctorats en sciences du vivant sont trop axés sur la poursuite d'une carrière universitaire (American Society for Microbiology, 2013). Or, d'après les données publiées en 2014 par le National Science Board (NSB) dans le rapport *Science and Engineering Indicators*, seuls 29 % des nouveaux titulaires d'un doctorat en sciences du vivant (en 2010) trouveront un emploi à temps plein dans une université du pays.

Il est essentiel de disposer de systèmes efficaces d'apprentissage tout au long de la vie et de formation en entreprise. Les possibilités d'acquérir des compétences doivent évoluer au rythme des technologies, de même qu'il doit être possible d'accéder si nécessaire à des programmes de reconversion. Dans certains domaines, il faudra modifier la panoplie classique des compétences. Par exemple, les ingénieurs qui ont désormais affaire à l'impression 3D doivent se défaire de pans entiers de l'enseignement reçu pendant leur

formation. Globalement, il est essentiel de propager les compétences numériques et complémentaires aux machines. Le numérique a d'ailleurs toute sa place dans le développement professionnel, notamment par l'intermédiaire des cours en ligne ouverts et massifs. De plus, on étudie actuellement les moyens de proposer, grâce à l'IA, des formations en temps réel spécialement adaptées au profil et aux besoins de l'apprenant.

Il est tout aussi crucial de veiller à ce que le niveau de compétence générale (aptitude à lire, écrire, compter et résoudre des problèmes) soit suffisamment élevé au sein de la population tout entière, afin de permettre l'apprentissage de compétences spécifiques, en constante évolution, indépendamment de savoir à quoi ressemblera le paysage technologique de demain.

Bien d'autres questions qui touchent déjà les systèmes de compétences resteront au premier plan, comme celles des dispositifs à mettre en place pour inciter les établissements à offrir un enseignement de qualité ou encore la suppression de tout entrave à la présence des femmes dans les domaines de la science, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques. Il est en revanche difficile de savoir si les technologies de production émergentes en accentueront l'importance.

La prochaine révolution de la production pourrait également faire évoluer les politiques du marché du travail

Les politiques et institutions dédiées à l'emploi deviendraient sans doute plus prioritaires si des crises majeures venaient secouer les marchés du travail, sous l'effet de l'évolution des technologies de production. Ainsi, les mesures de réinsertion des chômeurs en milieu de carrière gagneraient probablement en importance. Comme indiqué dans la section précédente, la question est de savoir si une nouvelle génération de technologies de production est susceptible de modifier l'ampleur, la fréquence ou la nature des crises traversées par le marché du travail. En l'absence de prévisions parfaites, les pouvoirs publics devraient prendre en considération divers scénarios, pour certains fondés sur l'hypothèse de chocs soudains et de grande envergure.

S'il n'est pas possible de décrire avec certitude l'évolution future du marché du travail, certaines conjectures paraissent raisonnables :

- Une grande partie des emplois de production va probablement disparaître. D'après une enquête de 2015 menée auprès d'entreprises manufacturières du Royaume-Uni, 68 % misaient sur une hausse de l'investissement dans l'automatisation (Rigby, 2015).
- L'emploi non salarié pourrait se développer. Certains pays de l'OCDE voient déjà sa part progresser depuis quelques années. Ainsi, au Royaume-Uni, le nombre des travailleurs indépendants a augmenté d'environ 30 % depuis 2010 (Dellot, 2014). Le travail indépendant pourrait continuer de croître sous l'effet de facteurs de rejet et d'attraction. D'un côté, les technologies numériques peuvent faire reculer les frais de démarrage et garantir l'autonomie professionnelle dans de nombreux métiers, et les plateformes numériques abaisser les coûts liés à l'information et autres transactions sur les marchés de produits et de la main-d'œuvre, ce qui est potentiellement favorable à l'activité indépendante (par exemple, les plateformes numériques mettent les clients en relation directe avec les producteurs individuels, au détriment des sociétés qui proposent des services d'agrégation ou servent d'intermédiaires). D'un autre côté, les nouvelles technologies risquent de priver d'emploi des salariés, qui n'auront pas d'autre choix que de se mettre à leur compte. Des politiques sans lien direct avec les technologies de

production pourraient donc se révéler nécessaires pour bien accompagner la montée de l'activité indépendante⁹.

- Enfin, il y a tout lieu de tabler sur une flexibilité accrue du temps et du lieu de travail (Mokyr, Vickers et Ziebarth, 2015).

Les politiques territoriales pourraient aussi gagner en importance

En amplifiant les effets économiques et sociaux des dotations initiales en compétences, l'économie numérique exacerbe les disparités géographiques de la répartition du revenu (Moretti, 2012). Le mouvement de convergence des revenus observé entre les régions infranationales de nombreux pays de l'OCDE s'est arrêté ou inversé (Ganong et Shoag, 2015). Un certain nombre de mesures permettraient d'y remédier. Investir dans les compétences et les technologies en est une, et elle est particulièrement importante (en effet, il est certes généralement bénéfique d'investir dans l'infrastructure et les transports pour faciliter la dissémination géographique des compétences et avantages économiques, mais les retours diminuent au fil du temps [Filippetti et Peyrache, 2013]). De même, l'emplacement des sites de fabrication avancée pourrait être de plus en plus tributaire de certains types d'infrastructure. En particulier, les machines contrôlées par ordinateur dont les temps de fonctionnement sont en millisecondes et exigent donc une faible latence doivent impérativement se trouver à proximité des serveurs internet.

L'action des pouvoirs publics doit reposer sur une réflexion engagée sur le long terme

Dans les déclarations de politique scientifique, technologique et industrielle qui sont promulguées au plus haut niveau, il est généralement souligné, en guise d'introduction, que l'époque est marquée par d'exceptionnelles mutations technologiques. Les dirigeants d'entreprise insistent souvent eux aussi sur la rapidité des progrès¹⁰. De même, les décideurs sont régulièrement appelés à faire preuve de diligence au nom de la célérité supposée de l'évolution technologique. Si ces généralités sur l'accélération du changement ne sont pas nécessairement avérées, il n'empêche que certaines avancées technologiques, à l'instar de l'apprentissage automatique, pourraient être lourdes de conséquences sur la production, et ce dans des proportions inimaginables il y a encore quelques années (Domingos, 2015).

Cette rapidité pourrait accroître les avantages procurés par les politiques et programmes d'investissement publics judicieusement menés sur le long terme, tout en élevant les coûts à court terme. Les dirigeants des entreprises, de l'enseignement et des administrations doivent être prêts à examiner les incidences de cette situation sur l'action à mener et préparer l'avenir au-delà des dix prochaines années. L'Allemagne peut servir de modèle : le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie et le ministère fédéral de l'Enseignement et de la Recherche ont réuni les parties prenantes au sein d'un organisme de coordination chargé de réfléchir à la stratégie à adopter sur le long terme pour l'industrie 4.0.

La Chine et la prochaine révolution de la production

Dans le chapitre 12, Qian Dai examine l'évolution de la production en Chine telle que récemment observée et prévue pour l'avenir. L'industrie est la clé de voûte de l'économie chinoise, et la Chine est le pays qui contribue le plus à la valeur ajoutée manufacturière

mondiale. Cette situation, conjuguée au fait que la Chine ambitionne d'augmenter la part du contenu intellectuel dans sa production, est lourde de répercussions, tant pour le pays que pour le reste du monde.

Beaucoup d'entreprises chinoises ont réalisé de grands progrès dans la mise au point et l'utilisation des nouvelles technologies de production

Entre autres réalisations de l'industrie chinoise, on peut citer le vol spatial habité, les sous-marins habités capables de plonger dans des eaux très profondes, le train à grande vitesse et le supercalculateur le plus puissant au monde. Au cours de la période 2008-13, le nombre de robots industriels déployés en Chine a crû d'environ 36 % par an en moyenne. En 2013, la Chine est devenue le premier débouché mondial des robots industriels et devrait en compter quelques 428 000 unités en 2017 (IFR, 2015). Les ventes de robots industriels chinois ont augmenté de 77 % en 2014 (Shen, 2015). Les régions traditionnellement très actives dans la fabrication de produits mécaniques et électriques, notamment celles du Sud-Est du pays, ont mis en place de vastes programmes visant à remplacer les humains par les robots.

En Chine, les ventes d'imprimantes 3D sont passées de 2 milliards CNY en 2013 à 3.7 milliards CNY (environ 582 millions USD) en 2014 (Huang, 2015). Il sera recouru à des imprimantes 3D à usage industriel pour construire le C919, premier avion de ligne de conception chinoise (Ren, 2014).

En 2014, le marché chinois de l'IdO représentait plus de 600 milliards CNY (environ 94 milliards USD) (CCID Consulting, 2015). Outre qu'elles dominent le marché de l'IdO, de l'infonuagique et des données massives, les sociétés internet du pays, et en particulier les trois premières d'entre elles (Baidu, Alibaba et Tencent), ont entrepris de s'étendre au secteur manufacturier. En décembre 2015, Baidu a testé sur route un véhicule sans conducteur. De son côté, Alibaba lance des applications fondées sur les données massives dans plusieurs secteurs, dont la robotique, l'IdO et les biotechnologies, ou encore le financement et l'infrastructure.

Très tôt engagée dans la recherche en nanotechnologie, la Chine occupe le quatrième rang dans le classement mondial des brevets liés à ce domaine pour la période 2010-13 (OCDE, 2015d). Cette prouesse scientifique a ouvert la voie à de nombreuses applications industrielles. La biomédecine et les biomatériaux sont en plein essor. En Chine, l'ingénierie biomédicale crée de nouveaux produits et services grâce à la fusion des biotechnologies, des nouveaux matériaux et des TIC (par exemple, cornées artificielles et services génétiques). Toutes ces réalisations et d'autres encore découlent des progrès accomplis dans la recherche, l'enseignement et les infrastructures.

En parallèle, une série de mesures de grande envergure et de programmes d'investissement publics ont été engagés dans l'objectif principal de promouvoir l'utilisation des technologies numériques dans le secteur manufacturier. Lancée en 2015, l'initiative Made in China 2025 s'inscrit dans la stratégie conçue pour faire de la Chine une plus grande puissance manufacturière dans un horizon de trente ans. Plus récemment, l'initiative Internet Plus a vu le jour afin d'assurer la transition numérique de pièces maîtresses de l'économie. Pour compléter ces initiatives, des mesures transversales sont mises en œuvre, notamment dans le domaine de l'éducation, à l'exemple de l'ambitieux programme national d'enseignement de la robotique au primaire et au secondaire actuellement à l'étude au ministère de l'éducation (Ren, 2016).

La montée en gamme du secteur manufacturier chinois soulève des questions complexes, sur le plan national et à l'étranger

Sous l'effet du vieillissement de sa population et de la hausse rapide des coûts de la main-d'œuvre, l'industrie chinoise a vu son avantage de coût tomber par rapport aux États-Unis sous la barre des 5 % (Sirkin, Zinser et Rose, 2014). Bien qu'en hausse depuis dix ans, la productivité du travail en Chine est encore loin des niveaux affichés dans les pays développés. La concurrence mondiale s'intensifie et des entreprises multinationales ont commencé à rapatrier leurs activités de fabrication haut de gamme.

Des pans entiers du secteur manufacturier chinois sont touchés par des pénuries de capacités de gestion et de capacités numériques. La Chine reste lourdement tributaire des importations pour ses activités de fabrication avancée. La difficulté consiste non seulement à accroître l'investissement public en faveur de la science et de l'innovation, mais aussi à commercialiser les résultats de la recherche, à moderniser les infrastructures, à améliorer le fonctionnement des marchés et à encourager l'innovation dans le secteur privé (par exemple, plus de 70 % des brevets en nanotechnologie et 50 % des brevets délivrés dans le domaine de la robotique émanent des secteurs universitaire et public [Organisation mondiale de la propriété intellectuelle, 2015]). Enfin, les préoccupations environnementales occupent une place grandissante depuis l'aggravation des problèmes de pollution de l'air, de l'eau et du sol imputables au secteur manufacturier.

Par effet de ricochet, les pouvoirs publics sont de surcroît confrontés à divers phénomènes comme la déstabilisation du marché du travail et le poids croissant de la cybersécurité. Les programmes de remplacement du travail humain par les robots engendrent des pénuries de main-d'œuvre et une hausse des salaires est observée dans l'est de la Chine. Ils ne devraient pas impacter défavorablement le marché du travail (Bai, 2014). En revanche, l'évolution technologique fait grimper les besoins en cadres, chercheurs et techniciens aux compétences diverses. De plus, l'essor attendu de l'entrepreneuriat et du travail non salarié appelle de nouvelles politiques du travail. Au cours des 12 mois qui ont précédé décembre 2015, le nombre moyen d'incidents de sécurité de l'information détectés en Chine et à Hong Kong (Chine) s'est élevé à 1 245, ce qui représente une hausse de 417 % par rapport à l'année précédente (PwC, 2015). Compte tenu de la place centrale que les TIC occupent dans des secteurs clés, la sécurité de l'information est appelée à se renforcer.

La prochaine révolution de la production et les chaînes de valeur mondiales (CVM)

Ces dernières décennies ont été marquées par l'intégration croissante, à l'échelon international, des marchés de capitaux, de biens intermédiaires, de produits finis, de services et de main-d'œuvre. Face au morcellement grandissant de la production le long des CVM, les décideurs ont commencé à s'intéresser de plus près aux retombées économiques à attendre selon la position occupée dans une CVM (OCDE, 2013). Les CVM évoluent en permanence. Les récentes études de l'OCDE n'ont pas permis d'établir formellement l'existence d'un phénomène de relocalisation des activités manufacturières depuis les pays émergents vers les économies avancées provenant de l'automatisation et des économies de coûts imputables au changement technologique (De Backer et al., 2016). Il apparaît néanmoins que les entreprises européennes fortement robotisées sont moins susceptibles d'implanter leurs sites de production à l'étranger. À certains égards, ces technologies, notamment l'impression 3D, pourraient contribuer à rapprocher la production des marchés des pays développés. Il n'empêche que l'évolution de la situation mondiale sera certainement marquée par les mutations actuellement observées en Chine.

L'absorption réussie des nouvelles technologies dans les pays en développement pourrait concourir à la réalisation des objectifs de productivité, de transformation structurelle et de protection de l'environnement. En effet, certaines des nouvelles technologies de production sont particulièrement bien adaptées aux conditions économiques de nombreux pays en développement. Il existe par exemple des robots à la pointe du progrès qui sont relativement peu onéreux et dont la manipulation n'a pas à être confiée à du personnel hautement qualifié. De même, les drones à bas coût pourraient rendre certains procédés agricoles plus efficaces. L'amélioration des voies de diffusion du savoir, dont l'internet fait partie, pourrait créer des possibilités de saut technologique, en particulier dans les grandes économies en développement. Cela dit, dans une grande partie du monde en développement, les entreprises ont manifestement du mal à apprendre à utiliser les technologies. Comin et Mestieri (2013) se sont employés à mesurer, dans des économies développées et en développement, le temps qu'il avait fallu compter pour qu'un certain nombre de technologies soient adoptées ainsi que l'intensité avec laquelle elles avaient ensuite été employées. Dans 25 cas, ils constatent que les taux d'adoption convergent, mais que l'intensité d'utilisation varie grandement d'un pays à l'autre.

Les possibilités et risques associés aux CVM varieront probablement d'un secteur à l'autre

Les branches d'activité à forte intensité de main-d'œuvre qui dominent dans beaucoup de pays en développement (par exemple, fabrication d'articles d'habillement, de chaussures et de cuir, meubles, textiles et produits alimentaires) seront peut-être moins sujettes au changement dans la mesure où l'automatisation d'un grand nombre des procédés utilisés n'est pas encore achevée (ou économiquement rentable). D'autres branches, comme la fabrication de matériels électriques, d'articles électroniques, de machines et de matériels, seront probablement très touchées, surtout si les salaires augmentent, compte tenu de leur fort potentiel d'automatisation. Par ailleurs, dans des secteurs comme la construction automobile, l'adoption des nouvelles technologies de production devraient moins dépendre des salaires ou du potentiel d'automatisation que de la demande intérieure et de l'intérêt grandissant des consommateurs pour des produits de qualité et adaptés à leurs exigences.

Le changement technologique pourrait rapidement mettre en péril les capacités en place dans les pays en développement. Par exemple, la fabrication de chaussures était jusqu'ici une activité à forte intensité de main-d'œuvre en raison des qualités de dextérité requises. Pourtant, Adidas vient de construire en Allemagne une usine entièrement automatisée permettant de fabriquer des chaussures personnalisées en seulement cinq heures, contre plusieurs semaines à l'heure actuelle (Shotter et Whipp, 2016).

Nombreux sont les pays en développement où tout le système de production devra être modernisé. Les entreprises de ces pays auront bien du mal à mettre à niveau leurs machines, usines et systèmes informatiques, souvent vétustes, pour les adapter aux nouvelles technologies. Les niveaux de tolérance, les normes techniques et les protocoles sur lesquels reposent les technologies de production émergentes leur sont généralement étrangers, et ces technologies supposent habituellement une alimentation électrique ininterrompue, ce qui n'est pas toujours possible selon les pays.

Investir dans les nouvelles technologies peut également entraîner une série de dépenses complémentaires. Les robots, par exemple, vont normalement de pair avec des dispositifs périphériques (barrières de sécurité et capteurs, notamment) et procédures de mise en œuvre (gestion de projet, programmation, installation et développement logiciel), qui

représentent un coût au moins aussi important. Une diversité d'acteurs peut assurer le financement de tels investissements : des sociétés de capital-risque aux banques de développement, en passant par les établissements de crédit d'équipement ou de financement des PME et des start-ups. Dans le monde en développement, toute cette palette de services financiers n'est disponible que dans une poignée de pays.

Comme précédemment indiqué, la prochaine révolution de la production ne se fera pas sans un système d'enseignement supérieur performant, capable de former les étudiants en sciences, technologie, ingénierie et mathématiques, tout en tissant des liens étroits entre production et formation professionnelle. Pourtant, alors même qu'ils nécessitent le plus de ressources et d'investissements, ces secteurs de l'éducation ne sont généralement pas prioritaires dans les pays en développement.

Ainsi qu'on le voit dans le chapitre 2, la prochaine révolution de la production a besoin d'infrastructures de télécommunications à large bande qui soient vastes, fiables et sécurisées pour tenir toutes ses promesses. La couverture des zones rurales, en particulier dans les grands pays, favorisera la communication entre producteurs et consommateurs à l'échelon local ainsi que la mise en place de marchés intérieurs intégrés. Selon toute vraisemblance, une connectivité rapide, propice à l'échange de données, caractérisera la production de demain et en sera un facteur de réussite. Mettre en place l'infrastructure correspondante constituera un défi supplémentaire pour nombre de pays en développement.

Conclusion

Le présent rapport traite des implications qu'auront les technologies qui révolutionnent actuellement la production pour l'économie et l'action des pouvoirs publics. Cette révolution promet d'être au moins aussi profonde que celles survenues dans le passé. En effet, les mutations qui transforment actuellement la production rejailliront fortement sur la productivité, l'emploi, les compétences, la répartition des revenus, les échanges commerciaux, le bien-être et l'environnement. Toutes les technologies considérées évoluent très rapidement. Il y va donc de l'intérêt des entreprises, des économies et des sociétés que les pouvoirs publics appréhendent l'évolution possible de la production et la manière d'y répondre.

Les questions de fond examinées ici sont nombreuses, mais la liste est loin d'être exhaustive. D'autres domaines d'intervention des politiques sont importants. Par exemple, puisque les machines autonomes sont de plus en plus présentes sur les marchés, il est tout à fait envisageable que la politique de concurrence évolue en fonction de l'IA, et inversement. L'essor de l'impression 3D pourrait remettre en question certains aspects des politiques commerciales (s'agissant notamment de taxer les transferts transnationaux de données, et plus seulement les mouvements de marchandises). De même, la politique à l'égard des consommateurs pourrait avoir à régler de nouvelles questions, notamment en ce qui concerne la sécurité des vêtements connectés à l'IdO.

Nombre des questions soulevées dans ce rapport nécessitent un examen plus approfondi, en particulier celle des conséquences distributives du changement technologique. Les nouvelles technologies de production permettront à beaucoup de gagner en niveau et en qualité de vie mais, comme précédemment indiqué, elles vont probablement aussi creuser les inégalités. Ces effets distributifs exigent des mesures qui dépassent les domaines de la science et de l'innovation¹¹. Par ailleurs, force est de rappeler que la croissance fondée sur les nouvelles technologies peut également réduire les inégalités de

patrimoine (par opposition aux inégalités de revenu) dès lors que les technologies génèrent une croissance plus importante que celle du retour sur investissements dans lesquels l'innovation joue un grand rôle. Ainsi que Piketty (2014) l'a récemment souligné, un taux de croissance supérieur au taux de rendement de l'investissement peut contribuer à aplanir les inégalités de patrimoine.

La fragilité du système est un autre thème qui mériterait peut-être une analyse plus approfondie. Il y a tout lieu de penser que les risques et les conséquences des vulnérabilités en chaîne augmentent du fait que les systèmes de production sont de plus en plus complexes et fondés sur les TIC. Or, de tels systèmes, qui revêtent une importance vitale et sont interdépendants, peuvent se comporter de manière imprévisible et inédite (comme en mai 2010, lorsque le jeu des algorithmes a provoqué un « krach éclair » sur les bourses mondiales, faisant disparaître plus de 1 000 milliards USD en quelques minutes). La prolifération des systèmes de production numérique pourrait également rendre plus difficile d'anticiper les défaillances technologiques (Arbesman, 2016). D'où l'importance que les pouvoirs publics aient une meilleure compréhension des systèmes complexes afin de pouvoir protéger la société contre des dérèglements potentiellement lourds de conséquences (Nesse, 2014).

Un autre thème de recherche prioritaire pour les pouvoirs publics, déjà mis en exergue par Tassej (2014) et abordé dans plusieurs chapitres du présent rapport, tient à la nécessité de mieux comprendre les retombées de l'action publique sur l'utilisation des technologies de pointe à des fins de production. Plus précisément, il faudrait disposer d'éléments plus détaillés sur les effets des décisions publiques et privées en matière d'allocation des ressources en faveur de la R-D dans les secteurs d'activité ainsi que sur les phases du cycle de R-D à différents niveaux des chaînes de valeur de la haute technologie et dans plusieurs types d'infrastructure de recherche. Pour être plus efficaces, les politiques poursuivies ne doivent plus mettre l'accent sur l'ampleur des ressources consacrées à la prochaine révolution de la production, mais se recentrer sur l'incidence de la composition du soutien apporté à travers les mesures, les programmes et les institutions.

Notes

1. Voir www.extremetech.com/electronics/185960-foxconn-is-attempting-to-replace-its-human-workers-with-thousands-of-robots.
2. Par exemple, les tâches cognitives non répétitives relèvent souvent de métiers spécialisés, techniques et d'encadrement. Les tâches manuelles non répétitives – qui impliquent des interactions personnelles, la reconnaissance visuelle et linguistique ainsi que la faculté de s'adapter à la situation – sont effectuées par les gardiens d'immeuble, les auxiliaires de vie et les chauffeurs, entre autres exemples (Autor, Levy et Murnane, 2003).
3. La probabilité que l'emploi augmente à la suite d'un choc technologique est plus grande dans les secteurs dans lesquels le coût des stocks est faible, la demande élastique et les prix flexibles (Chang, Hornstein et Sarte, 2009).
4. La création d'emplois a également été forte dans le domaine de la réparation des ordinateurs, des distributeurs et des machines de bureau (The Economist, 2011).
5. Voir Hod Lipson à l'adresse www.youtube.com/watch?v=tmPLQLdfPA.
6. Dans le même ordre d'idée, les travaux de recherche consacrés aux avis d'experts sur les idées novatrices montrent l'intérêt de recueillir une diversité de points de vue. Comparant des idées brutes et leurs débouchés commerciaux, Kornish et Ulrich (2014) montrent qu'il est plus efficace de faire appel à un panel de consommateurs qu'aux experts du domaine pour déterminer si une idée est « bonne ».
7. <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/materials/germs-that-build-circuits>.

8. Plus généralement, une préoccupation récurrente est de savoir si la croissance transformatrice de la puissance de calcul à l'origine de la révolution numérique va se poursuivre. Pour nombre d'appareils numériques, les vitesses de traitement, les capacités de mémoire, la densité et la précision des capteurs, voire les nombres de pixels, suivent la loi de Moore et affichent la même augmentation exponentielle. Cela dit, au niveau de l'atome, il existe une limite à la possibilité de réduire la taille des transistors des circuits intégrés. Des experts pensent que cette limite sera probablement atteinte au début des années 2020 (c'est déjà le cas de la consommation électrique). On ignore quelles seront la cadence et l'orientation de l'évolution technologique dès lors que la loi de Moore ne s'appliquera plus et que de nouveaux types d'innovation (par exemple, les nouvelles générations d'algorithmes et les circuits intégrés tridimensionnels) apparaîtront.
9. S'agissant notamment de réglementer le travail à domicile.
10. Dans nombre de ses déclarations officielles, le directeur de l'ingénierie chez Google, Ray Kurzweil, a prédit pour l'avenir l'accélération exponentielle de certains aspects du développement technologique, en particulier dans les TIC.
11. Diverses mesures sont envisageables, du revenu de base universel, actuellement expérimenté sous différentes formes dans un certain nombre de pays, à la réduction de l'impôt sur le revenu d'activité, en passant par l'accès à l'apprentissage et à la reconversion professionnelle tout au long de la vie.

Références

- Acemoglu, D. (2002), « Technical change, inequality, and the labor market », *Journal of Economic Literature*, vol. 40, n° 1, pp. 7-72.
- American Society for Microbiology (2013), « Microbe-powered jobs: How microbiologists can help build the bioeconomy », compte rendu d'un colloque de l'American Academy of Microbiology, Dallas, février.
- Andrews, D., C. Criscuolo et P. Gal (2015), « Frontier firms, technology diffusion and public policy: Micro evidence from OECD countries », *OECD Productivity Working Papers*, n° 2, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/eco/growth/Frontier-Firms-Technology-Diffusion-and-Public-Policy-Micro-Evidence-from-OECD-Countries.pdf.
- Andrews, D., C. Criscuolo et C. Menon (2014), « Do resources flow to patenting firms?: Cross-country evidence from firm-level data », *Documents de travail du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 1127, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jz2lpmk0gs6-en>.
- Arbesman, S. (2016), *Overcomplicated: Technology at the Limits of Comprehension*, Penguin Random House, New York.
- Armstrong, S., K. Sotola et S.S. Óigeartaigh (2014), « The errors, insights and lessons of famous AI predictions – and what they mean for the future », *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, vol. 26, n° 3, pp. 317-342, <http://dx.xoi.org/10.1080/0952813X.2014.895105>.
- Autodesk (2016), « Bionic Partition Project », page web, Autodesk Research, www.autodeskresearch.com/projects/bionic-partition-project.
- Autor, D.H. (2015), « Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 29, n° 3, pp. 3-30, <http://economics.mit.edu/files/10865>.
- Autor, D.H. et D. Dorn (2013), « The growth of low-skill service jobs and the polarization of the US labor market », *American Economic Review*, vol. 103, n° 5, pp. 1553-1597, <http://economics.mit.edu/files/1474>.
- Autor, D.H., F. Levy et R.J. Murnane (2003), « The skill content of recent technological change: An empirical exploration », *Quarterly Journal of Economics*, vol. 118, Issue 4, pp. 1279-1333.
- Bai, T. (2014), « “ 机器换人 ” 会影响就业吗? » [Quel effet sur l'emploi du programme de remplacement des humains par les robots?], *People's Daily*, 6 juin, Beijing.
- Barua, A., D. Mani et R. Mukherjee (2013), « Impacts of effective data on business innovation and growth », chapitre 2 d'une étude en trois parties, University of Texas at Austin, www.businesswire.com/news/home/20100927005388/en/Sybase-University-Texas-Study-Reveals-Incremental-Improvement (consulté le 20 mai 2015).
- Basu, S., J.L. Fernald et M.S. Kimball (2006), « Are technology improvements contractionary? », *American Economic Review*, vol. 96, n° 5, pp. 1418-1448, www.nber.org/papers/w10592.
- Berger, T. et C.B. Frey, (2015), *Industrial Renewal in the 21st Century: Evidence from US Cities?*, Oxford Martin School, University of Oxford, www.oxfordmartin.ox.ac.uk/publications/view/1849.

- Beyer, C. (2014), « Expert view: Strategic implications of current trends in additive manufacturing », *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, pp. 064701-1, <http://manufacturingscience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1909628>.
- Bosch, R., M. van de Pol et J. Philp (2015), « Define biomass sustainability », *Nature*, vol. 523, pp. 526-527, www.nature.com/news/policy-define-biomass-sustainability-1.18058.
- Brynjolfsson, E. et A. McAfee (2014), *The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*, W.W. Norton & Company, New York.
- Brynjolfsson, E., L.M. Hitt et H.H. Kim (2011), « Strength in numbers: How does data-driven decisionmaking affect firm performance? », *Social Science Research Network*, 22 avril, http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1819486.
- Calvino, F., C. Criscuolo et C. Menon (2016), « No country for young firms?: Start-up dynamics and national policies », *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, n° 29, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jm22p40c8mw-en>.
- Capgemini (2013), « The digital talent gap », Capgemini Consulting, <http://ebooks.capgemini-consulting.com/The-Digital-Talent-Gap/#/6/>.
- CCA/CRA (Computing Community Consortium/Computing Research Association) (2009), « Roadmap for US robotics: From Internet to robotics », Computing Community Consortium/Computing Research Association, www.us-robotics.us/reports/CCC%20Report.pdf.
- CCID Consulting (2015), « 中国物联网和传感器发展报告 2015 » [Livre blanc sur l'évolution de l'internet des objets et le secteur des capteurs en Chine, 2015], CCID Consulting, Beijing.
- Chang, Y., A. Hornstein et P.-D. Sarte (2009), « On the employment effects of productivity shocks: The role of inventories, demand elasticity and sticky prices », *Journal of Monetary Economics*, vol. 56, pp. 328-343.
- Citigroup-Oxford Martin School (2015), *Technology at Work: The Future of Innovation and Employment*, University of Oxford, www.oxfordmartin.ox.ac.uk/publications/view/1883.
- Comin, D.A. et M. Mestieri (2013), « Technology diffusion: Measurement, causes and consequences », *NBER Working Paper* n° 19052.
- Criscuolo, C., P. Gal et C. Menon (2014), « The dynamics of employment growth: New evidence from 18 countries », *CEP Discussion Paper* n° 1274, <http://cep.lse.ac.uk/pubs/download/dp1274.pdf>.
- Davidson, P. (2012), « 3-D printing could remake US manufacturing », *USA Today*, 10 juillet, <http://usatoday30.usatoday.com/money/industries/manufacturing/story/2012-07-10/digital-manufacturing/56135298/1>.
- Davis, E. et G. Marcus (2015), « Commonsense reasoning and commonsense knowledge in artificial intelligence », *Communications of the ACM*, vol. 58, n° 9.
- Davis, F.R. (2014), *Banned: A History of Pesticides and the Science of Toxicology*, Yale University Press, New Haven.
- de Backer, K. et al. (2016), « La relocalisation : Mythe ou réalité ? », Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jm3tqx59bhd-fr>.
- Delebecque, C. et J. Philp (2015), « Training for synthetic biology jobs in the new bioeconomy », *Science*, 2 juin, www.sciencemag.org/careers/2015/06/training-synthetic-biology-jobs-new-bioeconomy.
- Dellot, B. (2014), « Salvation in a start-up: The origins and nature of the self-employment boom », *Royal Society for the Arts*, www.thersa.org/globalassets/pdfs/blogs/salvation-in-a-start-up-report-180714.pdf.
- Domingos, P. (2015), *The Master Algorithm: How the Request for the Ultimate Learning Machine Will Remake Our World*, Penguin, Random House, Royaume-Uni.
- Drexler, K.E. (1986), *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, Doubleday, New York.
- Elliott, S.W. (2014), « Anticipating a Luddite Revival », *Issues in Science and Technology*, vol. 30, n° 3, National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Institute of Medicine, University of Texas at Dallas, <http://issues.org/30-3/stuart/>.
- Evans, P.C. et M. Anninziata (2012), « Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines », General Electrics, www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf.
- Ezell, S.J. (2016), « A policymaker's guide to smart manufacturing », *Information Technology band Innovation Foundation*, www2.itif.org/2016-policymakers-guide-smart-manufacturing.pdf?_ga=1.260516741.904228042.1489586683.

- Filippetti, A. et A. Peyrache (2013), « Labour productivity and technology gap in European regions: A conditional frontier approach », *Regional Studies*, vol. 49, n° 4, pp. 532-554, <http://dx.doi.org/10.1080/00343404.2013.799768>.
- Ford, M. (2015), *Rise of the Robots: Technology and the Threat of a Jobless Future*, Basic Books, New York.
- Foresight (2013), *The Future of Manufacturing: A New Era of Opportunity and Challenge for the UK*, Government Office for Science, Londres.
- Fraunhofer (2015), « Analysis of the impact of robotic systems on employment in the European Union », <https://ec.europa.eu/digital-single-market/news/fresh-look-use-robots-shows-positive-effect-automation>.
- Frey, C.B. et M.A. Osborne (2013), « The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? », *Oxford Martin School Working Paper*, University of Oxford.
- Ganong, P. et D. Shoag (2015), « Why has regional income convergence in the US declined? », <http://scholar.harvard.edu/files/shoag/files/ganongshoagjan2015.pdf>.
- Gibson, I., D. Rosen et B. Stucker (2015), *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, Springer, New York.
- Goos, M. et A. Manning (2007), « Lousy and lovely jobs: The rising polarization of work in Britain », *Discussion Paper*, DP0604, Center for Economic Performance, <http://cep.lse.ac.uk/pubs/download/dp0604.pdf>.
- Gordon, R.J. (2012), « Is US economic growth over? Faltering innovation confronts the six headwinds », *Document de travail*, n°18315, National Bureau of Economic Research, www.nber.org/papers/w18315.
- Graetz, G. et G. Michaels (2015), « Robots at work », *Document de réflexion*, n° 1335, Centre for Economic Performance, <http://cep.lse.ac.uk/pubs/download/dp1335.pdf>.
- Handel, M.J. (2012), « Trends in job skills demands in OECD countries », *OECD Social, Employment and Migration Working Papers*, n° 43, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5k8zk8pcq6td-en>.
- Hoos, H.H. (2012), « Programming by optimization », *Communications of the ACM*, vol. 55, n° 2, pp. 70-80.
- Huang, X. (2015), « 我国 3D 打印产业体系有望明年建立 » [Le système chinois d'impression 3D à usage industriel attendu pour 2016], Ministère des Finances, www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caijingshidian/jjrb/201503/t20150302_1196916.html.
- IFR (2015), « World Robotics 2016 Industrial Robots », International Federation of Robotics, www.ifr.org/industrial-robots/statistics/.
- Jaimovich, N. et H.E. Siu (2012), « The trend is the cycle: Job polarization and jobless recoveries », *NBER Working Paper*, n° 18334, www.nber.org/papers/w18334.
- Jain, N., J. O'Reilly et N. Silk (2015), « Driverless cars: Insurers cannot be asleep at the wheel », *Bank of England Underground Blog*, <http://bankunderground.co.uk/2015/06/19/driverless-cars-insurers-cannot-be-asleep-at-the-wheel/>.
- Jasanoff, S. (2005), *Designs on Nature: Science and Democracy in Europe and the United States*, Princeton University Press, Princeton, N.J.
- Jasanoff, S. (2003), « (No?) Accounting for expertise », *Science and Public Policy*, vol. 30, n° 3, pp. 157-62, <http://dx.doi.org/10.3152/147154303781780542>.
- Jones, B.F. (2012), « The burden of knowledge and the “death of the Renaissance Man”: Is innovation getting harder? », *Review of Economic Studies*, vol. 76, pp. 283-317.
- Kamenova, K. et T. Caulfield (2015), « Stem cell hype: Media portrayal of therapy translation », *Science Translational Medicine*, vol. 7, n° 278, pp. 278ps4, <http://dx.doi.org/10.1126/scitranslmed.3010496>.
- Keynes, J.M. (2009), « Economic possibilities for our grandchildren », in J.M. Keynes, *Essays in Persuasion*, Classic House Books, New York.
- Khatchadourian, R. (2015), « We Know How You Feel: Computers are learning to read emotion, and the business world can't wait », *The New Yorker*, 19 janvier, www.newyorker.com/magazine/2015/01/19/know-feel.
- Kinkead, G. (2014), « Software designs products by simulating evolution », *MIT Technology Review*, novembre, www.technologyreview.com/s/532126/software-designs-products-by-simulating-evolution/.
- Kleinschmit, D. et al. (2014), « Shades of green: A social scientific view on bioeconomy in the forest sector », *Scandinavian Journal of Forestry Research*, vol. 29, pp. 402-410.
- Koomey, J. (2011), « Growth in data center electricity use 2005 to 2010 », *Analytics Press*, Oakland (CA), www.analyticspress.com/datacenters.html.

- Kornish, L. et K.T. Ulrich (2014), « The Importance of the raw idea in innovation: Testing the sow's ear hypothesis », *Journal of Marketing Research*.
- Levy, F. et R.J. Murnane (2013), « Dancing with robots: Human skills for computerized work », <http://dusp.mit.edu/sites/dusp.mit.edu/files/attachments/publication/Dancing-With-Robots.pdf>.
- Lin, J. (2011), « Technological adaptation, cities, and new work », *Review of Economics and Statistics*, vol. 93, n° 2, 554-574.
- Lorentz, M. et al. (2015), « Man and machine in Industry 4.0: How will technology transform the industrial workforce through 2025? », The Boston Consulting Group, www.bcgperspectives.com/content/articles/technology-business-transformation-engineered-products-infrastructure-man-machine-industry-4/.
- Mandel, M. (2012), « Beyond goods and services: The (unmeasured) rise of the data-driven economy », Progressive Policy Institute, www.progressivepolicy.org/2012/10/beyond-goods-and-services-the-unmeasured-rise-of-the-data-driven-economy/.
- MarketsandMarkets (2014), « Additive manufacturing and material market by technology, by material (plastics, metals, and ceramics), by application, and by geography – analysis and forecast to 2014-2020 », MarketsandMarkets, Dallas.
- Markoff, J. (2015a), « A learning advance in artificial intelligence rivals human abilities », *New York Times*, 10 décembre, www.nytimes.com/2015/12/11/science/an-advance-in-artificial-intelligence-rivals-human-vision-abilities.html?_r=0.
- Markoff, J. (2015b), *Machines of Loving Grace: The Quest for Common Ground between Humans and Robots*, Harper Collins Publishers.
- McKinsey Global Institute (2013), « Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy », McKinsey & Company, www.mckinsey.com/~/media/McKinsey/dotcom/Insights%20and%20pubs/MGI/Research/Technology%20and%20Innovation/Big%20Data/MGI_big_data_full_report.ashx.
- Merkel, A. (2015), Speech delivered the World Economic Forum's Annual meeting in Davos, in the session « Global responsibilities for a digital age », www.weforum.org/agenda/2015/01/12-quotes-from-angela-merkel-at-davos-2015/.
- Miller, B. et R. Atkinson (2013), « Are robots taking our jobs, or making them? », The Information Technology and Innovation Foundation, www2.itif.org/2013-are-robots-taking-jobs.pdf.
- Mokyr, J. (2014), Intervention à la Conférence OCDE-NBER sur la productivité et l'innovation à long terme, www.oecd.org/industry/ind/proceedings-productivity-growth-and-innovation-in-the-long-run.pdf.
- Mokyr, J., C.Vickers et N.L. Ziebarth (2015), « The history of technological anxiety and the future of economic growth: Is this time different? », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 29, n° 3, pp. 31-50.
- Moretti, E. (2012), *The New Geography of Jobs*, Houghton, Mifflin, Harcourt Publishing, New York.
- NAE (National Academy of Engineering) (2015), *Making Value for America: Embracing the Future of Manufacturing, Technology, and Work*, Committee on Foundational Best Practices for Making Value for America, National Academy of Engineering, National Academies Press, Washington, DC.
- Nature (2013), « Sharing data in materials science », 28 novembre, *Nature*, vol. 503, n° 7477, pp. 463-464.
- Nemec, D.R. et K. Voorhees (2014), « Intellectual property issues stacking up for 3-D printing », Skadden, Arps, Slate, Meagher & Flom LLP, www.skadden.com/insights/intellectual-property-issues-stacking-3-d-printing.
- Nesse, R. (2014), « The fragility of complex systems », in J. Brockman (dir. pub.), *What Should We Be Worried About?*, Harper Perrenial, New York.
- Nordhaus, W. (2007), « Two centuries of productivity growth in computing », *Journal of Economic History*, vol. 67, n° 1, pp. 17-22.
- OCDE (Organisation pour la coopération et le développement économiques) (2016a), « ICTs and jobs: Complements or substitutes? », *OECD Digital Economy Papers*, n° 259, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jlwnklzplhg-en>.
- OCDE (2016b), *Nanomaterials in Waste Streams: Current Knowledge on Risks and Impacts*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264249752-en>.
- OCDE (2015a), « Enabling the next production revolution », rapport établi en vue de la conférence Shaping the Strategy for Tomorrow's Production, Copenhague, 27 février.

- OCDE (2015b), *Data-Driven Innovation: Big Data for Growth and Well-Being*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264229358-en>.
- OCDE (2015c), *The Future of Productivity*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264248533-en>.
- OCDE (2015d), « Share of countries in nanotechnology patents, 2010-13 », *OECD Key Nanotechnology Indicators*, base de données, www.oecd.org/sti/sci-tech/9-Share-of-countries-in-nanotech-patents-2010-13-2015.xls.
- OCDE (2015e), *La gestion du risque de sécurité numérique pour la prospérité économique et sociale : Recommandation de l'OCDE et document d'accompagnement*, OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264246089-fr>.
- OCDE (2014), *Measuring the Digital Economy: A New Perspective*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264221796-en>.
- OCDE (2013), *Économies interconnectées : Comment tirer parti des chaînes de valeur mondiales*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264201842-fr>.
- OCDE (2012), *OECD Internet Economy Outlook 2012*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264086463-en>.
- OMPI (Organisation mondiale de la propriété intellectuelle) (2015), « Rapport 2015 sur la imp dans le monde : Innovations majeures et croissance économie », Organisation mondiale de la propriété intellectuelle, Genève, www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_944_2015.pdf.
- Packer, J. (2008), *Mobility without maihem: Safety, Cars, and Citizenship*, Duke University Press, Durham, NC.
- PEW Foundation (2014), « AI, Robotics and the Future of Jobs », www.pewinternet.org/2014/08/06/future-of-jobs/.
- Philp, J.C. (2015), « Balancing the bioeconomy: Supporting biofuels and bio-based materials in public policy », *Energy & Environmental Science*, vol. 8, pp. 3063-3068.
- Pidgeon, N.F., R.E. Kasperson et P. Slovic (dir. pub.) (2003), *The Social Amplification of Risk*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni.
- Piketty, T. (2014), *Capital in the Twenty-First Century*, Harvard University Press, Cambridge (MA) et Londres.
- Pollack, M.A. et G.C. Shaffer (2009), *When Cooperation Fails: The International Law and Politics of Genetically Modified Foods*, Oxford University Press.
- PwC (PricewaterhouseCoopers) (2015), « Companies in China see five-fold rise in average detected information security incidents in 2015 », [pwchk.com](http://www.pwchk.com), www.hk-lawyer.org/content/chinese-companies-see-five-fold-rise-average-detected-information-security-incidents-2015.
- Ren, M. (2014), « 飞机钛合金起落架可 3D 打印 » [Utilisation de l'impression 3D dans la fabrication d'un train d'atterrissage d'avion en alliage à base de titane], *Beijing Daily*, 9 janvier, <http://tech.hexun.com/2014-01-09/161273352.html>.
- Ren, S. (2016), « 教育部机器人学中小学课程教学指南专家论证会在京召开 » [Réunion d'experts à Beijing sur l'enseignement de la robotique au primaire et au secondaire], *Beijing Times*, 22 janvier, http://epaper.jinghua.cn/html/2016-01/22/content_275548.htm.
- Rigby, M. (2015), « Future-proofing UK manufacturing: Current investment trends and future opportunities in robotic automation », Barclays, www.barclayscorporate.com/content/dam/corppublic/corporate/Documents/research/automation-report.pdf.
- Robinson, L. et K. McMahon (2016), « TMS launches materials data infrastructure study », *JOM*, vol. 68, n° 8, pp. 2014-2016.
- Rotman, D. (2013), « How technology is destroying jobs », *MIT Technology Review*, juin, www.technologyreview.com/insider/pricing/.
- Shen, Z. (2015), « 中国国产工业机器人同比增长 77% » [La production de robots à usage domestique a augmenté de 77 %], *Economic Daily*, 13 juillet, http://tech.ce.cn/news/201507/13/t20150713_5913227.shtml.
- Shotter, J. et L. Whipp (2016), « Robot revolution helps Adidas bring shoemaking back to Germany », *Financial Times*, 8 juin, www.ft.com/content/7eaffc5a-289c-11e6-8b18-91555f2f4fde#comments.
- Sirkin, H.L., M. Zinser et J. Rose (2014), « The shifting economics of global manufacturing », *BCG Perspectives*, www.bcgperspectives.com/content/articles/lean_manufacturing_globalization_shifting_economics_global_manufacturing/.

- Spitz-Oener, A. (2006), « Technical change, job tasks, and rising educational demands: Looking outside the wage structure », *Journal of Labor Economics*, vol. 24, n° 2, pp. 235-270, www.jstor.org/stable/10.1086/499972.
- Stewart, I., D. Debapratim et A. Cole (2014), « Technology and people: The great job-creating machine », Deloitte, www2.deloitte.com/uk/en/pages/finance/articles/technology-and-people.html.
- Summers, L.H. (2014), « On the economic challenge of the future: Jobs », *The Wall Street Journal*, 7 juillet, www.wsj.com/articles/lawrence-h-summers-on-the-economic-challenge-of-the-future-jobs-1404762501.
- Tassey, G. (2014), « Competing in advanced manufacturing: The need for improved growth models and policies », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 28, n° 1, pp 27-48.
- Teresko, J. (2008), « Designing the next materials revolution », IndustryWeek.com, www.industryweek.com/none/designing-next-materials-revolution.
- The Economist (2015), « New materials for manufacturing », *Technology Quarterly, The Economist*, 12 mai, www.economist.com/technology-quarterly/2015-12-05/new-materials-for-manufacturing.
- The Economist (2011), « Are ATMs stealing jobs? », *The Economist*, 15 juin, www.economist.com/blogs/democracyinamerica/2011/06/technology-and-unemployment.
- Trehan, B. (2003), « Productivity shocks and the unemployment rate », *Federal Reserve Bank of San Francisco Economic Review*, pp. 13-27, www.frbsf.org/economic-research/files/article2.pdf.
- Vodafone (2015), « M2M Barometer 2015 report », Vodafone, <http://m2m-mktg.vodafone.com/barometer2015>.
- Watson, R.R. et V.R. Preedy (2016), *Genetically Modified Organisms in Food: Production, Safety, Regulation and Public Health*, Elsevier Science, Amsterdam, <http://uclibs.org/PID/277991>.
- Weilerstein, P. (2014), « NCHIA: Students as the vanguard in a geographically dispersed approach to stimulating science and technology innovation », in J. Engel (dir. pub.), *Global Clusters of Innovation: Entrepreneurial Engines of Economic Growth around the World*, pp. 359-377, Edward Elgar, Cheltenham.
- Weiss, M. et al. (2012), « A review of the environmental impacts of bio-based materials », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, pp. S169-S181.
- Winner, L. (1986), *The Whale and the Reactor: A Search for Limits in an Age of High Technology*, University of Chicago Press.
- ZEW-IKT (2015), « Industrie 4.0: Digitale (R)Evolution der Wirtschaft » [Industry 4.0 : (R)évolution numérique de l'économie], ZEW, Mannheim, http://ftp.zew.de/pub/zew-docs/div/IKTRep/IKT_Report_2015.pdf.

PARTIE I

Principales technologies émergentes

PARTIE I

Chapitre 2

Avantages et défis de la transformation numérique de la production

par

Christian Reimsbach-Kounatze

Direction de la science, de la technologie et de l'innovation, OCDE

Ce chapitre examine les incidences de l'émergence des nouvelles applications TIC – de l'analyse des données massives à l'infonuagique, en passant par l'internet des objets (IdO) –, qui ouvrent la voie à des processus productifs et organisationnels inédits, et des modèles économiques nouveaux, principalement dans les secteurs industriels. Il s'intéresse aux gains de productivité induits par l'adoption de ces nouvelles applications, non seulement dans les entreprises pionnières de certains secteurs (tels que l'automobile et l'industrie aérospatiale), mais aussi dans des secteurs traditionnels comme l'agriculture. Il envisage enfin les cadres d'action qu'il conviendrait de mettre en place pour concrétiser le potentiel de productivité et les autres avantages découlant de l'utilisation des technologies numériques dans la production, tout en limitant certains risques associés.

Les données statistiques concernant Israël sont fournies par et sous la responsabilité des autorités israéliennes compétentes. L'utilisation de ces données par l'OCDE est sans préjudice du statut des hauteurs du Golan, de Jérusalem-Est et des colonies de peuplement israéliennes en Cisjordanie aux termes du droit international.

Introduction

La transformation numérique de l'économie et de la société progresse rapidement, en particulier dans les pays développés. À tel point qu'aujourd'hui, trois habitants de la zone OCDE sur quatre ont accès au haut débit mobile sans fil, et pas moins de 95 % des entreprises sont connectées à l'internet. Les trois quarts des entreprises sont présentes sur le web, et une proportion quasi équivalente prend part au commerce électronique (OCDE, 2015a ; 2015b).

La production industrielle se transforme sous l'effet conjugué de l'interconnexion croissante des machines, des stocks et des produits grâce à l'IdO, des fonctionnalités des logiciels embarqués sur les machines, de l'analyse des volumes considérables de données numériques (les « données massives ») générées par les capteurs, et de l'accès universel à une puissance de calcul, rendu possible par l'infonuagique. Le résultat de cette transformation s'est vue qualifiée de : « Industrie 4.0 » (Jasperneite, 2012), « internet industriel » (Bruner, 2013), ou encore « fabrication en réseau » (Economist Intelligence Unit, 2014). Les nouvelles technologies numériques recèlent un potentiel économique considérable. Les estimations disponibles donnent en effet à penser que la contribution de l'IdO au produit intérieur brut (PIB) mondial pourrait représenter entre 10 000 et 15 000 milliards USD sur les 20 prochaines années (Evans et Anninziata, 2012).

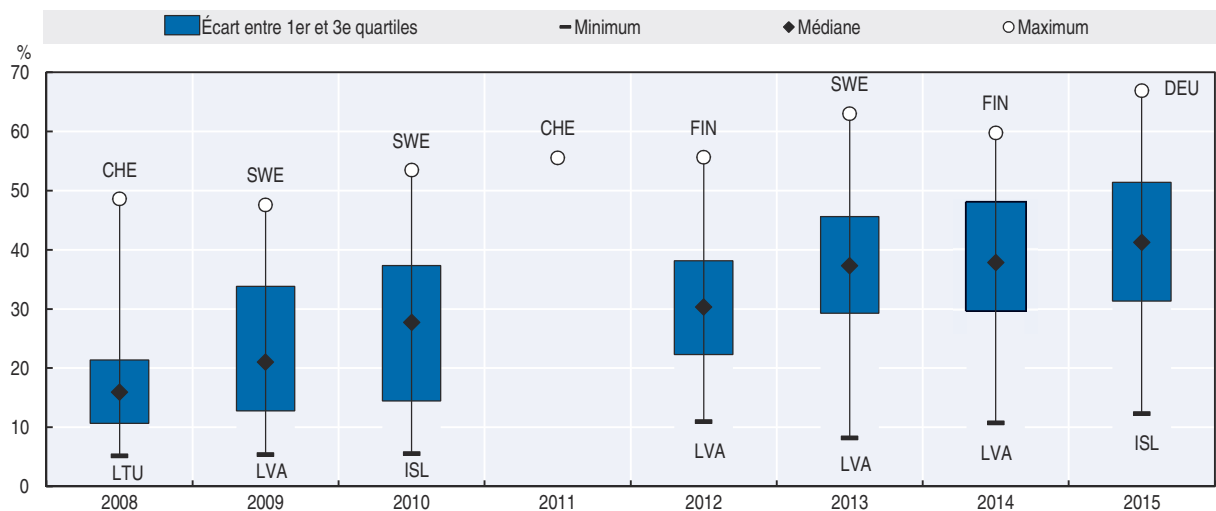
Le présent chapitre examine dans quelle mesure la conjonction des nouvelles technologies numériques – en particulier l'analyse des données massives, l'infonuagique et l'IdO – ouvre la voie à des biens et des services plus personnalisables, grâce à la mise en place de processus productifs et organisationnels inédits, et à l'émergence de modèles économiques nouveaux, principalement dans les secteurs industriels. S'appuyant en partie sur des études de cas commandées par l'OCDE, il étudie les gains de productivité induits par l'adoption de ces technologies, non seulement dans les entreprises pionnières de certains secteurs (tels que l'automobile et l'industrie aérospatiale), mais aussi dans des secteurs conventionnels comme l'agriculture. Il décrit les étapes que les entreprises traditionnelles peuvent suivre pour réussir leur transition vers les modèles économiques du numérique.

On y formule ensuite des propositions d'action en réponse aux principaux défis que pose la transformation numérique de la production industrielle, à savoir : élargir l'accès aux données et aux infrastructures et applications TIC essentielles ; améliorer l'interopérabilité et soutenir le développement de normes ; tirer parti des systèmes en place – en les améliorant, si nécessaire – afin de lever un certain nombre d'incertitudes naissantes (notamment sur les questions de responsabilité dans le cadre de l'automatisation, et de propriété dans un environnement où les actifs incorporels comme les données peuvent devenir une composante essentielle de la création de valeur) ; réduire les risques liés à la sécurité numérique et au respect de la vie privée ; et stimuler la concurrence dans les nouveaux environnements numériques. Enfin, le chapitre aborde une condition nécessaire à la réalisation des actions précitées : développer les compétences indispensables pour mener à bien la prochaine révolution de la production.

Intégrer les TIC avancées aux processus de production


Dans l'industrie manufacturière comme dans l'agriculture, les nouvelles technologies transforment la production, à mesure que les entreprises se tournent vers les TIC avancées tel que les progiciels de gestion intégrés (PGI), ou les logiciels de gestion de la chaîne logistique, pour accroître leur productivité¹. D'ailleurs, l'utilisation de ces logiciels progresse rapidement. Ainsi, en 2015, plus de 60 % des entreprises manufacturières utilisaient des progiciels de gestion intégrés aux Pays-Bas, en Finlande et en Suède. En 2009, elles n'étaient que 40 % aux Pays-Bas et en Finlande, et 50 % en Suède. Autre exemple, en Allemagne, pas moins de 70 % des acteurs du secteur manufacturier étaient équipés de PGI en 2015, contre environ 40 % en 2009 (graphique 2.1). En revanche, seuls 40 % de l'ensemble des entreprises (tous secteurs confondus) des trois premiers pays cités utilisaient ce type de logiciel en 2015 ; l'Allemagne fait figure d'exception, avec un taux s'élevant, cette année-là, à 60 %.

Graphique 2.1. **Part des entreprises manufacturières utilisant des progiciels de gestion intégrés, 2008-15**



Note : Ce graphique n'intègre pas les données pour 2011, sauf pour la Suisse. Il inclut les données pour l'Allemagne (sauf 2008), l'Autriche, la Belgique (sauf 2008-09, 2014-15), le Canada (sauf 2008-10, 2014-15), la Corée (sauf 2008-10), le Danemark (sauf 2008-09), l'Espagne (sauf 2008), l'Estonie, la Finlande (sauf 2008), la France (sauf 2008), la Grèce (sauf 2009-14), la Hongrie, l'Irlande (sauf 2008), l'Islande (sauf 2008-09), l'Italie (sauf 2008), la Lettonie (sauf 2008), la Lituanie, le Luxembourg (sauf 2008-09), la Norvège, les Pays-Bas (sauf 2008), la Pologne (sauf 2009), le Portugal (sauf 2008), la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni (sauf 2008), la Slovénie, la Suède (sauf 2008), la Suisse (sauf 2009-10, 2012-15) et la Turquie (sauf 2008-09, 2012-15).

Source : D'après OCDE (2016f), OECD.Stat (base de données), http://dotstat.oecd.org/index.aspx?DatasetCode=ICT_BUS (consulté en septembre 2016).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679621>

La révolution numérique ouvre la voie à un renforcement du contrôle de la production, une souplesse accrue en termes d'échelle et de gamme de production, et une réduction des coûts d'exploitation (voir encadré 2.1 sur l'utilisation des systèmes d'exécution de la production ou MES pour Manufacturing Execution System en anglais). Dans le secteur agricole, par exemple, les exploitants produisent des données que les entreprises comme John Deere et DuPont Pioneer peuvent exploiter grâce à de nouveaux services logiciels fondés sur les données (Noyes, 2014). Les capteurs installés sur les équipements dernier cri de John Deere permettent ainsi aux agriculteurs de gérer leur parc de véhicules et de réduire les temps d'arrêt de leurs tracteurs, ainsi que leur consommation de ressources (Big Data Startups, 2013). La transformation numérique de la production industrielle entraîne également une

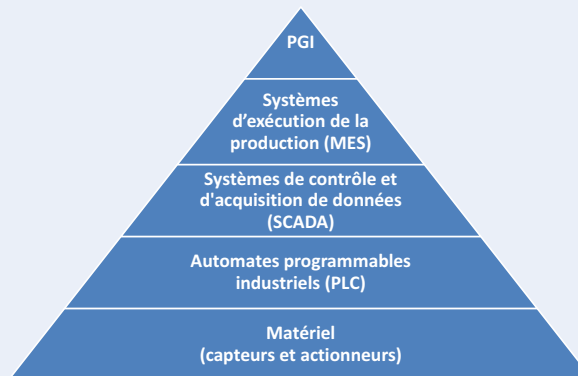
mutation de certaines industries, dont les activités s'apparentent de plus en plus à des services, une tendance qualifiée de « servicisation » (Lodefalk, 2010). Des entreprises ont d'ores et déjà pris ce virage, de Rolls-Royce à Boeing, en passant par Michelin ou John Deere, pour n'en citer que quelques-unes (voir sections suivantes).

Encadré 2.1. Le potentiel des systèmes d'exécution de la production (MES) : l'exemple de MPDV Mikrolab GmbH

La transformation numérique de la production industrielle ne manquera pas d'ajouter à la pression concurrentielle déjà considérable qui s'exerce sur les entreprises manufacturières. Ces dernières doivent aujourd'hui être capables de faire preuve de plus de réactivité et de souplesse face aux changements inattendus, de manière à optimiser l'utilisation de l'ensemble des ressources. Pour faire face à ces exigences, elles sont nombreuses à se tourner vers les TIC avancées, en premier lieu pour gérer la complexité sans cesse croissante liée à la diversification des produits et à la réduction de leur cycle de vie, et pour produire des informations fiables, si possible en temps réel, à l'appui d'une meilleure prise de décision à court et long termes.

L'intensification de la transformation numérique fait des TIC avancées, et tout particulièrement des systèmes d'exécution de la production (MES), des outils essentiels aux entreprises manufacturières. Les systèmes MES sont utilisés pour gérer les opérations en atelier, généralement en assurant l'interface entre, d'une part, les progiciels de gestion intégrés (PGI) de l'entreprise et, d'autre part, les systèmes de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) et les automates programmables industriels PLC pour Programmable Logic Controller en anglais qui équipent l'atelier (graphique 2.2). Un système d'exécution de la production prend en charge différentes fonctions, de la programmation d'un nombre restreint de machines critiques à la gestion de l'intégralité du processus de fabrication. Selon Harris (2017), « les fonctions des systèmes MES couvrent l'établissement des nomenclatures, la gestion et la programmation des ressources, la préparation et la répartition des ordres de fabrication, l'établissement des rapports sur les en-cours de fabrication et le suivi des lots de production. Les systèmes avancés intègrent également une bibliothèque de définitions de produits avec suivi des versions, et peuvent transmettre au système PGI des informations quant à l'état d'avancement de la production ».

Graphique 2.2. Pyramide des systèmes utilisés dans le cadre de l'automatisation de la production industrielle



Source : OCDE, d'après Snatkin et al. (2013), *Real time production monitoring system in SME*, <http://dx.doi.org/10.3176/eng.2013.1.06>.

Encadré 2.1. **Le potentiel des systèmes d'exécution de la production (MES) : l'exemple de MPDV Mikrolab GmbH (suite)**

Les principaux fournisseurs de systèmes d'automatisation, dont Emerson, General Electric, Honeywell, Invensys, Rockwell et Siemens, proposent des solutions MES, tout comme les grands éditeurs de progiciels de gestion intégrés, Microsoft, Oracle, Sage et SAP en tête. Ils tendent à se concentrer sur les grandes entreprises, qui constituent le cœur de leur clientèle. MPDV Mikrolab GmbH, une PME installée à Mosbach, en Allemagne, est l'un des principaux fournisseurs de solutions MES destinées aux PME. L'entreprise offre à ses quelque 930 clients répartis dans le monde entier un large éventail d'applications MES spécialisées, testées sur le terrain, commercialisées sous la marque HYDRA.

Selon MPDV, les clients équipés des solutions HYDRA ont vu le taux de rendement global (TRG) de leurs équipements progresser de plus de 15 % les deux premières années – le TRG mesure l'efficacité de l'utilisation des ressources de production.

Des travaux de recherche illustrent les avantages que les entreprises tirent de l'utilisation des systèmes d'exécution de la production. Adler et al. (1995), par exemple, ont montré qu'ils pouvaient contribuer à réduire de 10 à 30 % le temps de travail des équipes de production et des groupes d'appui, à condition toutefois de procéder à des investissements complémentaires afin de reconfigurer les processus métier. Selon Strategic Direction (2004), les systèmes MES permettent de réduire les délais totaux d'environ 30 %. Plus récemment, une étude publiée par Nasarwanji et al. (2009) a confirmé les réductions potentielles au niveau des coûts de main-d'œuvre. Pour autant, les auteurs ont montré que ces économies n'étaient réalisables que si les usines fonctionnaient à plus de 80 % de leur capacité de production.

Sources : OCDE, d'après www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/232-mpdv/beitrag-mpdv.html (consulté le 15 janvier 2017) ; Adler, D. et al. (1995), « Does a manufacturing execution system reduce the cost of production for bulk pharmaceuticals? » ; Nasarwanji, A. et al. (2009), « The impact of manufacturing execution systems on labor overheads », www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp734-737.pdf ; Strategic Direction (2004), « Meeting the manufacturing challenge: Performance advantage of MES », <http://dx.doi.org/10.1108/02580540410567265> ; Snatkin, A. et al. (2013), « Real time production monitoring system in SME », <http://dx.doi.org/10.3176/eng.2013.1.06> ; et Harris, D. (2017), « Compare manufacturing execution systems (MES): Buyer's Guide », www.softwareadvice.com/manufacturing/execution-systems-comparison/.

L'internet des objets (IdO) permet aujourd'hui aux entreprises manufacturières d'assurer un meilleur suivi de l'utilisation de leurs produits et, ainsi, de proposer des services personnalisés, facturés sur la base des données d'utilisation transmises en temps réel. Dès les années 80, Rolls-Royce a montré la voie en renonçant à vendre ses moteurs à réaction seuls, pour proposer une offre de services à coût fixe sur une durée déterminée, dénommée *Power by the Hour* (OCDE, 2016b)². Désormais, les données servent également à surveiller et analyser l'efficacité des produits et, à ce titre, sont de plus en plus souvent commercialisées dans le cadre de nouvelles offres de services proposées aux fournisseurs et aux clients, existants ou prospects. L'entreprise Schmitz Cargobull, premier fabricant mondial de cabines et de remorques de camions dont le siège se trouve en Allemagne, utilise en outre l'IdO pour assurer le suivi de la maintenance, des conditions de déplacement et des itinéraires de l'ensemble de ses véhicules (Chick, Netessine et Huchzermeier, 2014), ce qui permet de minimiser les pannes que pourraient subir ses clients. Autre exemple, les fabricants d'équipements de production d'énergie ont de plus en plus recours aux données des capteurs pour aider leurs clients à optimiser la gestion des impondérables dans le cadre des activités de planification de projets complexes (Chick, Netessine et Huchzermeier, 2014).

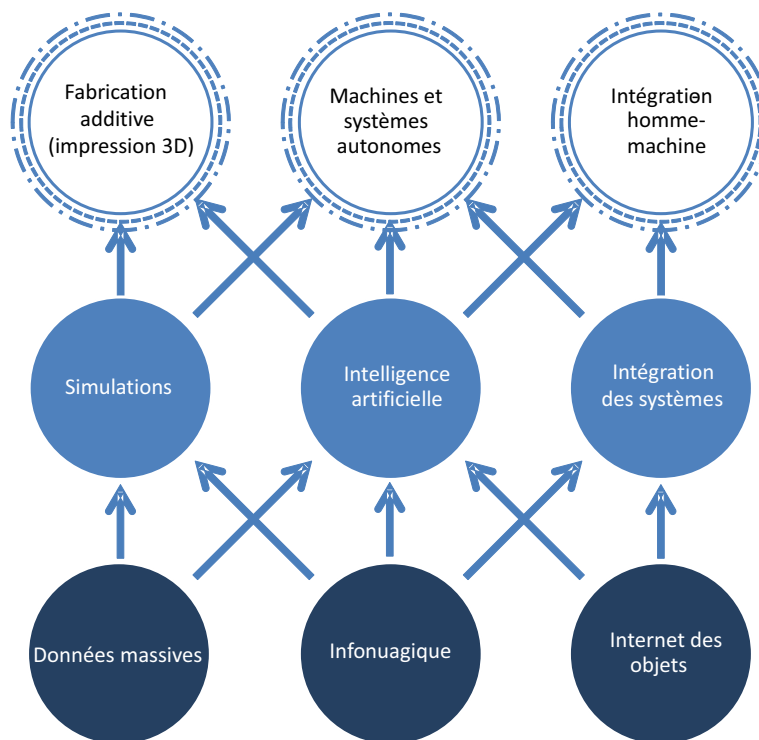
On dispose à ce jour de peu d'éléments quantitatifs sur les retombées économiques de la transformation numérique sur l'industrie. Toutefois, des estimations publiées au Japon

donnent à penser que l'utilisation des données massives et de l'analytique par certains départements des entreprises manufacturières japonaises pourrait donner lieu à une réduction des coûts de maintenance de près de 5 000 milliards JPY (ce qui représente plus de 15 % des ventes réalisées en 2010). À cela s'ajouteraient plus de 50 milliards JPY d'économies sur les factures d'électricité (MIC, 2013). Des estimations disponibles pour l'Allemagne indiquent par ailleurs que l'utilisation des TIC avancées dans l'industrie pourrait faire progresser la productivité de 5 % à 8 %. Les fabricants de composants industriels et constructeurs automobiles devraient enregistrer les gains de productivité les plus élevés (Rüssmann et al., 2015). D'autres estimations laissent entendre que l'« industrie 4.0 » pourrait être une source de valeur ajoutée dans les secteurs allemands de la mécanique, des équipements électriques, de l'automobile, des produits chimiques, de l'agriculture et des TIC ; cette création de valeur pourrait atteindre 78 milliards EUR supplémentaires (soit une progression de 15 %) d'ici à 2025 (BITKOM et Fraunhofer, 2014)³.

La convergence des technologies numériques impulse la transformation de la production industrielle

Deux tendances majeures expliquent les bouleversements de la production industrielle induits par les technologies numériques : la baisse des coûts y afférents, qui en favorise la diffusion, y compris au sein des PME ; et, surtout, la combinaison de ces technologies, qui ouvre la voie à de nouveaux types d'applications. Le graphique 2.3 illustre les principales TIC à l'œuvre dans la transformation numérique de la production industrielle⁴. Les technologies de la partie inférieure du graphique 2.3 sous-tendent celles de la partie supérieure, comme le montrent les flèches. Les technologies de la partie supérieure du schéma (en blanc), à

Graphique 2.3. **Convergence des technologies clés qui sous-tendent la transformation numérique de la production industrielle**



savoir la fabrication additive (dont l'impression 3D), les machines et systèmes autonomes, et l'intégration homme-machine, sont les applications qui devraient donner lieu aux principaux gains de productivité industrielle. Utilisées conjointement, ces technologies pourraient conduire à la mise en place, à terme, de processus entièrement automatisés, de la conception à la livraison (encadré 2.2). Les technologies figurant dans le graphique 2.3 et leurs applications sont présentées dans les paragraphes suivants.

Encadré 2.2. Quel processus de fabrication en 2025 ?

À court terme, pourquoi pas dès 2025, la fabrication pourrait être appelée à devenir une activité presque entièrement automatisée. Au vu des capacités actuelles, le scénario hypothétique suivant pourrait être envisageable.

Un groupe de concepteurs crée un nouveau produit. Il présente les prototypes fabriqués à l'aide d'une imprimante 3D à des acheteurs potentiels, ce qui débouche sur la signature d'un contrat avec un revendeur étranger. Les informations de conception et de conditionnement, ainsi que la liste des composants, sont publiées sur une place de marché en ligne, où les fabricants entrent en concurrence pour se voir confier la fabrication des pièces et l'assemblage du dispositif. L'un des fabricants remporte le contrat d'assemblage du produit. Il utilise alors des outils de CAO fondés sur l'infonuagique pour simuler la conception et la fabrication du dispositif. Des algorithmes d'apprentissage automatique testent différentes combinaisons de robots et d'outils afin de déterminer la solution d'assemblage la plus efficace. Certains composants, comme les systèmes sur puce et les capteurs, peuvent être obtenus auprès de fabricants existants. D'autres peuvent devoir être créés spécialement. Des robots produisent en masse les composants.

L'ensemble des composants et les données associées sont ensuite envoyés à l'unité d'assemblage. Sur la chaîne de montage, les robots s'équipent et se réorganisent. Les véhicules robotisés transportent les composants vers le poste robotique adéquat de l'atelier, puis les robots commencent à assembler les produits. À chaque fois qu'un produit est assemblé par les robots, les algorithmes d'apprentissage automatique, qui s'exécutent dans le nuage, analysent les données et les comparent aux simulations, puis relancent les simulations, et déterminent si le processus correspond toujours aux paramètres et s'il peut être optimisé. Un robot procède à la mise en carton du produit fini ; un autre charge le carton dans un camion autonome, qui le livre au revendeur.

Chez le commerçant, un robot procède au déchargement, puis place le produit dans l'entrepôt, à l'emplacement de stockage qui convient. Lorsqu'un client commande le produit, un robot de plus petite taille le livre à son domicile. Si le produit rencontre un succès commercial supérieur aux attentes et que les commandes augmentent partout dans le monde, les concepteurs peuvent être amenés à accroître les capacités de production. Ils font donc de nouveau appel au marché ; les fabricants installés dans les régions où le produit a été commandé entrent alors en concurrence pour fabriquer des lots de produits plus ou moins volumineux. Les résultats des algorithmes d'apprentissage automatique précédemment utilisés sont communiqués aux usines qui remportent le marché dans les diverses régions du monde, où différents robots déterminent comment fabriquer le produit. Lorsqu'une usine a produit la quantité commandée, ses robots adaptent leurs outils et se réorganisent pour fabriquer un autre produit. Du moment où le produit a été conçu, jusqu'à sa livraison chez le client, aucun employé n'est intervenu dans sa fabrication. Des personnes ont certes supervisé le processus. En revanche, aucune intervention humaine n'a été nécessaire ni pour le moulage des matières plastiques, ni pour l'assemblage, ni pour la logistique.

L'analyse des données massives transforme tous les secteurs de l'économie, y compris les plus traditionnels

L'expression « données massives » désigne les données caractérisées par leur volume, la vitesse à laquelle elles sont générées, mises à disposition, traitées et analysées, et leur variété (données structurées et non structurées). Ces trois caractéristiques (dites les « 3 V ») sont en constante évolution, dans la mesure où elles décrivent des propriétés techniques qui progressent au rythme des avancées en matière de stockage et de traitement des données. D'aucuns ont proposé d'ajouter un quatrième V, pour « valeur », reflet de la valeur socioéconomique croissante des données (OCDE, 2013).

L'utilisation des données massives ouvre la voie à des améliorations notables des produits, des processus, des méthodes organisationnelles et des marchés, un phénomène dénommé « innovation fondée sur les données » (OCDE, 2015b). Dans l'industrie manufacturière, les données obtenues par le biais des capteurs servent à surveiller et analyser l'efficacité des machines, afin d'en optimiser le fonctionnement et de proposer des services après-vente, comme la maintenance préventive. Les données peuvent également être utilisées dans le cadre des échanges avec les fournisseurs, voire, dans certains cas, commercialisées en tant que nouveaux services (pour optimiser le contrôle de la production, par exemple). Dans l'agriculture, l'utilisation de cartes géocodées des exploitations et la surveillance en temps réel de chaque activité agricole, de l'ensemencement à la récolte, sont autant d'usages qui contribuent à accroître la productivité. Les données générées par les capteurs peuvent ensuite être réutilisées et liées aux données historiques et à des données en temps réel sur les conditions météorologiques, l'état du sol, l'usage ou non d'engrais et les caractéristiques des cultures, afin d'optimiser la production agricole et d'établir des prévisions. Les méthodes de culture traditionnelles peuvent ainsi être améliorées, et le savoir-faire des agriculteurs expérimentés, formalisé et diffusé à grande échelle.

Si l'on dispose de peu de données macroéconomiques probantes sur les effets de l'innovation fondée sur les données, les études menées au niveau des entreprises révèlent que les organisations qui y ont recours enregistrent une croissance de la productivité du travail 5 % à 10 % plus rapide que celles qui ne le font pas (OCDE, 2015b). Aux États-Unis, Brynjolfsson, Hitt et Kim, 2011 estime que la production et la productivité des entreprises qui s'appuient sur un processus de prise de décision étayé par des données sont 5 % à 6 % plus élevées qu'attendu, compte tenu des autres investissements dans les TIC réalisés par ces entreprises et de l'usage qu'elles en font. Elles obtiennent également de meilleurs résultats en termes d'utilisation des actifs, de rendement des capitaux propres et de valeur de marché. Une étude menée au Royaume-Uni sur 500 sociétés a révélé que les entreprises qui se trouvent dans le premier quartile de l'utilisation des données en ligne ont une productivité supérieure de 13 % à celle des entreprises du dernier quartile (Bakhshi, Bravo-Biosca et Mateos-Garcia, 2014). Par ailleurs, une hausse de 10 % de la qualité et de l'accessibilité des données – en les présentant de manière plus concise et cohérente sur les différentes plateformes, et en les rendant plus faciles à manipuler – se traduirait par une progression moyenne de la productivité du travail de 14 %, avec toutefois de fortes variations intersectorielles (Barua, Mani et Mukherjee, 2013)⁵. Toutefois, les données massives restent utilisées majoritairement dans le secteur des TIC, en particulier par les prestataires de services internet. Selon Tambe (2014), par exemple, seuls 30 % des investissements dans la technologie Hadoop proviennent de secteurs autres que les TIC, comme la finance, les transports, les services aux collectivités, le commerce de détail, la santé, les laboratoires pharmaceutiques et la biotechnologie. Pour autant, l'industrie

manufacturière tend à consommer des volumes croissants de données (voir McKinsey Global Institute, 2011).

Dans le secteur agricole, l'utilisation des données et de leur analyse (dans le cadre de l'agriculture de précision) ouvre la voie à des gains de productivité grâce à l'optimisation de l'exploitation des ressources agricoles – avec, notamment, une réduction des quantités de semences, d'engrais et d'eau d'irrigation, sans compter les gains de temps pour les agriculteurs (encadré 2.3). Selon le type d'économies considéré, les estimations des effets sur la productivité varient. Par exemple, l'une des estimations révèle que dans le cas de la culture du maïs aux États-Unis, l'agriculture de précision pourrait améliorer les rendements de 5 à 10 boisseaux par acre, soit un gain d'environ 100 USD par acre – à une époque où le revenu brut diminué des coûts non fonciers s'élevait à quelque 350 USD par acre – (Noyes, 2014). En extrapolant, on peut estimer qu'aux États-Unis, les avantages économiques induits par l'agriculture de précision pourraient avoisiner 12 milliards USD par an. Soit environ 7 % de la valeur ajoutée totale (de 177 milliards USD) apportée par l'agriculture au PIB des États-Unis⁶. Si l'on exclut les gains en termes de temps de travail des agriculteurs, les bénéfices par acre liés à l'agriculture de précision devraient s'avérer plus modestes. Schimmelpfennig et Ebel (2016), par exemple, les évaluent à 14,50 USD par acre. Craig Smith, de l'Université Fort Hays de l'État du Kansas, a réalisé une étude similaire, axée sur les mêmes sources de gains d'efficacité issus de l'agriculture de précision pour des exploitations agricoles de différentes tailles⁷. Ces travaux ont porté sur le contrôle automatique des rangées et sections qui, aux fins de l'agriculture de précision, consiste à utiliser un système GPS pour éviter d'apporter tout intrant de culture superflu, comme des engrais et autres produits phytosanitaires (John Deere, 2015). Les économies réalisées par les agriculteurs exploitant les champs de maïs, comparables aux exploitations où sont cultivées des plantes en larges rangs, s'échelonnaient entre 1 et 15 USD par acre.

Encadré 2.3. **Agriculture de précision et données massives : l'exemple de la société John Deere**

L'agriculture de précision fournit aux agriculteurs des analyses en temps quasiment réel de données clés sur leurs exploitations. L'entreprise John Deere a fait ses premiers pas dans ce secteur avec des outils de cartographie des rendements et de modulation simple des intrants, puis une technologie de guidage automatique (AutoTrac¹). Ces premiers produits ont par la suite été perfectionnés, avec la création de véhicules agricoles automatisés, capables de communiquer entre eux. Dès l'origine, les solutions John Deere se sont appuyées sur les données de localisation GPS. L'entreprise a ensuite mis au point ses premières fonctions de « raccordement » afin de connecter les machines agricoles entre elles et avec le Centre opérationnel MyJohnDeere (MJD), qu'elle décrit comme « un ensemble d'outils en ligne fournissant des informations sur une exploitation agricole, à l'endroit et au moment où les agriculteurs en ont besoin » (Arthur, 2016).

En appui aux véhicules utilisés dans les champs, John Deere a mis au point une solution de gestion à distance sans fil des équipements agricoles. Cette solution tire parti des réseaux de communications satellitaires et cellulaires interconnectés, d'un système radio propriétaire et du Wi-Fi. Elle a contribué à réduire le temps nécessaire pour récolter les cultures ou mener à bien d'autres tâches. Par exemple, l'utilisation d'au moins deux véhicules autopropulsés programmables permet de couvrir une superficie allant de 500 à 600 acres par jour (qu'il s'agisse de planter ou de récolter), contre généralement 100 à 150 acres pour un agriculteur travaillant seul. Parmi les améliorations apportées par John Deere dans le domaine de

Encadré 2.3. Agriculture de précision et données massives : l'exemple de la société John Deere (suite)

l'ensemencement, citons notamment le semoir Exact Emerge et le système AutoTrac, qui ont contribué à étendre les surfaces susceptibles d'être ensemencées dans des conditions optimales. Grâce au système perfectionné d'ensemencement et de suivi, la superficie couverte a ainsi pu passer de 600 à plus de 800 acres par jour. Pour ce qui est des opérations de récolte, elles s'avèreraient elles aussi beaucoup plus efficaces si les véhicules étaient équipés du système AutoTrac.

Grâce à l'association de capteurs et de systèmes GPS, les tracteurs John Deere sont non seulement autonomes, mais ils utilisent également des systèmes analytiques qui leur permettent d'effectuer les opérations d'ensemencement, d'irrigation et de récolte avec une précision de deux centimètres. En outre, ces systèmes sont capables de communiquer entre eux. Selon les estimations de John Deere, l'entreprise compte plus de 100 000 machines connectées dans le monde. Les cabines des tracteurs disposent d'une liaison Wi-Fi permettant de communiquer avec les dispositifs mobiles et autres systèmes de capteurs embarqués ; à cela s'ajoutent des radios pour les communications mobiles avec les autres véhicules. Les agriculteurs peuvent ainsi synchroniser leurs opérations et partager des données avec d'autres exploitants.

Grâce à l'utilisation des dispositifs interconnectés et des capteurs intelligents au sein de ce réseau de communications, John Deere est parvenu à combiner les données de base et les données de performance de ses machines avec des données de terrain géoréférencées, pour une meilleure analyse. Une fois ces données capturées par les systèmes et transmises au Centre opérationnel, elles alimentent une base plus vaste intégrant également des informations environnementales. John Deere peut combiner les informations transmises par les agriculteurs et des données sur les conditions environnementales (données météorologiques, climatiques, sur la qualité des sols, etc.), ainsi que sur les rendements réels. Les agriculteurs sont alors en mesure d'identifier les parcelles qui sont plus productives. Les fonctions d'analyse des données leur permettent d'optimiser les rendements de leurs cultures. De fait, « les agriculteurs peuvent utiliser les données pour décider de ce que chaque équipement va semer, fertiliser, irriguer et récolter et où il va le faire... et ce, pour des parcelles même réduites, à partir d'un mètre sur trois » (Jahangir Mohammed, 2014).

En 2011, John Deere a consolidé sa stratégie à long terme pour mettre l'accent sur les produits intégrés fondés sur les données. Autre objectif : porter les investissements dans la recherche et le développement (R-D) à 5,5 % du chiffre d'affaires net, alors que ses concurrents y consacrent 4 à 5 %. Cette priorité à l'innovation a permis à John Deere de maintenir à 5 % le taux de croissance annuel composé de la productivité des employés (chiffre d'affaires par employé) enregistré sur les 30 dernières années (Deere & Company, 2016). Pour étoffer ses capacités dans ce domaine, John Deere a racheté plusieurs entreprises pionnières de l'agriculture de précision, à l'instar de Precision Planting (Agweb, 2015), une entreprise leader des technologies d'ensemencement qui fournit également du matériel et des capteurs, et de Monosem, un fabricant de semoirs basé en France. John Deere recrute en outre des « scientifiques des données » (data scientist en anglais) pour renforcer ses capacités d'analyse des données massives. Ces professionnels assurent les missions suivantes :

- Identifier les données, les sources et les applications pertinentes.
- Utiliser des techniques d'exploration des données massives comme la détection de tendance, l'analyse de graphiques et les analyses statistiques, afin de « les faire parler ».

Encadré 2.3. Agriculture de précision et données massives : l'exemple de la société John Deere (suite)

- Mettre en œuvre des processus de collecte et développer l'infrastructure et les environnements à l'appui des analyses.
- Utiliser des langages de programmation parallèle pour mettre en œuvre les applications.

Les perspectives de croissance du marché sont particulièrement prometteuses pour John Deere et les entreprises proposant aux agriculteurs des véhicules autopropulsés et des systèmes d'agriculture de précision. Selon les prévisions, le marché mondial de l'agriculture de précision devrait croître de 4.92 milliards USD d'ici à 2020. Ce qui représente un taux de croissance annuel composé (TCAC) de près de 12 % entre 2015 et 2020. À l'heure actuelle, le marché mondial de l'agriculture de précision s'élève à 2.8 milliards USD (Mordor Intelligence, 2016). Le marché américain représente à lui seul entre 1 et 1.2 milliard USD de ventes par an. Si l'on se base sur les estimations pour les exploitations de plantes cultivées en larges rangs, de maïs et de soja, où les deux tiers des surfaces cultivées s'appuient sur l'agriculture de précision, on peut raisonnablement penser que les ventes de John Deere dans ce domaine représentent environ un quart du marché des États-Unis, soit entre 250 et 350 millions USD².

1. Le système AutoTrac Vision fait appel à une caméra montée sur le châssis avant, qui permet de voir, en début de saison, les récoltes de maïs, de soja et de coton d'une hauteur d'au moins 10 à 15 cm. Ce système permet d'éviter d'endommager les récoltes avec les roues des pulvérisateurs, même en cas de mauvais alignement (John Deere, 2017).
2. Selon une prévision de marché, celui-ci couvrirait diverses technologies intégrées (systèmes de guidage, télédétection et modulation des intrants, en particulier). Les principales technologies seraient les systèmes de guidage avec GPS, systèmes d'information géographique (SIG), systèmes de géolocalisation et navigation par satellite (GNSS), etc. D'après cette prévision de marché, plusieurs systèmes de suivi et de cartographie devraient gagner en importance, et la croissance des applications logicielles de gestion des cultures et des exploitations, et de suivi météorologique devrait s'accélérer pendant la période considérée (voir Mordor Intelligence, 2016).

L'infonuagique renforce la souplesse, l'évolutivité et l'interopérabilité des entreprises

L'infonuagique est une solution souple permettant d'accéder, à la demande, aux ressources informatiques, tout en minimisant les efforts de gestion (OCDE, 2014a)⁸. De nombreuses applications industrielles à fort potentiel, telles que les machines et systèmes autonomes et la simulation complexe, nécessitent une puissance de calcul particulièrement élevée que seuls des superordinateurs peuvent offrir. L'infonuagique a joué un rôle majeur dans l'amélioration de la disponibilité, l'augmentation de la capacité et la réduction des coûts de ressources informatiques hautement évolutives, en particulier pour les start-ups et les PME. De fait, les services infonuagiques peuvent être facilement redimensionnés en fonction des besoins, utilisés à la demande et facturés selon le nombre d'utilisateurs ou la capacité exploitée. Ils peuvent être proposés sous forme de logiciels (on parle alors de logiciels en tant que services, ou SaaS), ou étendus à des plateformes (plateformes en tant que services, ou PaaS) ou des infrastructures (infrastructures en tant que services, IaaS), et peuvent être déployés à l'échelle d'un environnement privé (pour une utilisation exclusive), public (ouvert au public), ou hybride (un mélange des deux formules). Les entreprises se tournent avant tout vers l'infonuagique pour renforcer leur flexibilité et réduire le coût de leurs investissements TIC. Une étude réalisée par l'éditeur de technologies infonuagiques VMware (2011) révèle que pour 57 % des répondants, les principales raisons qui ont motivé leur choix de l'infonuagique ont trait à l'accélération de l'exécution des projets et l'amélioration de l'expérience des clients ; viennent ensuite la capacité à saisir rapidement

les opportunités commerciales (56 %) et les perspectives de réduction des coûts (55 %). Toutefois, dans certains pays, tels que l’Autriche, l’Islande, la Norvège et les Pays-Bas, la grande majorité des entreprises continuent de penser que les avantages liés à la réduction des coûts des TIC sont imperceptibles ou limités (OCDE, 2015a).

Par ailleurs, l’omniprésence de l’infonuagique en fait une plateforme idéale pour le partage de données entre différents sites et au-delà des frontières des entreprises, ce qui permet une intégration des systèmes à la fois au sein des organisations (intégration verticale) et entre elles (intégration horizontale). À l’heure actuelle, de nombreuses entreprises rivalisent pour combiner au mieux leurs biens et services. Cette tendance illustre non seulement l’importance croissante de l’IdO en tant que plateforme d’intégration des objets physiques et de l’internet (voir section suivante), mais aussi le rôle de l’infonuagique comme plateforme d’intégration des services. Par exemple, une entreprise comme Boeing ne pourrait pas proposer la plupart de ses services actuels sans une plateforme capable d’intégrer les données collectées à partir de ses avions (encadré 2.4). Pas plus qu’elle ne pourrait rivaliser avec les poids lourds de son secteur, comme Airbus, qui déploie des efforts comparables pour étendre sa capacité à surveiller ses appareils, notamment l’Airbus A380-1000 (Marr, 2015).

Encadré 2.4. **Intégration des systèmes via l’infonuagique : l’exemple de Boeing**

Les avionneurs comme Boeing et Airbus sont aujourd’hui confrontés à des défis de taille, les appareils commerciaux modernes devenant peu à peu des « engins volants intelligents bourrés d’électronique ». Ils doivent donc être capables à la fois d’évaluer et de gérer des systèmes embarqués à bord des avions, de gérer les commandes électroniques et de surveiller les caractéristiques physiques comme les volets hypersustentateurs, le tout en temps réel. En outre, ils doivent fournir les informations de support et de maintenance aux compagnies aériennes qui volent sur leurs avions, afin de faciliter les réparations et de minimiser les temps au sol. Pour relever ces défis, les avionneurs intègrent leurs propres données historiques – sur les performances et la maintenance des avions –, à celles générées par les appareils et aux informations sur les produits transmises par les fournisseurs, au sein de bases de données, ce qui permet la prise en charge d’un large éventail de services : livraison de pièces en fonction des besoins (services matériels) ; optimisation des performances et de l’exploitation de la flotte (en examinant comment des flottes entières d’avions opérés par différentes compagnies aériennes sont gérées et exploitées)¹ ; mise à disposition des informations de vol fondées sur des données de vol en temps réel ; et prise en charge de services d’information apportant des éclairages sur la gestion de chacun de ces services.

Boeing commence alors à proposer des produits alliant un bien physique (un avion) et des services numériques (fondés sur les données). Le choix d’ajouter une gamme de services nouveaux à ses produits sert un objectif plus large : être capable de gérer et de contrôler ses systèmes de production et de prestation de services. Trois changements illustrent les efforts déployés récemment par Boeing. Premièrement, l’avionneur a conjugué l’analyse des données massives et l’IdO pour gérer et évaluer son réseau de fournisseurs². Deuxièmement, il a déployé dans son usine un système composé de robots et de logiciels intelligents interconnectés (voir Boeing, 2013a ; et Airbus Group, 2016). Ce système interconnecté complexe nécessite de nouvelles compétences de gestion et sert de lien avec les systèmes d’information des fournisseurs de Boeing. Troisièmement, Boeing a mis au point un logiciel de gestion et d’analyse des nombreux systèmes embarqués à bord de ses avions.

Encadré 2.4. **Intégration des systèmes via l'infonuagique : l'exemple de Boeing (suite)**

Grâce à ces changements, l'avionneur est en mesure de réaliser des analyses en quasi temps réel des informations enregistrées par les capteurs, transmises depuis les avions en vol. Ces analyses permettent de concevoir de nouveaux services à proposer à ses clients. Elles s'inscrivent dans le cadre de la stratégie mise en place par Boeing pour étoffer son offre d'avions avec des services à la clientèle. Pour son dernier modèle, le Boeing 787, « 146 000 points de données sont surveillés en permanence par les systèmes embarqués ; les données sont automatiquement transmises au sol » (Boeing, 2013b).

Les trois évolutions précitées ont nécessité la mise en place d'une infrastructure numérique à l'appui de l'échange et de l'analyse des données. Pour ce faire, l'avionneur a créé une « plateforme » de services baptisée *Boeing Edge*, que les compagnies aériennes volant avec des Boeing peuvent utiliser pour accéder à des informations sur les services décrits plus haut.

À cela s'ajoute le système infonuagique *Digital Aviation Platform*, une plateforme en tant que service (Paas) qui permet aux développeurs d'applications de créer des logiciels à l'aide des composants qui y sont hébergés. L'interconnexion entre les systèmes d'appui des compagnies aériennes et la plateforme *Digital Aviation Platform* se fait par le biais d'API. Ces systèmes d'appui intègrent les plannings, la facturation ou les règlements, les autorisations, la tenue à jour des enregistrements, la conformité réglementaire, la comptabilité et les services informatiques. Ils gèrent généralement les informations sur la maintenance des avions, les passagers et les vols (Crabbe, 2013).

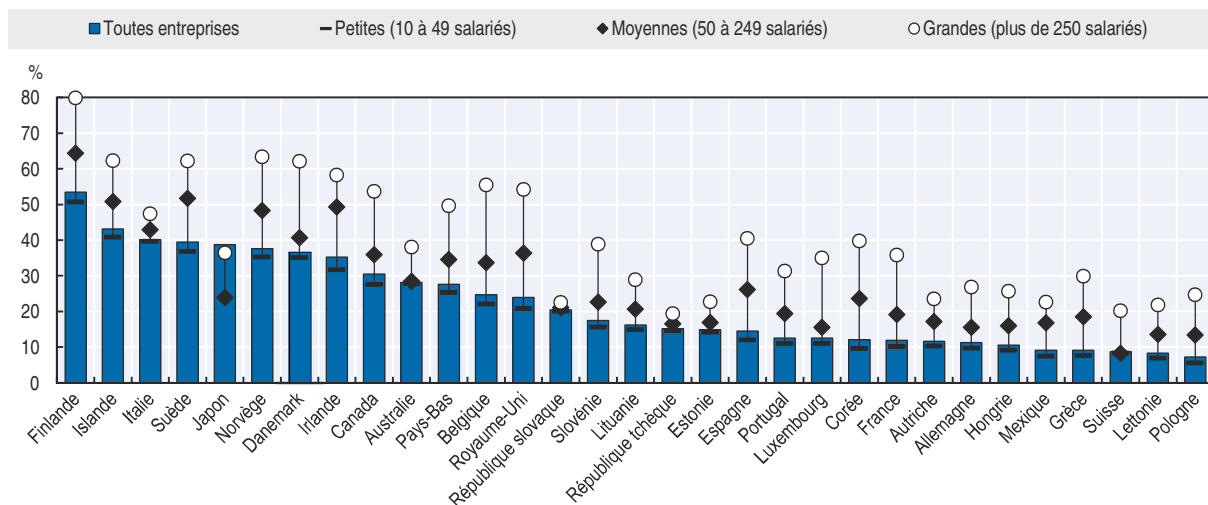
Boeing a également créé une infrastructure de base de données en tant que service, qui s'appuie sur les services infonuagiques *Amazon Web Services*. Elle intègre plus de 20 000 bases de données décrivant les pièces qui composent les avions, ainsi que les instructions à suivre pour leur remplacement. Les compagnies aériennes peuvent accéder à ces bases par le biais d'une connexion sécurisée.

Par ailleurs, Boeing met actuellement au point un *Center for Applied Simulation and Analytics (CASA)*, afin de créer et de développer des technologies de simulation et d'analyse pour évaluer la conception et les performances potentielles des nouveaux modèles ainsi que des avions en circulation.

Grâce au renforcement de sa capacité à gérer et contrôler ses systèmes, Boeing exerce un pouvoir accru sur ses fournisseurs. En 2015, par exemple, l'avionneur a influé sur des opérations de fusion « en usant de sa position pour approuver le transfert des contrats d'un fournisseur à l'autre... En s'appuyant sur ces « clauses de cessibilité », qui donnent à Boeing le droit de refuser le transfert des contrats existants à une nouvelle entreprise », l'avionneur peut « s'opposer à ces transferts ; il exerce donc *de facto* un droit de veto sur les transactions » (Scott, 2015). L'intégration des données sur les pièces fabriquées par les fournisseurs aux systèmes analytiques de Boeing confère à l'avionneur une influence encore plus importante sur la base de fournisseurs de moteurs et de pièces. De fait, le recours à l'analyse des données donne à Boeing une visibilité accrue sur les activités de ses fournisseurs. Cette asymétrie croissante de l'information s'accompagne d'un déplacement du pouvoir des fournisseurs vers l'avionneur.


1. Si les compagnies aériennes en avaient fait une priorité, l'accès de Boeing à un large éventail d'informations sur les performances et la gestion des avions via l'IdO lui a permis de jouer un rôle majeur dans l'interprétation des données en temps réel et des performances des appareils. Son rôle économique vis-à-vis du secteur aérien s'en trouve modifié.
2. Boeing a mis en place une chaîne logistique plus élaborée pour son modèle 787, mais, suite à des problèmes avec ses fournisseurs, a investi à fonds perdus des milliards de dollars dans des travaux sur des avions innovants (voir Denning, 2013).

Graphique 2.4. Part des entreprises utilisant les services infonuagiques dans chaque classe d'effectif, en 2014



Note : Les données pour la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la Finlande, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, la Lettonie, la Lituanie, la Norvège, la Pologne, la République slovaque et la Slovénie se rapportent à 2014. Celles pour le Canada et le Mexique concernent 2012. Les données pour le Canada portent uniquement sur l'utilisation des logiciels-services (SaaS), soit une sous-catégorie des services infonuagiques.

Source : D'après OCDE (2017b), OECD.Stat (base de données), http://dotstat.oecd.org/index.aspx?DatasetCode=ICT_BUS (consulté en mars 2017).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679640>

Au sein de nombreuses organisations, des silos demeurent, empêchant le partage des données et créant par là même des frictions (interorganisationnelles) au sein des chaînes de valeur. Selon une enquête menée par The Economist Intelligence Unit (2012), près de 60 % des entreprises considèrent les silos organisationnels comme le principal obstacle à l'utilisation des données massives à l'appui d'une prise de décision efficace. Les dirigeants des entreprises dont le chiffre d'affaires annuel dépasse 10 milliards USD sont plus nombreux à citer le cloisonnement des données comme un problème que ceux des entreprises dont le chiffre d'affaires est inférieur à 500 millions USD (72 % contre 43 %, respectivement).

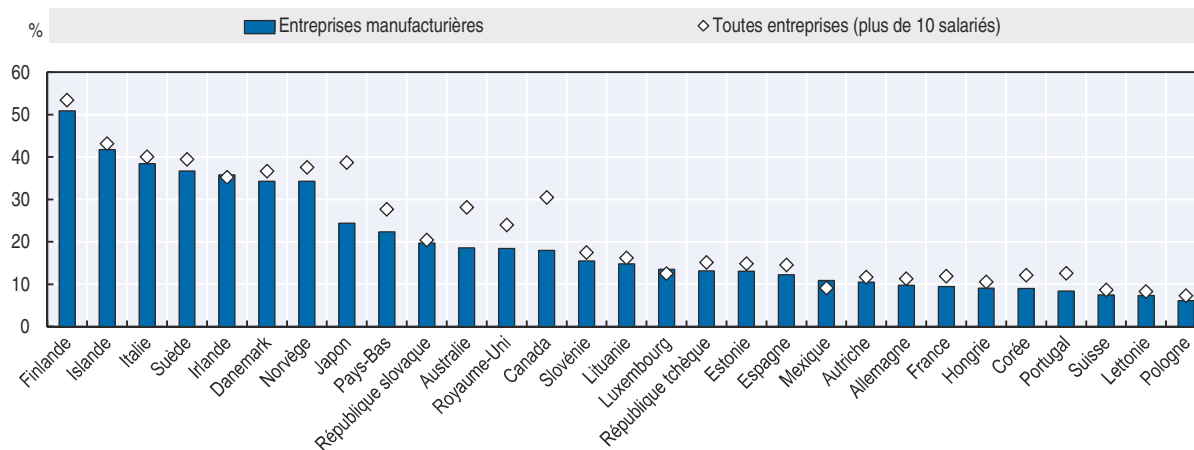
L'infonuagique peut aider les organisations à mettre fin aux silos et favoriser la cohésion et l'automatisation, les données étant stockées et mises à disposition dans un référentiel commun situé « dans le nuage » (Rüssmann et al., 2015). Les services infonuagiques doivent être interopérables, grâce, par exemple, à des interfaces de programmation (API) accessibles. Pour autant, l'absence de normes adaptées et l'enfermement propriétaire pratiqué par certains éditeurs de solutions peuvent compromettre l'interopérabilité de ces services. D'ailleurs, ces deux phénomènes sont les freins à l'adoption de l'infonuagique les plus fréquemment cités, en dehors des questions de protection de la vie privée et de sécurité (OCDE, 2015a, chapitre 3).

On note toutefois de fortes disparités dans l'adoption de l'infonuagique selon les pays et la taille des entreprises. Dans des pays comme la Finlande, Israël, l'Italie, la Suède et le Danemark, près de la moitié des entreprises ont d'ores et déjà recours aux services infonuagiques, une proportion très supérieure aux taux constatés dans la plupart des autres pays (graphique 2.4). Même constat lorsque l'on observe les taux d'adoption selon la taille des entreprises, les grandes structures (de plus de 250 salariés) étant davantage susceptibles de se tourner vers l'infonuagique. Au Royaume-Uni, par exemple, 21 % des petites entreprises (de 10 à 49 salariés) ont recours à ce type de services, contre 54 % des

entreprises de plus grande taille. Dans certains pays, on constate en outre des disparités marquées entre les taux d'adoption constatés dans le secteur manufacturier et ceux enregistrés dans le reste de l'économie (graphique 2.5).

Graphique 2.5. **Part des entreprises manufacturières utilisant des services infonuagiques, par pays, 2015**

En pourcentage



Note : Les données pour l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, l'Estonie, la France, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, les Pays-Bas, le Portugal, la République tchèque, le Royaume-Uni et la Suède se rapportent à 2014. Celles pour la Corée concernent 2013. Pour le Canada, le Japon et le Mexique, elles correspondent à 2012, et pour la Suisse, à 2011. Les données afférentes au Canada portent sur l'utilisation de logiciels-services (SaaS), soit une sous-catégorie des services infonuagiques.

Source : OCDE (2016f), OECD.Stat (base de données), http://dotstat.oecd.org/index.aspx?DatasetCode=ICT_BUS (consulté en septembre 2016).

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933679659>

L'IdO change la donne

L'internet des objets (IdO) désigne le fait de connecter des appareils et des objets au réseau de réseaux (publics et privés) qu'est l'internet. Parmi les objets interconnectés figurent notamment les capteurs et les dispositifs de commande qui, conjugués à l'analyse des données massives et à l'infonuagique, permettent de faire fonctionner machines autonomes et systèmes intelligents.

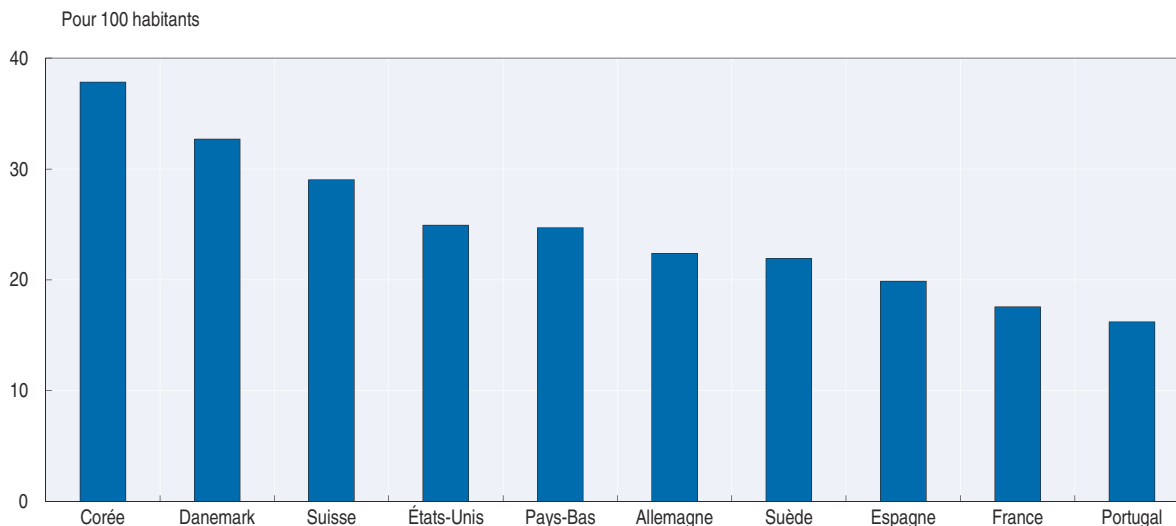
Il est difficile d'évaluer le nombre d'appareils IdO connectés à l'internet, les pays commençant à peine à collecter des données en la matière. Toutefois, une source (Shodan, premier moteur de recherche au monde dédié aux appareils connectés à l'internet) recense 363 millions de terminaux en ligne, dont quelque 84 millions enregistrés en République populaire de Chine (ci-après dénommée « la Chine ») et 78 millions aux États-Unis. Viennent ensuite la Corée, le Brésil et l'Allemagne avec 18 millions d'appareils connectés, puis le Japon, l'Espagne, le Royaume-Uni et le Mexique, qui comptent chacun entre 8 et 10 millions d'équipements. Les efforts déployés pour classer les pays en fonction du nombre d'appareils connectés pour 100 habitants se heurtent au manque de données ; le graphique 2.6 dresse malgré tout un palmarès des dix premiers.


Selon les estimations disponibles, l'IdO pourrait contribuer au PIB mondial à hauteur de 10 000 à 15 000 milliards USD sur les 20 prochaines années (Evans et Anninziata, 2012). Le fait d'équiper les machines de capteurs pourrait favoriser le développement de la maintenance prédictive, avec à la clé des gains d'efficacité. Dans le secteur de l'aéronautique, un gain d'efficacité de 1 % pourrait permettre aux compagnies aériennes

commerciales d'économiser, à l'échelle mondiale, 2 milliards USD par an (Evans et Anninziata, 2012). Selon Vodafone (2015), l'adoption de l'IdO se traduit en moyenne par 18 % d'économies pour l'industrie, et près de 10 % des entreprises ayant franchi le cap ont réduit leurs coûts de plus de 25 %. Outre les réductions de coûts, les entreprises indiquent avoir constaté des améliorations à différents niveaux, notamment : efficacité des processus ; service à la clientèle ; rapidité et souplesse de la prise de décision ; cohérence de l'offre sur les différents marchés ; transparence/prévisibilité des coûts ; et performances sur les nouveaux marchés (Vodafone, 2015). Par exemple, en alliant l'analyse des données massives à l'IdO, un géant américain du secteur automobile a économisé 2 milliards USD au cours des quatre à cinq dernières années (encadré 2.5). Des économies liées en grande partie à l'optimisation des chaînes logistiques. Par ailleurs, l'entreprise réalise des simulations fondées sur les données massives pour optimiser la conception de ses camions, de manière à réduire la consommation de carburant et les coûts de production⁹. Sans compter que l'IdO ouvrira également la voie à une multitude d'avantages économiques et sociaux qui ne sont pas directement liés à la production, dans des domaines comme la santé, le recours aux compteurs intelligents et l'utilisation efficiente des véhicules¹⁰.

Graphique 2.6. **Classement des 10 premiers pays de l'OCDE en nombre d'appareils IdO connectés à l'internet**

Pour 100 habitants



Source : OCDE (2015a), *Perspectives de l'économie numérique 2015*, <http://dx.doi.org/10.1787/888933308499>, d'après Shodan, www.shodanhq.com.
StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679678>

L'internet des objets, les données massives et l'infonuagique sont les principaux vecteurs de la percée soudaine des applications de l'intelligence artificielle (IA), à l'instar des véhicules sans conducteur. Sous l'effet de l'IdO, les objets physiques sont désormais intégrés aux flux d'informations et deviennent « intelligents ». Par exemple, les voitures autonomes reçoivent de l'infrastructure routière, des autres véhicules et des services web (tels les cartes électroniques) les informations dont elles ont besoin¹¹. Il n'est donc pas nécessaire de les équiper de systèmes de traitement d'images comparables à la vision humaine, comme on le pensait à l'origine. De même, dès lors que l'ensemble des dispositifs et des machines d'une usine peut transmettre des informations, cela ouvre la voie à une multitude de nouvelles applications robotiques.

Encadré 2.5. **Un géant américain de l'automobile mise sur l'IdO, les données massives et l'infonuagique**

Aux États-Unis, un constructeur automobile a réduit ses coûts d'environ 2 milliards USD sur les cinq dernières années (sur la période 2011-14 et la majeure partie de 2015) en développant sensiblement ses capacités en matière d'IdO et d'analyse des données. L'objectif premier était d'apporter des renseignements sur la conception de ses véhicules, en évaluant par exemple dans quelle mesure l'utilisation de l'aluminium permettrait de réduire la consommation de carburant, avant de lancer la production d'un nouveau modèle de camion. Les économies les plus significatives sont venues des changements opérés au sein de sa chaîne logistique et de l'amélioration de l'efficacité des concessionnaires.

Le constructeur a obtenu des résultats probants dans deux domaines principaux : d'une part, un meilleur contrôle de sa chaîne logistique et, d'autre part, l'utilisation de l'analyse des données afin de proposer aux clients, une sélection de véhicules, couleurs et caractéristiques affinés.

Pour sa chaîne logistique, il est parti du constat que les pièces représentent entre un tiers et la moitié de la valeur d'un véhicule coûtant 30 000 USD. Il a en outre considéré que l'analyse des données pouvait l'aider à réduire les coûts au sein de sa chaîne logistique de 1 à 1.5 % par an (d'après des études réalisées par d'autres entreprises). En supposant que l'entreprise tire de la vente de ses véhicules un chiffre d'affaires de 20 milliards USD par an aux États-Unis, elle réaliserait alors entre 200 et 300 millions USD d'économies par an, soit 1 à 1.5 milliard USD sur cinq ans. En ce qui concerne l'amélioration du choix des véhicules confiés aux revendeurs, un résultat mesurable a été identifié : l'optimisation de la gestion des stocks grâce à la réduction du temps que les véhicules passent dans les concessions. Cela pourrait représenter 50 à 100 USD par véhicule sur un parc d'environ 2 millions de voitures par an, soit entre 500 millions et 1 milliard USD sur cinq ans. Au total, les économies réalisées pourraient donc atteindre entre 1.5 et 2.5 milliards USD sur cinq ans.

Les investissements nécessaires pour parvenir à ces réductions de coûts s'échelonnent entre 350 et 500 millions USD sur cinq ans. On estime que le constructeur américain a affecté au groupe chargé des fonctions analytiques 200 salariés percevant une rémunération annuelle moyenne de 150 000 à 200 000 USD (cette estimation correspond à une fourchette haute, sachant que certains spécialistes perçoivent des revenus supérieurs à 300 000 USD par an), toutes charges comprises. Cela équivaudrait à une masse salariale annuelle totale de 30 à 40 millions USD, soit 150 à 200 millions USD sur cinq ans. Si l'on considère en outre que le coût des équipements logiciels et matériels nécessaires aux fonctions d'analyse des données est comparable, voire légèrement supérieur, le coût de mise en place de l'architecture logicielle du constructeur automobile pour permettre l'analyse de données et à la création d'un environnement IdO (interne) atteindrait entre 200 et 300 millions USD sur cinq ans. Ce qui correspondrait, au total, à un rendement d'environ 2 milliards USD pour un investissement de 350 à 500 millions USD sur cinq ans, soit un taux de rendement de 300 à 470 %.

L'estimation des retombées de l'adoption de l'IdO sur les performances financières de l'entreprise révèle que le gros des économies pourrait provenir des efforts de maîtrise des coûts au sein de la chaîne logistique. Le constructeur a d'ores et déjà regroupé la production sur une plateforme unique en vue de réduire le nombre de pièces nécessaires à la construction d'une voiture. La mise en place d'un système analytique plus élaboré devrait être synonyme d'économies supplémentaires. Il étudie en outre des solutions pour relier davantage de véhicules équipés de plateformes de capteurs embarquées à son environnement infonuagique. Il teste l'utilisation de capteurs destinés à aider les conducteurs à améliorer leurs performances de conduite. Les voitures électriques sont d'ores

Encadré 2.5. Un géant américain de l'automobile mise sur l'IdO, les données massives et l'infonuagique (suite)

et déjà équipées d'un système connecté à l'internet, qui communique avec les dispositifs mobiles. Le système est capable d'indiquer au conducteur si la batterie du véhicule est chargée, ainsi que les bornes de charge les plus proches. Le constructeur n'a pas évalué l'ampleur des retombées de ce système, ni établi de prévisions quant à leur évolution si le parc de véhicules électriques augmente à l'avenir.

À l'heure actuelle, les véhicules électriques fabriqués par l'entreprise génèrent quelque 25 pétaoctets¹ de données par heure. Le constructeur estime qu'avec les nouvelles technologies satellitaires qui pourraient voir le jour au cours des deux à trois prochaines années, le volume de données par voiture pourrait être multiplié par 100. Sans compter les volumes considérables de données produites par les capteurs utilisés dans les usines, les ateliers et dans le cadre des programmes de recherche. Le constructeur voit le véhicule comme un « système de commande en boucle fermée ». En conséquence, l'entreprise pourrait se retrouver à recevoir des exaoctets² de données supplémentaires émises par de nouveaux systèmes équipant des dizaines de millions de véhicules, soit des zettaoctets de données générées par an à l'horizon 2019-20. Un tel taux de croissance – de plus de 250 % par an – n'irait pas sans poser des défis de taille en termes de gestion des données.

1. 1 pétaoctet = 1 million de gigaoctets.

2. 1 exaoctet = 1 milliard de gigaoctets.

La transformation numérique révolutionne la production

L'adoption des technologies numériques entraîne souvent dans son sillage la « destruction créatrice » d'entreprises, de marchés et de réseaux à valeur ajoutée. Ce qui pose des défis aux entreprises (traditionnelles), qui pourraient renoncer, du fait de l'environnement concurrentiel, à réaliser des investissements dans l'innovation de rupture à court terme. Deux raisons principales à cela : d'une part, ce type d'investissements peut mobiliser des ressources rares dont les unités fonctionnelles les plus rentables ont besoin (pour affronter la concurrence) ; d'autre part, l'innovation de rupture présente un risque élevé dans la mesure où elle n'est pas toujours rentable à court terme. Sans compter qu'elle peut nécessiter de modifier en profondeur les structures organisationnelles, les processus métier, voire les modèles économiques, des évolutions qui peuvent être synonymes de coûts irrécupérables¹². Outre les facteurs économiques, la mise en œuvre des changements peut se heurter à une résistance interne liée à la culture organisationnelle et à une réticence psychologique de la part de l'équipe de direction et des employés. Christensen (1997) qualifie ce phénomène de « dilemme de l'innovateur » : des entreprises prospères accordent une importance excessive à leur réussite immédiate et négligent par conséquent d'innover sur le long terme.

La crainte du changement et des bouleversements, conjuguée à une réflexion à court terme, de mise dans les entreprises traditionnelles, font que l'innovation par le numérique reste souvent l'apanage des entreprises TIC et, en particulier, des start-ups (voir OCDE, 2015b). Comme le montrent Criscuolo, Nicolaou et Salter (2012), les nouvelles technologies et les innovations sont souvent commercialisées en premier lieu par des start-ups qui ont l'avantage de ne pas subir le poids d'un historique et d'une clientèle existante, et sont donc libres de créer un large éventail de modèles économiques présumés nouveaux. Christensen (1997) affirme également – même si cet avis est controversé – que les innovations de rupture ne sont, pour la plupart, pas immédiatement valorisées par les clients existants. C'est pourquoi les entreprises en place, généralement soucieuses de satisfaire avant tout leur

clientèle, délaissent parfois les marchés les plus exposés aux innovations de rupture, même si elles investissent massivement dans la recherche.

Les entreprises traditionnelles sont alors confrontées à un environnement concurrentiel plus complexe, où elles sont « contraintes de rivaliser sur plusieurs fronts à la fois et de coopérer avec leurs concurrents » (Gao et al., 2016)¹³. Ces concurrents peuvent être des acteurs des TIC comme Alphabet (Google) et Apple, qui bénéficient d'avantages compétitifs dans le domaine des technologies numériques. La création de nouveaux modèles économiques susceptibles de perturber les secteurs traditionnels peut s'avérer nécessaire. Ce qui peut obliger les entreprises en place à repenser leurs propres modèles pour rester compétitives sur le long terme.

Les nouveaux modèles économiques font la part belle aux services à forte valeur ajoutée

Alors que les marges bénéficiaires des produits s'amenuisent, de nombreuses entreprises manufacturières développent de nouveaux services complémentaires qui viennent étoffer leur offre commerciale. C'est ainsi que Rolls-Royce est passé d'une solution axée sur trois composantes (produit, temps et service) à un modèle de service commercialisé sous la marque *Power by the Hour*, ou PBH (encadré 2.6). Le numérique a joué un rôle essentiel dans ce virage vers des services (complémentaires) à plus forte valeur ajoutée.

Encadré 2.6. « Servicisation » de la production manufacturière : l'exemple de l'offre *Power by the Hour* (PBH) de Rolls-Royce

Rolls-Royce est passé d'une solution axée sur trois composantes (produit, temps et service) à un modèle de service commercialisé sous la marque *Power by the Hour* (PBH)¹. Le principe consiste à facturer les clients en fonction du temps d'utilisation d'un moteur. Rolls-Royce n'aurait pas pu mettre en place cette solution s'il n'avait pas été en mesure de collecter d'importants volumes de données à partir des réseaux de capteurs installés sur ses moteurs.

La mise en place de ce modèle de service s'est faite en trois étapes. Dans un premier temps, l'entreprise a développé des solutions pour utiliser les données issues des réseaux de capteurs afin d'assurer la gestion opérationnelle de ses propres services. Puis elle a perfectionné le modèle en gérant plus directement les services et l'assistance à l'intention de ses clients. Enfin, dans un troisième temps, elle est parvenue à uniformiser les gros volumes de données à l'échelle de sa clientèle extrêmement variée, optimisant ainsi l'intégralité de son écosystème de données. Son modèle de service est, de ce fait, devenu plus proactif, l'objectif étant de minimiser, voire d'éliminer les temps d'arrêt imposés à ses clients (chaîne YouTube *Frank-Partners*, juillet 2016).

Ce nouveau modèle est fondé, non plus sur un support produit et ventes, mais sur une activité de services. Rolls-Royce a ainsi réussi à prendre le contrôle du marché des pièces détachées, plutôt que de permettre à des acteurs tiers de créer des pièces de rechange pour ses moteurs d'avions. Le nouveau modèle a également permis de répartir plus équitablement les risques liés à l'utilisation des moteurs entre le fournisseur et le client.

Rolls-Royce a commencé par placer ses clients au cœur de ses propres activités. L'entreprise a d'abord travaillé en étroite collaboration avec American Airlines pour créer la solution *Total Care*, axée sur l'intégralité des besoins du client. De là sont nés les centres opérationnels, dans lesquels les ingénieurs de Rolls-Royce veillent à la gestion quotidienne de la flotte de chaque client. Il n'est pas rare que ces centres soient intégrés aux opérations des clients ; l'entreprise a ainsi commencé par nouer une étroite coopération dans le secteur de la défense, au Royaume-Uni (chaîne YouTube *Frank-Partners*, juillet 2016).

Encadré 2.6. « Servicisation » de la production manufacturière : l'exemple de l'offre Power by the Hour (PBH) de Rolls-Royce (suite)

Rolls-Royce vise désormais l'objectif « zéro perturbation » pour ses clients. Pour ce faire, l'entreprise procède à une modélisation sophistiquée des solutions qu'elle leur propose, au niveau à la fois des produits et de la flotte des clients. Ce virage vers une optique pronostique suppose que Rolls-Royce recueille les données générées par les moteurs et les agrège de manière à appréhender le mode de fonctionnement de l'ensemble de la flotte. Les données sont ensuite consolidées à l'échelle des différents clients afin d'obtenir une vue d'ensemble de la manière dont elles sont utilisées. À l'avenir, Rolls-Royce se concentrera également sur la disponibilité des appareils, s'assurant que lorsqu'un avion s'apprête à décoller, il ait toutes les chances d'y parvenir sans rencontrer de problème lié aux moteurs.

Le nouveau modèle de service permet à Rolls-Royce d'améliorer ses performances à deux niveaux :

- **Rolls-Royce peut réduire les coûts inhérents aux réparations planifiées en minimisant les coûts de maintenance et en évitant les pannes, d'où un allongement de la période pendant laquelle le moteur reste en place sur l'aile de l'avion, et, par ricochet, un accroissement des revenus tirés de ses services.** Un laboratoire national américain a estimé que la maintenance prédictive des équipements pouvait permettre d'économiser jusqu'à 12 % sur les réparations planifiées, avec à la clé une réduction des coûts de maintenance globaux pouvant aller jusqu'à 30 % et une diminution des pannes jusqu'à 70 % (Sullivan et al., 2010 ; cité dans Daugherty et al., 2015). Si les économies réalisées par Rolls-Royce sont du même ordre, avec une baisse de 12 % des coûts de prestation des services, elles pourraient s'échelonner, d'après le chiffre d'affaires de l'exercice budgétaire 2014, entre 400 et 600 millions USD. Rolls-Royce parvient non seulement à allonger la durée de vie attendue de ses moteurs, mais tire également des revenus supplémentaires des services de maintenance. Ce qui permet d'allonger la durée de vie du moteur, des quatre à six ans habituels, jusque six à huit ans. Elle devrait donc dégager davantage de revenus de ses services dans les secteurs civil comme militaire. L'augmentation pourrait d'ailleurs atteindre 15 à 20 % par an. Si l'on se réfère au chiffre d'affaire 2014, cela pourrait représenter un surplus de 1.0 à 1.35 milliard USD par an. Par conséquent, les retombées annuelles totales imputables au nouveau modèle de service s'échelonneraient entre 1.4 et 1.95 milliard USD.
 - **Rolls-Royce est en mesure d'offrir une forme de garantie de service à ses clients en assurant la disponibilité des appareils et en visant l'objectif « zéro perturbation » :** en réduisant les perturbations venant compromettre la capacité de ses clients à mener à bien leurs activités, Rolls-Royce ajoute une garantie de performance aux services standard assurés par l'intermédiaire de ses centres opérationnels et de ses centres d'affaires. Il reste toutefois difficile d'estimer les retombées économiques du dispositif « zéro perturbation »².
1. Avec les dispositifs de type *Power by the Hour*, les clients et les fournisseurs de produits vitaux, comme les équipements servant à la fabrication des semi-conducteurs, les avions commerciaux et les systèmes d'armement militaire, reconnaissent que l'acquisition de produits d'excellence ne suffit pas, et qu'il est désormais nécessaire d'y adjoindre des services de maintenance et de support avancés et économiques, tout au long de la phase après-vente de la relation client-fournisseur. L'un des volets essentiels de ces efforts consiste à repenser les relations contractuelles et informelles entre les clients et les fournisseurs dans le cadre de la chaîne logistique de l'offre de services (Knowledge@Wharton, 2007).
 2. Aucune information n'est disponible sur la valeur économique des dispositifs de type « zéro perturbation ». Une étude de cas sur les efforts déployés en ce sens par le constructeur japonais FANUC laisse entendre qu'ils pourraient permettre à General Motor de réduire les temps d'immobilisation et d'économiser 40 millions USD par an (voir Roboglobal, 2016 ; et Cisco, 2016).

Par le passé, la transformation numérique des modèles économiques a dans un premier temps été impulsée par la formalisation et la codification des activités des entreprises, qui ont conduit à l'informatisation des processus métier grâce aux logiciels. Les entreprises ont ainsi pu répliquer plus rapidement les processus métier à l'échelle des organisations, avec, à la clé, une augmentation non seulement de la productivité, mais aussi des parts et de la valeur de marché. Brynjolfsson et al. (2008) a décrit ce phénomène comme un changement d'échelle sans masse critique. Avec les entreprises de l'internet, la transformation numérique a franchi un nouveau cap. De fait, elles sont parvenues à optimiser ce changement d'échelle sans masse critique, mieux encore que dans le reste de l'économie¹⁴.

Les modèles économiques des entreprises de l'internet les plus prospères vont aujourd'hui au-delà de la formalisation et de la codification des processus à l'aide des logiciels, pour couvrir la collecte et l'analyse d'importants flux de données (OCDE, 2015b). En recueillant et en analysant des données massives – dont une grande part provient des internautes (consommateurs) –, elles sont en mesure d'automatiser leurs processus, et de tester et d'impulser le développement de nouveaux produits et modèles économiques à un rythme bien plus élevé que les autres entreprises. Plutôt que de se borner à la formulation (explicite) et la codification des processus métier, elles exploitent les données massives pour « entraîner » les algorithmes de l'intelligence artificielle à exécuter des processus plus complexes, sans intervention humaine. L'innovation rendue possible par l'IA sert désormais à transformer les processus métier à l'ensemble de l'économie. Grâce à la convergence entre les TIC et d'autres technologies (du fait notamment de l'intégration des logiciels et de l'IdO), la transformation numérique peut gagner des secteurs même traditionnels, tels l'industrie manufacturière et l'agriculture.

L'analyse des modèles de l'économie numérique ayant fait leurs preuves révèle que les initiatives qui tirent parti des applications précitées peuvent conduire à une transformation numérique des entreprises traditionnelles. Parmi ces initiatives, citons notamment :

- **La numérisation des actifs physiques**, processus qui consiste à coder des informations sous une forme binaire (en « bits », pour *binary digits*) afin qu'elles puissent être traitées par les ordinateurs (OCDE, 2015b). Il s'agit là de l'une des étapes les plus élémentaires de la transformation numérique des entreprises. Le secteur du divertissement et de la production de contenu a été parmi les premiers à franchir ce cap, en numérisant les livres, la musique et les vidéos pour les proposer sur l'internet. Grâce au déploiement des scanners et imprimantes 3D, la numérisation n'est plus limitée au contenu, mais s'étend désormais aux objets matériels. L'impression 3D promet notamment de raccourcir les processus de conception industrielle grâce à la rapidité du prototypage, voire, dans certains cas, d'accroître la productivité en réduisant le gaspillage (voir chapitre 5). Boeing, par exemple, a déjà remplacé l'usinage par l'impression 3D pour plus de 20 000 unités de 300 pièces différentes (Davidson, 2012).
- **La « mise en données » (datafication en anglais) des processus d'entreprise**, qui désigne la production de données par le biais non seulement de la numérisation des contenus, mais aussi du suivi d'activités, y compris des activités et phénomènes physiques (en dehors du cyberenvironnement), surveillés à l'aide des capteurs. L'expression « mise en données » est la traduction du terme anglais *datafication*, mot-valise formé à partir de *data* et de *quantification*, à ne pas confondre avec la notion de *digitisation* (en français, numérisation), qui désigne uniquement la conversion d'informations analogiques au format numérique (OCDE, 2015b)¹⁵. De nombreuses plateformes ont recours à la mise en

données pour surveiller les activités de leurs utilisateurs. Sans compter qu'avec l'IdO, cette approche ne se limite plus aux entreprises de l'internet. Les données collectées à partir des machines agricoles, à l'instar de celles fabriquées par Monsanto, John Deere et DuPont Pioneer, servent ainsi à optimiser la distribution et la modification génétique des cultures (encadrés 2.3 et 2.6).

- **L'interconnexion des objets physiques via l'IdO**, vecteur d'innovation de produit et de procédé. Par exemple, Scania AB, l'un des principaux constructeurs suédois de véhicules commerciaux, tire aujourd'hui un sixième de ses revenus de services nouveaux s'appuyant sur les fonctions de communication sans fil intégrées à ses véhicules (encadré 2.7). L'entreprise a ainsi pu opérer un virage en se spécialisant dans la logistique, les réparations et d'autres services. L'interconnexion des véhicules lui a permis d'améliorer son offre de services de gestion de parc. L'interconnexion d'objets physiques ouvre également la voie à la production et l'analyse de données massives qui peuvent être utilisées pour créer de nouveaux services. Scania propose ainsi un ensemble de services pour renforcer l'efficacité de la conduite (et, par là même, des ressources), avec, par exemple, un programme d'accompagnement personnalisé des conducteurs fondé sur les données.

Encadré 2.7. Coopération ou concurrence : l'exemple des véhicules connectés de Scania

Scania AB, l'un des principaux constructeurs suédois de véhicules commerciaux, a de plus en plus recours à son dispositif dit « communicateur » pour collecter des données en vue de suivre et d'analyser l'efficacité de ses véhicules. Le constructeur entend ainsi accroître la part de ses ventes de services de 25 à 30 % de son chiffre d'affaires total à l'horizon 2020. Scania, qui propose depuis longtemps des services techniques et financiers, opère peu à peu un virage vers divers services connectés. Avec un objectif : faire en sorte qu'ils représentent un sixième de ses ventes de services liés à ses produits d'ici à 2020.

Plusieurs raisons ont motivé cette décision de mettre l'accent sur son offre de services. Dans la mesure où les ventes de services ne sont pas autant sujettes aux fluctuations économiques que les ventes de véhicules neufs, le constructeur a pour ambition de mieux équilibrer ses revenus sur le cycle de l'activité économique. Scania voit en outre cette stratégie comme un moyen d'accroître son chiffre d'affaires en créant de nouveaux services en phase avec l'évolution de la demande des clients dans le secteur des transports. Qui plus est, l'offre combinée de services et de véhicules lui permet de créer sa propre niche sur le marché des véhicules lourds. Dans ce domaine, Scania entend faciliter l'intégration de ses véhicules connectés aux parcs de véhicules multiconstructeurs des entreprises de transport.

Scania constate en effet que les transporteurs tendent à se spécialiser dans la logistique et à sous-traiter les réparations et autres services. En outre, la relation entre Scania et ses clients prend davantage la forme d'un partenariat dans lequel les parties travaillent de concert pour développer et optimiser la rentabilité des véhicules, et, par ricochet, celle des clients. Dans ce contexte, le développement de véhicules plus durables, sûrs et efficaces ne peut se faire sans une coopération entre le constructeur et ses clients. Scania s'appuie sur différents services (numériques) pour agir sur les coûts et les revenus de ces derniers. Du côté des coûts, cela peut passer par la mise en place de programmes de services ou de réduction de la consommation de carburant. Pour ce qui concerne les revenus, il s'agit d'agir sur le principal facteur de rentabilité : le temps de disponibilité réelle des véhicules aux fins du transport.

Encadré 2.7. **Coopération ou concurrence :** **l'exemple des véhicules connectés de Scania (suite)**

La transition vers les services connectés nécessite de développer l'accès à une expertise et des capacités à la pointe de la technique. Par conséquent, les constructeurs comme Scania n'ont d'autre choix que de nouer des partenariats d'un nouveau type avec des entreprises TIC. Parallèlement, une nouvelle forme de concurrence voit le jour, avec l'arrivée d'entreprises spécialisées dans des domaines tels que les TIC, qui entrevoient la possibilité de s'emparer de segments entiers de la chaîne de valeur des transports. Sans compter les nouvelles opportunités qui s'offrent aux autres parties prenantes, telles les compagnies d'assurance et les équipementiers automobiles, qui peuvent accéder plus facilement aux données issues des capteurs installés sur les véhicules, par exemple.

Les acteurs du secteur automobile comme Scania sont donc au défi d'identifier les activités qui, au sein de la chaîne de valeur de la mobilité, seraient susceptibles de générer à l'avenir la plus forte valeur, et de déterminer dans quelle mesure les progrès techniques actuels y contribueront. Scania a choisi de miser sur une offre élargie de services répondant aux besoins en mutation des clients dans le secteur des transports. Parallèlement, du fait de l'évolution des marchés, il lui est devenu plus difficile de tirer des revenus de certains services qui jusque-là étaient au cœur de son portefeuille de produits. Tel est le cas par exemple des services d'aide à la gestion des parcs de véhicules des transporteurs. De fait, ces services ont été progressivement standardisés, de telle sorte que de nombreux fournisseurs tiers exercent désormais une pression sur les prix.

Scania est également confronté à un certain nombre de défis directement liés aux politiques mises en place par les pouvoirs publics. Le constructeur est ainsi de plus en plus tributaire de la qualité de l'infrastructure de réseau mobile. Dans la mesure où il n'a pas la main sur les réseaux de communication, il doit nouer des partenariats d'itinérance avec des opérateurs de télécommunications internationaux afin d'assurer le bon fonctionnement de ses services numériques.

Enfin, la transition vers les véhicules sans conducteur, qui, selon Scania, devrait intervenir d'ici 5 à 25 ans, ne va pas sans poser de nouveaux défis liés aux questions de responsabilité dans le domaine de la sécurité routière, qu'il est difficile d'anticiper d'un point de vue juridique.

- **La codification et l'automatisation des processus d'entreprise grâce aux logiciels et à l'IA.** Les logiciels ont aidé et incité les entreprises à standardiser leurs processus, et, lorsque ces derniers n'étaient pas au cœur de leur modèle économique, à vendre à d'autres entreprises les processus codifiés dans des solutions logicielles. Il en est ainsi de la suite *Global Expenses Reporting Solutions* d'IBM, développée à l'origine pour automatiser la gestion interne des dépenses liées aux déplacements professionnels. Le système déployé en interne est devenu un service vendu partout dans le monde (Parmar et al., 2014). La messagerie Gmail de Google en est un autre exemple. Il s'agissait à l'origine d'un système de messagerie interne, jusqu'à ce que Google annonce au grand public le lancement d'une version bêta limitée, en avril 2004 (McCracken, 2014).
- **Le commerce des données (en tant que service),** qui est possible dès lors que des actifs physiques ont été numérisés, ou des processus « mis en données » (voir, plus haut, le point consacré à ce sujet). Les données générées en tant que produits dérivés des activités d'une entreprise peuvent présenter une valeur considérable pour d'autres entreprises (y compris dans des secteurs distincts). Ainsi, le prestataire de services de

communications mobiles français Orange utilise sa technologie *Floating Mobile Data* (FMD) pour exploiter les données anonymisées de déplacement des téléphones portables, qui sont vendues à des tierces parties telles que des organismes publics et des fournisseurs de services d'information sur le trafic. En outre, les entreprises peuvent tirer parti du fait que les données sont par nature non rivales pour créer des marchés multiples, où les activités menées sur un marché donne lieu à une collecte de données, qui sont exploitées et utilisées sur un autre marché. Pour autant, il reste très souvent difficile de prévoir la valeur que les données conféreront aux tierces parties. Ce qui a incité certaines entreprises à se tourner vers les données ouvertes (voir OCDE, 2015b).

- **L'utilisation (ou la réutilisation) et la connexion des données à l'échelle intrasectorielle et intersectorielle** (à savoir l'association de données composites), devenus synonymes d'opportunités commerciales pour les entreprises qui jouent un rôle central au sein de leur chaîne logistique. Walmart et Dell sont deux exemples probants d'entreprises qui ont réussi à intégrer les données à l'échelle de leurs chaînes d'approvisionnement. À mesure que l'industrie gagne en « intelligence », grâce à l'IdO et à l'analyse des données, cette approche commence également à intéresser les entreprises manufacturières. Les données issues des capteurs peuvent ainsi être utilisées pour surveiller et analyser l'efficacité des produits, optimiser les opérations à l'échelle d'un système, ou encore assurer les services après-vente, notamment les opérations de maintenance préventive (voir l'exemple de Schmitz Cargobull, présenté plus haut).

Le paysage concurrentiel gagne en complexité à mesure que la « coopération » s'impose comme la nouvelle norme

L'importance croissante des TIC, de l'analyse des données massives à l'IdO, en passant par l'intelligence artificielle, confère aux entreprises capables de s'approprier ces technologies un avantage compétitif décisif. Les entreprises TIC qui parviennent à étendre le champ de leurs activités à d'autres secteurs partent donc avec un avantage certain. En revanche, pour les entreprises (traditionnelles) en place, la situation s'avère délicate. Et pour cause : elles doivent non seulement apprendre à utiliser de manière optimale les TIC, mais aussi nouer de nouveaux partenariats avec les entreprises spécialisées pour se doter des capacités techniques nécessaires.

Certaines d'entre elles ont décidé d'acquérir des start-ups prometteuses (John Deere a ainsi racheté Precision Planting), tandis que d'autres ont entrepris de coopérer avec des entreprises TIC, qui peuvent toutefois vite devenir des concurrents (encadré 2.7). Cette relation quelque peu ambiguë, à mi-chemin entre coopération et concurrence, a été qualifiée de « coopération ».

La complexité du paysage concurrentiel est particulièrement prégnante dans l'industrie automobile, où les constructeurs traditionnels doivent rivaliser certes avec leurs concurrents directs, y compris les nouveaux venus comme Tesla, mais aussi, de plus en plus fréquemment, avec des géants des TIC comme Apple, Alphabet (Google) et Uber Technologies (Uber), pour ne citer que quelques exemples. Plusieurs tendances sociales et technologiques sous-tendent ce bouleversement profond. En voici trois, considérées comme les plus marquantes dans le secteur automobile.

- **Le degré croissant d'intégration des TIC (et, en particulier, des logiciels) dans les véhicules.** Les logiciels représentent une part de plus en plus élevée dans les coûts de mise au point des nouveaux véhicules – les voitures haut de gamme reposent aujourd'hui

sur des millions de lignes de code informatique. On estime d'ailleurs que 90 % des nouvelles fonctionnalités équipant les voitures ont une composante logicielle importante (amélioration de l'injection de carburant, caméras embarquées, systèmes de sécurité, etc.). Les véhicules hybrides et électriques sont particulièrement gourmands en code informatique : l'hybride rechargeable Chevrolet Volt contient environ 10 millions de lignes de code. Les logiciels comptent également pour une part considérable des coûts de développement des véhicules entièrement nouveaux – si les constructeurs tendent à taire les chiffres exacts, certains estiment cette part à environ 40 % – (OCDE, 2015d).

- **La tendance aux véhicules autonomes (sans conducteur), qui implique que les systèmes logiciels faisant appel à l'intelligence artificielle représenteront la plus grande part de la valeur ajoutée de chaque véhicule.** Les logiciels représentent la majeure partie des coûts de développement (entre 60 % et 80 %, si l'on inclut les systèmes d'information de divertissement¹⁶). Il n'est donc pas surprenant que les entreprises disposant de capacités logicielles avancées, notamment dans le domaine de l'IA, s'intéressent de près aux véhicules autonomes. Google fait souvent figure de pionnier, avec son projet *Self-Driving Car*, lancé en 2009 (même si la plupart des constructeurs automobiles de premier plan travaillaient déjà sur le concept depuis au moins dix ans¹⁷). Pour sa part, Tesla, qui a récemment mis à jour le microprogramme sur lequel fonctionne son système semi-autonome, dénommé « *Autopilot* », a mis la pression sur les acteurs historiques du marché automobile, les poussant à accélérer la cadence pour proposer des produits aux fonctionnalités comparables (c'est ainsi que Toyota Motor a annoncé son intention d'investir, d'ici à 2020, 1 milliard USD dans le développement de voitures autonomes).
- **Un possible changement de paradigme vers une « mobilité sous forme de service », qui pourrait dissuader les conducteurs de devenir propriétaires de leur voiture.** L'utilisation des smartphones et applications mobiles, alliée à l'analyse des données massives, a ouvert la voie à une consommation collective de biens privés durables en surcapacité. Dans le cas des véhicules automobiles, de nombreux services de mobilité partagée ont vu le jour : location de voitures privées (Zipcar), de services de VTC (Uber, Lyft, BlaBlaCar) et de places de stationnement (JustPark), autopartage sans station (Car2go, DriveNow), ou encore location de véhicules avec station, qu'il s'agisse de voitures (Autolib') ou de vélos (Velib') (OCDE, 2015a). Ces entreprises captent par conséquent d'importants flux de capitaux. Par exemple, Apple a investi il y a peu 1 milliard USD dans Didi Chuxing, un service de VTC concurrent d'Uber en Chine.

Toutes ces tendances ont favorisé l'entrée des entreprises TIC sur les marchés de l'automobile et des services de mobilité, par le biais non seulement d'un recours croissant à des alliances stratégiques, mais aussi de fusions et d'acquisitions. Un certain nombre de partenariats se sont concentrés sur le développement de véhicules autonomes (sans conducteur). Par exemple, en mai 2016, le constructeur automobile Fiat Chrysler (FCA) et Alphabet, la société mère de Google, ont annoncé leur intention de développer conjointement un parc de 100 monospaces autonomes. Le mois suivant, BMW a annoncé qu'il allait s'allier à Intel et Mobileye pour mettre au point un système de conduite entièrement automatisée. Pour ce qui est des fusions-acquisitions, General Motors a déboursé récemment 1 milliard USD pour le rachat de Cruise Automation, une start-up spécialisée dans la conception de systèmes logiciels de conduite autonome.

À cela s'ajoute un nombre croissant de collaborations et d'investissements centrés sur les services de mobilité. Il en est ainsi de Volkswagen, qui a investi il y a peu 300 millions USD

dans une start-up israélienne, Gett, concurrente d'Uber opérant essentiellement à New York, Londres, Moscou et Tel Aviv. Dans la même veine, Toyota Motor Corporation a investi dans Uber Technologies, tandis que General Motors a injecté 500 millions USD dans Lyft, le principal rival d'Uber aux États-Unis, qui a l'intention de mettre en place un réseau de voitures autonomes à la demande, à l'échelle nationale. Pour les fournisseurs des plateformes, l'objectif est souvent d'accéder à des parcs de véhicules ; les constructeurs automobiles, eux, cherchent à accéder aux données de mobilité et aux capacités analytiques des fournisseurs des plateformes.

À la lumière de ces efforts collaboratifs, certains observateurs ont constaté que les constructeurs automobiles peuvent être tirés vers le bas de la chaîne de valeur s'ils ne disposent pas des compétences nécessaires en matière de solutions logicielles et de services faisant appel à l'intelligence artificielle. Réagissant à l'annonce d'Apple d'investir dans un projet automobile, Ewing (2015) a formulé la conclusion suivante :

« Le principal risque pour les constructeurs automobiles n'est probablement pas tant qu'une voiture Apple sonnerait le glas de Mercedes-Benz ou de BMW comme l'iPhone a anéanti Nokia, le finlandais autrefois premier fabricant mondial de téléphones mobiles. En revanche, Apple et Google pourraient reléguer les constructeurs au rang de simples fabricants de matériel – et accaparer les bénéfices. »

Cela dit, les constructeurs traditionnels conservent un avantage décisif : leur capacité à gérer la complexité inhérente à la fabrication de véhicules fiables et confortables, ainsi que la chaîne logistique. Et demeurent détenteurs de marques extrêmement puissantes. Reste à savoir dans quelle mesure un nouveau venu pourra externaliser le processus de fabrication, comme Apple sous-traite la production de la partie matérielle de l'iPhone, ou nouer des partenariats avec des industriels, comme Google le fait pour Android. Quoi qu'il en soit, toutes les parties prenantes devront identifier précisément leurs cœurs de métier et les activités sur lesquelles elles peuvent miser, au sein de la chaîne de valeur, pour tirer le meilleur parti de leurs avantages compétitifs. L'exploitation de droits de propriété intellectuelle (DPI) existants et des données comme « points de contrôle » pourrait s'avérer être la clé des stratégies des entreprises, et l'on peut s'attendre à des conséquences déterminantes pour la concurrence sur les marchés concernés (voir OCDE, 2015b).

Automatisation de la fabrication industrielle et de l'agriculture

Dans le secteur manufacturier, les robots ont été, jusqu'à présent, utilisés en priorité là où leur rapidité, leur précision, leur dextérité et leur adaptabilité à des conditions dangereuses sont particulièrement utiles. Cela dit, les robots classiques ne sont rapides que dans des environnements très précis, et il faut des mois – voire des années – pour configurer l'usine qui doit les accueillir. Si les robots peuvent être équipés de capteurs, la plupart de leurs mouvements doivent néanmoins être planifiés et programmés, ce qui ne permet pas une grande souplesse dans la fabrication des produits. C'est pourquoi la fabrication des appareils électroniques grand public demeure souvent manuelle, car le cycle de vie et le délai de commercialisation de ces appareils sont si courts que l'usine robotisée ne serait pas encore prête à démarrer la fabrication de l'un d'eux que son successeur devrait déjà être sur le marché. Aujourd'hui, pourtant, l'IA change la donne : sous son impulsion, les machines deviennent plus flexibles et autonomes, et peuvent désormais exécuter un éventail plus large de tâches manuelles plus complexes. À tel point que certaines usines modernes, à l'instar de l'usine de fabrication de rasoirs Philips de Drachten, aux Pays-Bas, sont presque

entièrement robotisées (Markoff, 2012). Cette usine compte seulement un dixième de la main-d'œuvre employée dans l'usine de Philips qui fabrique les mêmes rasoirs en Chine.

Autre secteur dans lequel les machines autonomes sont en plein essor : l'agriculture. Dans le domaine de l'élevage bovin, les machines traitent les vaches, distribuent les aliments et nettoient les étables sans aucune intervention humaine. Le robot de traite fabriqué par Lely ajuste ainsi automatiquement les processus d'alimentation et de traite, de manière à optimiser la production laitière de chaque vache. Plusieurs études ont d'ailleurs prédit que la fin de l'intervention humaine dans l'agriculture n'était désormais qu'une question de temps.

L'un des scénarios envisageables serait par conséquent que les activités des entreprises agricoles se limitent au gardiennage des exploitations, des animaux et des données. Il s'agirait alors de surveiller les opérations concentrées au bas de la chaîne de valeur, à l'image du concept actuel d'agriculture contractuelle¹⁸. Les producteurs alimentaires, les distributeurs, voire les consommateurs, pourraient interagir directement avec le réseau qui gravite autour de l'agriculteur, y compris les fournisseurs de semences, les machines intelligentes (autonomes), les vétérinaires, etc. Dans ce scénario, l'agriculteur s'apparente à un donneur d'ordres qui veille à la fluidité des interactions entre les acteurs du système agricole, du côté de l'offre comme de la demande. On pourrait également envisager un scénario alternatif, où les agriculteurs s'appuieraient sur les données et les résultats de l'analytique pour adapter les processus en fonction de leurs connaissances des idiosyncrasies locales et propres aux exploitations agricoles.

L'IdO facilite certes l'intégration des systèmes physiques, mais pas seulement : il a également vocation à favoriser celle des milieux vivants – plantes, animaux et hommes – au sein des systèmes physiques¹⁹. Cette intégration pourrait profiter à l'homme : les applications basées sur la réalité augmentée pourraient, par exemple, fournir aux employés les informations en temps réel dont ils ont besoin pour améliorer la prise de décision et les procédures de travail. Les instructions de réparation pourraient ainsi s'afficher directement dans le champ de vision des personnes équipées de lunettes à réalité augmentée (Rüssmann et al., 2015). Par ailleurs, l'utilisation d'informations disponibles en temps réel peut aider les employés à organiser par eux-mêmes le roulement des équipes, comme le montre le projet KapaflexCy en Allemagne (encadré 2.8). Pour autant, les exemples présentés jusqu'à présent laissent entrevoir le risque qu'une telle intégration conduise à une déshumanisation de la production. Les processus de production étant hautement automatisés, l'intégration et les interactions entre les hommes et les systèmes autonomes sont déjà à l'œuvre. Elles sont présentes en particulier pour des tâches faisant encore appel à l'intelligence humaine et pour lesquelles il n'existe aucun algorithme rentable. Ces travailleurs se placent donc davantage au service des systèmes IdO plutôt que dans une position d'utilisateurs (encadré 2.9).

Les grands entrepôts, qui ont été jusqu'à présent d'importants pourvoyeurs d'emplois, sont une bonne illustration de ce système. Ces entrepôts sont aujourd'hui nombreux à utiliser les technologies numériques pour diriger les employés vers les étagères idoines et leur indiquer les articles à y prélever. Les employés scannent ensuite les codes-barres des articles prélevés et déposés. Ils parcourent chaque jour de nombreux kilomètres²⁰. D'autres entrepôts sont équipés de tapis roulants pour les produits. Ce sont alors les ordinateurs qui « contrôlent » les hommes. En revanche, dans certains cas, le modèle d'organisation a évolué : ce sont en effet les étagères qui viennent aux employés, déplacées par de petits robots comme ceux fabriqués par Kiva Systems, une entreprise rachetée par Amazon après que ce dernier eût commencé à utiliser ses produits. Kiva Systems a ouvert

la voie à un nouveau type d'entrepôt, où les employés restent à leur poste et les étagères viennent à eux. L'emplacement des produits est constamment optimisé : les produits les plus vendus sont ainsi stockés sur les étagères les plus proches, de manière à leur faire parcourir la plus courte distance²¹. Un laser indique à l'employé quel produit doit être prélevé et où le déposer. Résultat : un entrepôt ultra-efficace où l'on fait appel à moins d'employés pour gérer le même volume de commandes.

Encadré 2.8. **Organisation autonome flexible des capacités de production au service de l'industrie 4.0 : le projet de recherche KapaflexCy**

Pour fabriquer des produits hautement personnalisés, les entreprises doivent faire preuve de davantage de dynamisme et d'agilité, et porter une attention accrue aux besoins des clients. Ce qui ne peut se faire sans une flexibilité maximale, au niveau tant des installations techniques que du personnel. Dans l'optique d'une production économe en ressources, le déploiement du personnel doit être au plus près de la demande réelle. Dans la pratique, ce processus s'avère généralement inefficace : les chefs d'équipe et les responsables de quart coordonnent le calendrier des présences et des absences des employés, souvent oralement, parfois par courriel.

Le projet de recherche KapaflexCy a rassemblé diverses institutions qui ont collaboré à la mise au point d'un système auto-organisé de contrôle des capacités géré – les institutions concernées sont Fraunhofer IAO, BorgWarner, Bruker Optik, l'aéroport de Stuttgart, l'institut IAT (Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement), Introbest, Kaba, SAP et Trebing & Himstedt). Grâce à ce système, les entreprises peuvent contrôler leurs capacités de production en impliquant directement les cadres dirigeants, pour une prise de décision extrêmement flexible, sur le court terme et à l'échelle de l'organisation. Même en période de variation des volumes de commandes et d'instabilité des marchés, elles peuvent réagir plus rapidement, éviter les temps morts et réduire les coûts inhérents au contrôle des capacités. Les salariés bénéficient d'un plan de déploiement du personnel transparent et coordonnent leurs périodes d'affectation. Avec, à la clé, un meilleur équilibre entre travail, famille et loisirs, et une motivation renforcée.

Source : OCDE, d'après www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/096-kapaflexcy-selbstorganisierte-kapazitaetsflexibilitaet-fuer-die-industrie-4-0/beitrag-kapaflexcy-selbstorganisierte-kapazitaetsflexibilitaet-fuer-die-industrie-4-0.html (consulté le 15 janvier 2017).

Encadré 2.9. **Recours à la contribution participative pour les tâches faisant appel à l'intelligence humaine : l'« informatique basé sur l'humain »**

Si les technologies en matière d'informatique et d'automatisation ne cessent de progresser, de nombreuses tâches continuent d'être exécutées plus efficacement par les hommes que par les machines – l'identification d'objets dans une vidéo ou la transcription d'enregistrements audio en sont des exemples. Les entreprises ont généralement pour habitude de se tourner vers des travailleurs intérimaires. Mais une alternative se fait jour : externaliser la réalisation de ces micro-tâches, dites « tâches d'intelligence humaine » (*human intelligence tasks*, ou HIT) via le recours à la contribution participative. Ce processus, qui offre aux entreprises une flexibilité accrue, est souvent qualifié d'« informatique basé sur l'humain », dans la mesure où l'on fait appel à des hommes pour des problèmes que les ordinateurs ne parviennent pas à résoudre.

Encadré 2.9. Recours à la contribution participative pour les tâches faisant appel à l'intelligence humaine : l'« informatique basé sur l'humain » (suite)

Amazon reste le principal fournisseur de services d'« informatique basé sur l'humain » sur l'internet, depuis le lancement, en 2005, de sa plateforme de contribution participative pour l'exécution de tâches numériques, dénommée *Amazon Mechanical Turk* (MTurk). Les clients publient des annonces pour des projets d'envergure limitée qui ne peuvent être entièrement menés à bien grâce à l'informatique. Les travailleurs – appelés *turkers* – exécutent ces tâches ponctuelles, en contrepartie d'une rémunération allant de 0.01 USD pour une tâche de courte durée à 100 USD pour certaines missions plus complexes. À l'heure actuelle, quelque 500 000 travailleurs de 190 pays sont inscrits sur Amazon MTurk. MTurk et d'autres services similaires sont parfois considérés comme une opportunité économique, en particulier pour les travailleurs des pays en développement. Par exemple, Samasource, une organisation sans but lucratif, fournit des services de données à de grandes entreprises basées aux États-Unis et en Europe. Elle divise le travail en micro-tâches dont la réalisation est confiée à des centres d'exécution dans des pays en développement (Gino et Staats, 2012).

S'ils offrent des possibilités de travail à certains, MTurk et les services de même ordre, tels Samasource, ont également essuyé des critiques, allant jusqu'à être accusés de pratiquer un esclavage numérique, dans la mesure où, comme l'a souligné un universitaire, ils contournent un certain nombre de lois et de pratiques en vigueur dans la plupart des pays développés (Zittrain, 2009, cité dans MIT Technology Review, 2010). La rémunération de ces « microtravailleurs » est souvent inférieure aux taux horaires moyens (Uddin, 2012 ; Cushing, 2013 ; Horton et Chilton, 2010). Néanmoins, selon une enquête portant sur la perception des conditions de travail, menée auprès de 200 personnes inscrites sur MTurk, celles-ci considèrent que leurs chances d'être traitées équitablement dans le cadre de ces cyberemplois sont au moins équivalentes, voire supérieures, à celles qui leur sont offertes dans les emplois traditionnels (MIT Technology Review, 2010 ; Horton, 2011). La situation n'en reste pas moins problématique, malgré une pétition, déposée en 2014 par des travailleurs de la plateforme MTurk, dans laquelle ils appellent Jeff Bezos, PDG d'Amazon, à améliorer leurs conditions de travail (Harris, 2014 ; Dholakia, 2015).

Source : OCDE (2015b), *Data-Driven Innovation: Big Data for Growth and Well-Being*, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264229358-en>.

De nouvelles possibilités d'action et de nouveaux défis sont à attendre

Bien que prometteuse, la transformation numérique de la production industrielle et agricole n'a pas encore atteint son plein potentiel. Il y a plusieurs raisons à cela, l'exemple de l'adoption des technologies liées à l'agriculture de précision aux Pays-Bas le montre (encadré 2.10). Cette section examine les principales problématiques qui, si elles trouvent une réponse adaptée, pourraient maximiser les avantages de la transformation numérique.

Encadré 2.10. Moteurs et enjeux de l'adoption des technologies liées à l'agriculture de précision

Le concept d'agriculture de précision suscite l'imagination des acteurs de l'industrie et des décideurs, même si le marché des solutions spécialisées dans ce domaine n'en est qu'à ses balbutiements.

Dans une enquête réalisée auprès des agriculteurs néerlandais, environ 55 % des répondants ont indiqué posséder des outils d'aide à l'agriculture de précision (Université et centre de recherche de Wageningen, WUR). Il s'agit dans la plupart des cas de tracteurs

Encadré 2.10. Moteurs et enjeux de l'adoption des technologies liées à l'agriculture de précision (suite)

équipés d'un GPS et, dans une moindre mesure, d'outils de surveillance des cultures et du sol. En revanche, l'intégration des données générées par les machines dans les systèmes de gestion opérationnelle reste limitée. Les agriculteurs recourent à ce type de solution avant tout lorsqu'ils y sont contraints par la réglementation ou les exigences des clients en matière de sécurité alimentaire. En d'autres termes, ces outils sont davantage utilisés à des fins d'enregistrement que dans l'optique de produire des données de gestion tangibles. L'utilité des systèmes de gestion devient plus manifeste à mesure que les exploitations grandissent et ont besoin de meilleures capacités de traitement de l'information. Quelque 45 % des répondants exploitent les données collectées pour planifier la fertilisation, l'irrigation et la pulvérisation de pesticides. Toutefois, cette planification ne s'appuie généralement pas sur des données en temps réel et n'est pas prise en charge automatiquement par les machines. On est donc loin d'exploiter le plein potentiel des technologies.

La facilité d'utilisation des outils TIC et les compétences TIC des agriculteurs sont des facteurs de poids dans l'adoption et l'utilisation des technologies qui sous-tendent l'agriculture de précision. Entrent également en ligne de compte la taille des exploitations, les perspectives de réductions de coûts, le revenu total de l'exploitation agricole, le régime foncier, l'accès à l'information (par le biais de services de vulgarisation et des fournisseurs de services et de technologies), ou encore la localisation (Perpaoli et al., 2013).

Les taux d'adoption des technologies liées à l'agriculture de précision varient selon les sous-secteurs. Diverses sources laissent à penser que l'utilisation des données et de l'analytique dans le domaine de l'élevage et de la culture sous serre est plus répandue que dans la culture de plein champ. La raison pourrait en être que les deux premiers sous-secteurs affichent des cycles de production plus courts et opèrent dans des environnements contrôlables, ce qui rend les solutions d'agriculture de précision et l'automatisation plus rentables.

Autre levier de diffusion important : la pénétration du haut débit (mobile). Le projet européen de recherche AgriXchange a en effet mis en évidence le fait que l'absence de haut débit dans de nombreuses zones rurales d'Europe constitue un frein majeur à l'adoption des innovations s'appuyant sur la collecte et l'échange de données.

Surmonter les obstacles à la diffusion des TIC, à l'interopérabilité et aux normes

La transformation numérique de la production industrielle passe par la diffusion des TIC clés, en particulier dans les PME. Pourtant, de nombreuses entreprises tardent à franchir le cap. Pour preuve, l'adoption de l'infonuagique, des solutions de gestion de la chaîne logistique, des progiciels de gestion intégrés et des applications de radio-identification (RFID) par les entreprises reste très inférieure à celle des réseaux haut débit ou des sites internet (graphique 2.7). Or ce sont ces mêmes TIC avancées qui sont à l'origine de la transformation numérique de la production industrielle.

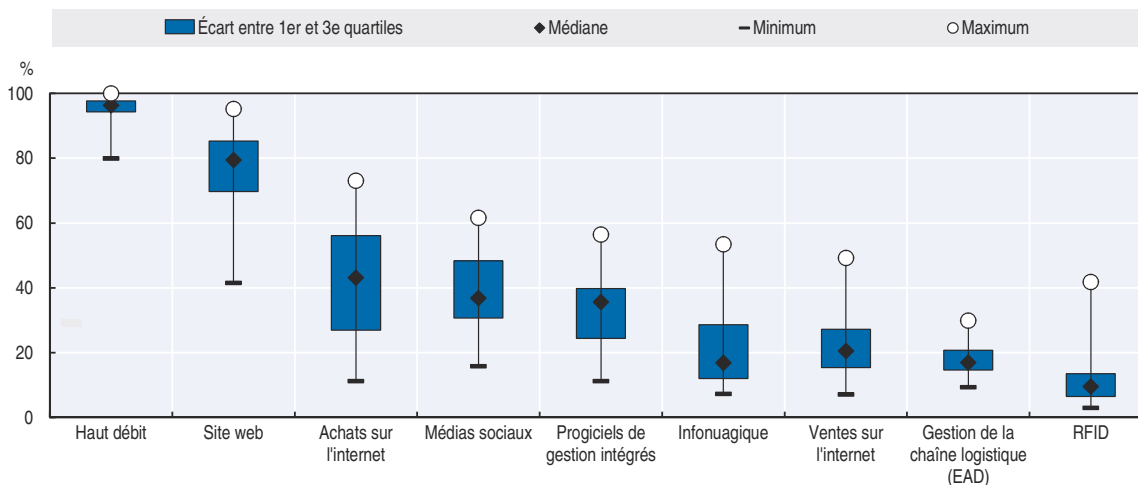
Parmi les freins à l'utilisation des TIC avancées dans les entreprises, citons notamment l'enfermement propriétaire²², souvent liés à l'utilisation de solutions propriétaires, l'absence de standards (ouverts), ou encore les risques de failles de sécurité (les grandes entreprises, en particulier, se disent préoccupées par la sécurité des données). En outre, il est souvent difficile pour les petites entreprises d'opérer des changements organisationnels, du fait des ressources limitées dont elles disposent, notamment de la pénurie de personnel qualifié.

L'identification des appareils constitue un aspect essentiel de l'interopérabilité. Le déploiement de l'IdO pourrait se heurter à un défi de taille : assurer l'interopérabilité entre

des identifiants hétérogènes. Et pour cause : l'IdO concerne des milliards d'objets qui sont connectés à des réseaux internet existants et doivent être adressables de manière unique.

Graphique 2.7. Diffusion d'une sélection d'outils et d'activités TIC dans les entreprises, 2015

En pourcentage des entreprises comptant au moins dix salariés



Source : D'après OCDE (2017b), OECD.Stat (base de données), http://dotstat.oecd.org/index.aspx?DatasetCode=ICT_BUS (consulté en mars 2017).
StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933679697>

Un autre problème lié à l'interopérabilité apparaît lorsque les utilisateurs tentent d'utiliser des appareils et des applications IdO émanant de fabricants et fournisseurs différents. Tel est le cas, notamment, si un utilisateur a recours à des applications IdO sur différents systèmes ou réseaux – par exemple, d'un pays à l'autre – transfert d'équipement – à l'instar de sa voiture – vers un nouveau fournisseur de services ou un nouveau réseau. Une étude du Forum économique mondial (FEM, 2015) confirme que l'absence d'interopérabilité figure parmi les trois principaux freins à l'adoption de l'IdO (après les préoccupations en matière de sécurité, mais avant les incertitudes quant à la rentabilité des investissements). Qui plus est, les faits montrent que la plupart des données générées par les capteurs ne parviennent pas jusqu'aux décideurs opérationnels en raison des problèmes d'interopérabilité (McKinsey Global Institute, 2015).

Des obstacles réglementaires peuvent également freiner l'adoption effective de certaines TIC. Ainsi, les entreprises recourant à l'IdO à grande échelle, comme les constructeurs automobiles, qui doivent pouvoir contrôler les cartes SIM équipant leurs produits, y sont empêchés dans de nombreux pays. Par conséquent, dès lors qu'une voiture est équipée d'une carte SIM appartenant à un réseau mobile, le constructeur ne peut quitter ce réseau pendant la durée de vie du produit. Les utilisateurs possédant de multiples équipements (parfois dénommés « utilisateurs aux millions d'appareils ») peuvent donc se retrouver liés par des contrats longs (allant souvent de 10 à 30 ans). Cela signifie en outre que lorsqu'une voiture franchit une frontière, l'utilisateur intensif du service se voit facturer par l'opérateur des frais d'itinérance élevés.

Faire face aux potentielles pénuries de qualifications

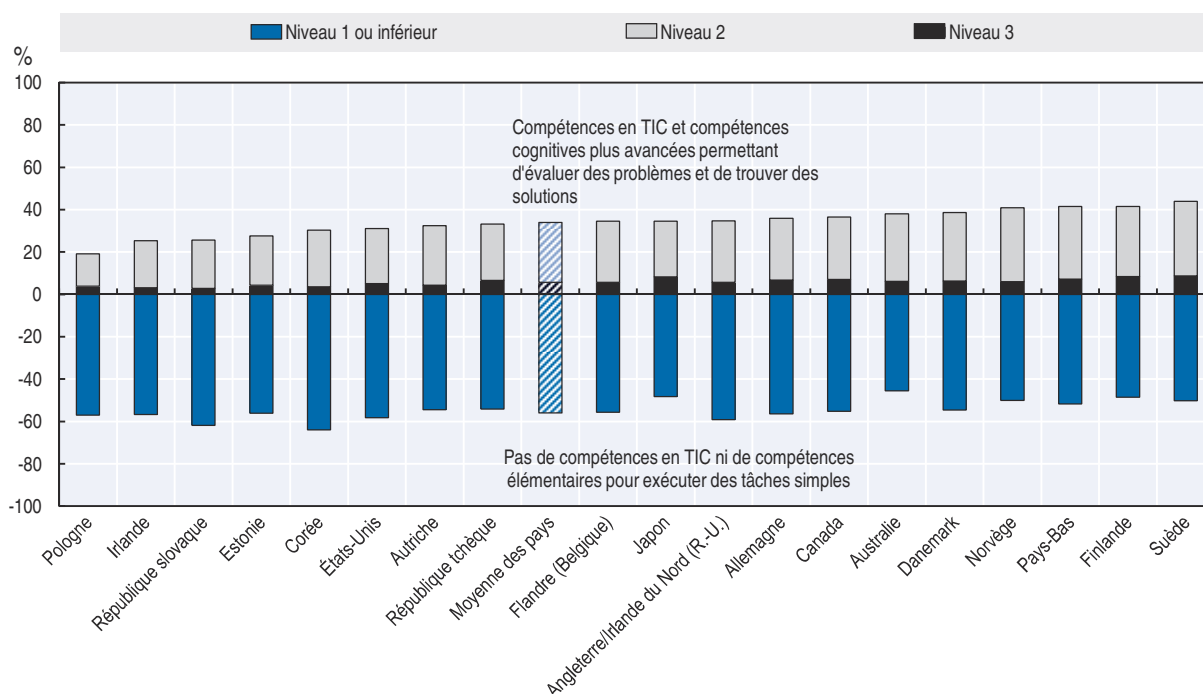
L'utilisation croissante des TIC avancées comme l'analyse des données renforce la demande de qualifications nouvelles. Or l'adoption des TIC peut être freinée par une pénurie de compétences spécialisées. Certaines enquêtes montrent en effet que le manque

de spécialistes des données est l'une des principales entraves au déploiement de l'analyse des données dans les entreprises. Aux États-Unis, depuis 1999, les emplois occupés par les personnes dotées de compétences TIC avancées sont parmi ceux qui ont connu la plus forte croissance en termes de salaire relatif, ce qui (conjugué à d'autres observations) laisse entrevoir une possible pénurie.

De nombreux pays peinent à développer les compétences nécessaires. Selon les données de l'OCDE, entre 7 % et 27 % des adultes des pays membres de l'Organisation n'ont aucune expérience de l'utilisation d'un ordinateur ou ne disposent pas des compétences les plus élémentaires. Seuls 6 % des habitants de la zone OCDE²³ présentent le niveau de compétences TIC « le plus élevé ». Dans des pays comme l'Autriche, les États-Unis, la Corée, l'Estonie, la République slovaque, l'Irlande et la Pologne, leur part est inférieure ou égale à 5 % (graphique 2.8).

Graphique 2.8. Niveau de compétence en résolution de problèmes dans des environnements à forte composante technologique, 2012

En pourcentage des 16-65 ans



Note : La résolution de problèmes dans des environnements à forte composante technologique nécessite des compétences informatiques de base (capacité à utiliser des outils et des applications TIC), ainsi que des compétences cognitives adaptées. Le niveau 1 ou en-dessous désigne les personnes ne disposant pas des compétences en TIC ni des compétences élémentaires qui leur permettraient d'exécuter des tâches simples ; les niveaux 2 et 3 regroupent les personnes possédant des compétences en TIC et des compétences cognitives plus avancées, et qui sont par conséquent capables d'évaluer les problèmes et de trouver des solutions.

Source : OCDE (2014b), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2014*, <http://dx.doi.org/10.1787/20747152>, d'après le Programme de l'OCDE pour l'évaluation internationale des compétences des adultes (PIAAC).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679716>

Les faits montrent par ailleurs que la situation géographique joue un rôle certain. De fait, la plupart des technologies liées aux données massives, à l'instar d'Hadoop, sont si récentes que peu d'experts disposent des connaissances ou de l'expertise suffisantes pour les exploiter ; qui plus est, les personnes dotées d'un niveau de compétences élevé tendent à se concentrer dans des régions comme la baie de San Francisco, aux États-Unis. Au vu de ces

observations, il convient d'interpréter avec précaution les statistiques relatives à l'emploi et aux compétences à l'échelle nationale, qui ne reflètent pas toujours la dynamique des marchés du travail ni les déficits de qualifications au niveau régional (ou infrarégional).

Il n'est pas rare que la pénurie de compétences techniques se traduise par une méconnaissance du potentiel productif des TIC. Sont particulièrement concernées les entreprises qui peinent à transformer leur organisation. Une étude récente (Hammermann et Stettes, 2016) consacrée à l'impact de la révolution numérique sur les compétences et l'emploi en Allemagne révèle que les capacités à planifier, à organiser, et à agir de manière autonome, conjuguée à l'expérience professionnelle dans une entreprise et un métier donnés, sont des conditions essentielles à la réussite de la transformation numérique des entreprises. En revanche, des études montrent également que la capacité à exploiter la valeur du numérique au service de l'avenir des entreprises fait souvent défaut. D'où l'absence d'une stratégie de transformation numérique à l'échelle des organisations. Kane et al. (2015), par exemple, observent que les jeunes entreprises tendent à se concentrer sur la technologie : ce faisant, elles utilisent les TIC – le cas échéant – non pas pour transformer leur organisation, mais uniquement pour améliorer leurs opérations. Seuls 52 % des entreprises qui utilisent les TIC de manière moins intensive (primo-adoptants) déclarent que la transformation de leur organisation fait partie intégrante de leur stratégie numérique.

Les données, nouvelle infrastructure pour la production du XXI^e siècle

Les données sont une ressource d'infrastructure. Elles constituent une forme de capital susceptible d'être utilisée pour un éventail théoriquement illimité d'usages. Les infrastructures physiques, comme les routes et les ponts, contribuent à accroître les retombées économiques de certaines activités, en favorisant notamment les échanges commerciaux et sociaux. L'utilisation des données produit elle aussi un effet d'entraînement sur l'ensemble de l'économie. Mais certaines retombées sont difficiles à observer ou à quantifier – il en est ainsi, par exemple, du renforcement de la confiance induit par la transparence et les applications fondées sur les données, qui s'appuient toutes deux sur les données ouvertes du secteur public. En conséquence, les pays risquent de ne pas investir suffisamment dans les données et l'analytique, et de réserver l'accès aux données à des usages plus limités que ce qui serait socialement optimal. Cela pourrait, par ricochet, compromettre leur capacité d'innovation, dont les données et leur analyse sont devenues une composante indispensable.

La valeur des données dépend du contexte dans lequel elles sont exploitées, de l'utilisation d'actifs complémentaires (comme les fonctions d'analytique et les autres données – ou métadonnées), ainsi que de leur degré de réutilisation. Il existe au moins trois moyens d'optimiser la valeur des données, à savoir :

- Améliorer la qualité des données afin d'en faciliter l'exploitation.
- Renforcer les capacités d'analyse des données en investissant dans les logiciels spécialisés, le savoir-faire et les compétences, ainsi que dans les données (ou métadonnées) complémentaires contribuant à enrichir les données existantes.
- Élargir l'accès aux données afin de tirer le meilleur parti de leur nature infrastructurelle (en tant qu'actif productif d'usage général non rival).

Dès lors que la valeur sociale dépasse la valeur privée des données, il devient bénéfique d'en élargir l'accès, en offrant par exemple un accès libre (non discriminatoire) via l'ouverture des données publiques, la portabilité des données ou le partage de données.

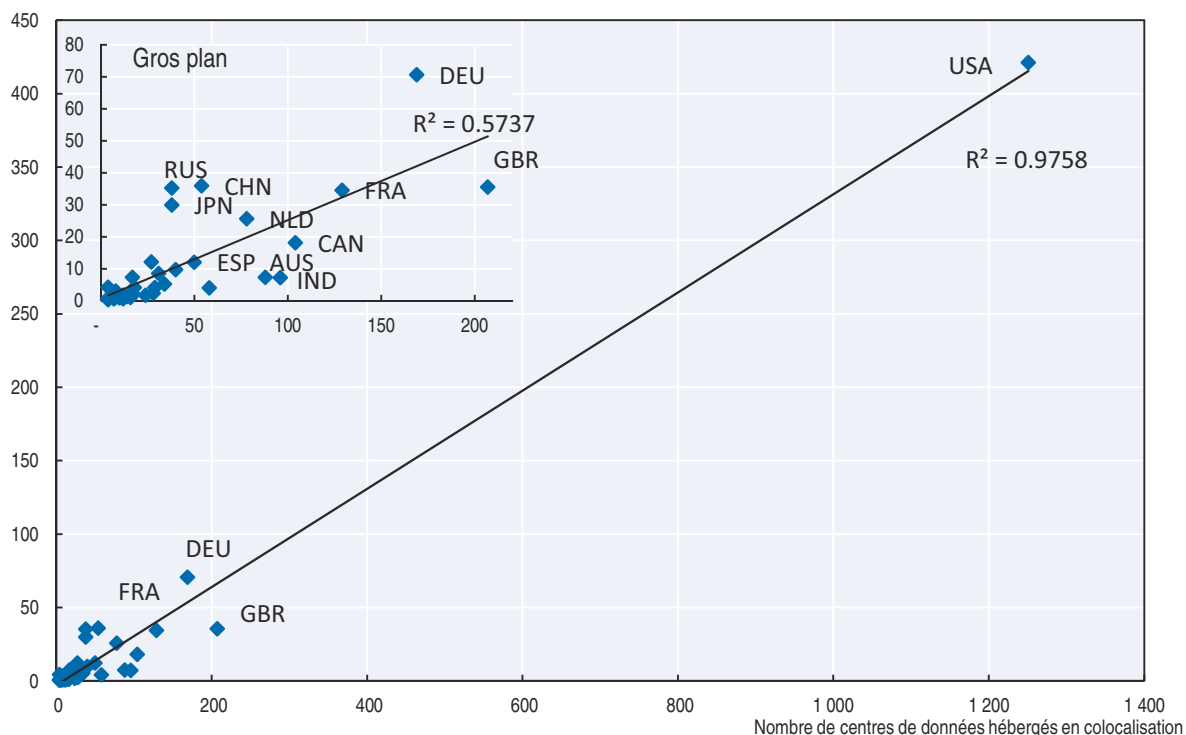
Préserver le caractère ouvert de l'internet pour les chaînes de valeur mondiales

On assiste à une multiplication des échanges et une augmentation de l'utilisation des données et des services numériques entre les secteurs et au-delà des frontières nationales. De fait, les entreprises tendent à fractionner leurs processus numériques – hébergement, stockage et traitement – dans différents pays.

Certes, on ignore la répartition exacte des services numériques à l'échelle internationale, ainsi que l'ampleur des flux transfrontières de données. En revanche, l'analyse des principaux sites internet mondiaux fait apparaître une concentration disproportionnée des services numériques aux États-Unis, qui représentaient à eux seuls plus de 50 % de l'ensemble des sites de renom hébergés dans la zone OCDE en 2013 (graphique 2.9). L'écart se resserre peu à peu avec le Canada, l'Allemagne, la France, l'Irlande, les Pays-Bas, le Japon et le Royaume-Uni, ainsi que la Chine, l'Inde et la Fédération de Russie, dont la contribution aux échanges mondiaux de services à forte intensité de TIC progresse.

Graphique 2.9. Classement des pays en fonction du nombre de centres de données hébergés en colocalisation et du nombre de sites de renom hébergés, 2013

Nombre de sites de renom hébergés (en milliers)



Sources : D'après Pingdom (2013), *The top 100 web hosting countries*, <http://royal.pingdom.com/2013/03/14/web-hosting-countries-2013/> (consulté le 19 mai 2015) et www.datacentermap.com (consulté le 27 mai 2014).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679735>

Les pays qui comptent le plus de sites internet de renom sont également ceux qui affichent le plus grand nombre de centres de données de colocalisation (centres de données partagés par plusieurs utilisateurs). C'est aussi là que l'on trouve les services à forte intensité de données. Les grands exportateurs de services numériques et les principales zones de concentration des services fondés sur les données constituent généralement les principales destinations des flux transfrontières de données. Par conséquent, les grands importateurs de

services basés sur les TIC de la zone OCDE sont aussi les principales sources d'échanges de données liées au commerce. Ces pays dépendent donc fortement des échanges transfrontières de données.

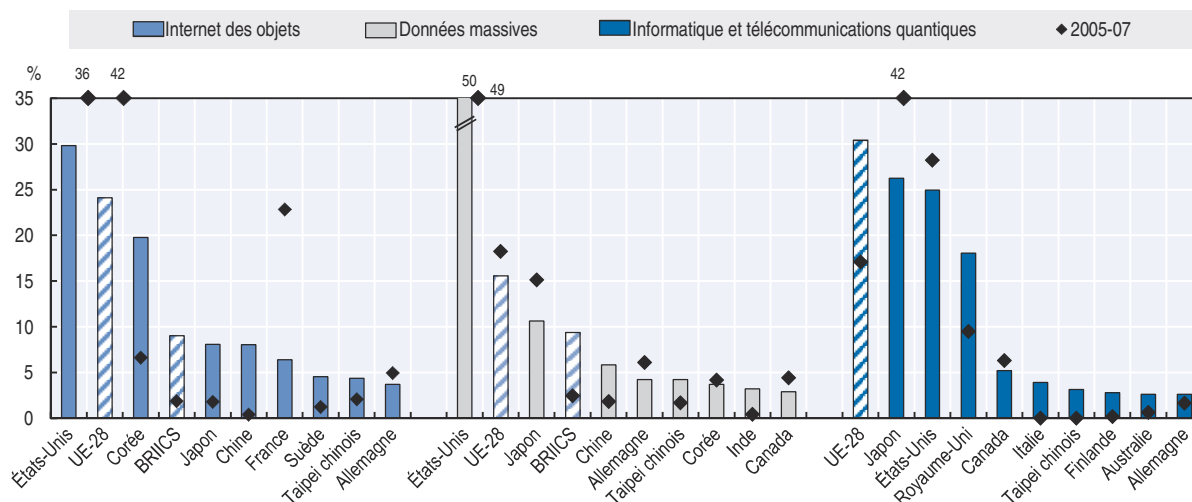
Stimuler les investissements dans la R-D sur les TIC clés génériques

La transformation numérique de la production industrielle nécessite d'investir dans la R-D axée sur les produits et services numériques, dont l'IdO, l'analyse des données et l'informatique. Les pays qui ont développé leurs capacités de manière à fournir et utiliser ces produits et services seront les mieux placés pour bénéficier des avantages du premier arrivé induits par cette transformation.

Les données afférentes aux dépôts de brevets internationaux témoignent de l'essor rapide des activités de création dans les technologies liées à la transformation numérique de la production industrielle. Pour preuve, depuis 2007, le nombre de dépôts de brevets dans les domaines de l'IdO, de l'analyse des données massives, et de l'informatique et des télécommunications quantiques a connu une croissance à deux chiffres. En 2012 – soit la dernière année pour laquelle on dispose de données –, le taux de croissance a dépassé 40 %. Toutefois, l'offre de technologies liées à l'innovation fondée sur les données reste concentrée dans une poignée d'économies. Les États-Unis arrivent en tête du nombre de brevets déposés ; suivent le Canada, la France, l'Allemagne, la Corée, le Japon et le Royaume-Uni, ainsi que la Chine (graphique 2.10).

Graphique 2.10. Principaux acteurs des technologies liées à l'IdO, aux données massives et à l'informatique quantique, 2005-07 et 2010-12

Part des économies dans les familles de brevets IP5 déposés auprès de l'USPTO et de l'OEB, dans une sélection de TIC



Source : OCDE (2015c), Science, technologie et industrie : Tableau de bord de l'OCDE 2015, http://dx.doi.org/10.1787/sti_scoreboard-2015-fr, d'après IPO (2014), Eight great technologies: the patent landscapes, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/360986/Eight_Great_Technologies.pdf (consulté en juin 2015).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679754>

Gérer les problématiques de responsabilité, de transparence et de propriété

L'analyse des données ouvre de nouveaux horizons en matière de prise de décision, avec des expérimentations rapides et économiques, souvent fondées sur des corrélations, et l'utilisation de l'IA dans les machines et les systèmes autonomes. À la clé, des perspectives d'accélération de la prise de décision et de gains de productivité.

Pour autant, les décisions fondées sur les données et l'intelligence artificielle ne sont pas infaillibles. Plusieurs causes possibles à cela : la qualité médiocre des données utilisées, une mauvaise utilisation des données et de l'analytique, ou une évolution inattendue de l'environnement dont les données sont issues. Il est arrivé, par exemple, que des comportements imprévus des systèmes de négociation algorithmique engendrent des pertes financières, comme ce fut le cas pour Knight Capital Group, qui a subi en 2012 une perte de 440 millions USD.

Le risque que de mauvaises décisions soient prises pose la question de l'attribution de la responsabilité entre les décideurs et les fournisseurs des données et des TIC. Une problématique exacerbée par les défis liés à la notion de propriété des données. À la différence d'autres biens immatériels, les données font généralement intervenir des attributions complexes de différents droits entre diverses parties prenantes. Lorsque les données sont considérées comme revêtant un caractère personnel, la notion de propriété pose problème, dans la mesure où la plupart des régimes de protection de la vie privée confèrent à la personne concernée des droits de contrôle explicites sur des données qui ne sont pas restreintes (voir par exemple le Principe de la participation individuelle, énoncé dans les *Lignes directrices régissant la protection de la vie privée et les flux transfrontières de données de caractère personnel*). Ainsi, les données générées à partir des compteurs intelligents sont considérées comme présentant un caractère personnel si elles renseignent sur la consommation électrique individuelle, ce qui va à l'encontre de tout droit de propriété exclusif que le propriétaire du compteur pourrait faire valoir sur ces données.

Alors que se généralisent les applications faisant appel à l'analyse des données et à l'IA, les utilisateurs doivent en connaître les limites. À défaut, ces applications pourraient avoir des conséquences économiques et sociales préjudiciables. Le problème est particulièrement prégnant quand les utilisateurs de ces applications ne sont pas suffisamment sensibilisés à la nécessité de minimiser les risques pour les tierces parties. Cela peut arriver lorsque l'analyse des données à caractère personnel profite en premier lieu au client de l'utilisateur d'une application et non aux personnes auprès desquelles les données ont été collectées.

Repenser les cadres d'action gouvernementale et réglementaire dans les domaines de la protection de la vie privée, des droits de propriété intellectuelle, de la concurrence et de la fiscalité

L'analyse des données massives, l'infonuagique et l'IdO pourraient poser des défis de taille en termes de protection de la vie privée, de protection des droits de propriété intellectuelle (DPI), de défense des consommateurs, de droit de la concurrence et de fiscalité. Or les cadres réglementaires en vigueur pourraient s'avérer dans certains cas inadaptés pour affronter ces nouveaux défis. Des efforts doivent donc être déployés pour évaluer les potentialités et les contraintes liées aux cadres existants, dans le contexte de la transformation numérique de la production industrielle.

La collecte de données exhaustive qui va de pair avec l'IdO pourrait donner lieu à des atteintes à la vie privée ; de fait, les progrès de l'analyse des données permettent parfois d'obtenir des informations sensibles, y compris à partir de données ne présentant pas un caractère personnel (telles que les métadonnées, par exemple). L'utilisation frauduleuse de ces renseignements peut menacer les valeurs et les principes sociaux fondamentaux, comme l'autonomie de l'individu, l'égalité et la liberté de parole. En outre, l'application des principes fondamentaux sur lesquels repose la protection de la vie privée (la définition des

données à caractère personnel et le rôle du consentement, par exemple) est mise à mal par les volumes, la vitesse et la variété des données collectées de toutes parts.

Qui plus est, l'innovation fondée sur les données pose un certain nombre de défis aux autorités chargées de la concurrence, qui doivent notamment :

- Définir le marché concerné – l'utilisation des données donne lieu à la création de marchés multiples ; les cyberplateformes comme Facebook et Uber en sont des exemples probants. Or l'approche traditionnelle de la définition des marchés est généralement centrée sur une seule de ces faces.
- Évaluer le degré de concentration du marché, ce qui nécessite d'analyser les prix du marché. Or une grande partie des produits fondés sur les données sont proposés soit « gratuitement » en contrepartie de l'accès aux données à caractère personnel, soit dans le cadre d'une offre groupée de services « premium ».
- Évaluer les préjudices que les consommateurs pourraient subir en cas d'atteinte à leur vie privée – les autorités de concurrence tendent à rediriger les questions propres aux problèmes de confidentialité vers les organismes chargés de la protection de la vie privée, qui, eux, ne sont pas compétents pour statuer sur les questions de concurrence (voir OCDE, 2015b).

Par ailleurs, l'utilisation transfrontalière des données et des TIC peut compliquer la tâche des administrations fiscales, qui peinent à déterminer le lieu où les activités imposables sont menées et où la valeur est créée (OCDE, 2015a). Avec, en filigrane, la difficulté de mesurer la valeur monétaire des données, d'en déterminer la propriété et d'obtenir une vision précise de la répartition et de l'interconnexion, à l'échelle mondiale, des services fondés sur les données.

Enfin, la convergence entre l'infrastructure de production et les TIC, ainsi que le rôle croissant des logiciels, confèrent aux droits de propriété intellectuelle (DPI) et, plus particulièrement, aux droits d'auteur, une place stratégique en tant que point de contrôle dans la production de demain. Des travaux menés récemment par l'OCDE (2015d) ont d'ores et déjà montré que, parmi les différents types de DPI, les droits d'auteur se démarquent sur plusieurs plans : l'ampleur des investissements qu'ils attirent, le taux de progression de ces investissements et la croissance de l'emploi qui s'ensuit. Le poids économique des droits d'auteur semble se renforcer. En particulier, dans la majeure partie des pays, ces droits protègent des volumes considérables d'investissements dans les logiciels.

Le rôle grandissant des DPI dans l'avenir de la production s'accompagne d'un certain nombre de défis. On s'inquiète notamment du fait que le contrôle des DPI stratégiques sur lesquels reposent aujourd'hui des écosystèmes entiers pourrait conduire à des comportements anticoncurrentiels. Et ce, malgré l'utilisation croissante de logiciels libres, qui ont contribué à atténuer certaines des contraintes auxquelles étaient confrontés jusqu'alors les utilisateurs des infrastructures informatiques (voir OCDE, 2015b). Par exemple, d'aucuns ont craint que le brevet US 7650331 B1 relatif à MapReduce²⁴, délivré à Google, n'entraîne des risques pour les entreprises qui s'appuient sur la mise en œuvre *open source* (code source libre) de MapReduce, telles que Hadoop ou CouchDB. Or, dans la mesure où Hadoop est aujourd'hui largement utilisé, y compris par des géants comme IBM, Oracle et bien d'autres, y compris Google, beaucoup considèrent que Google « a déposé ce brevet à des fins défensives » (Paul, 2010)²⁵. En concédant une licence à Apache Hadoop (librement accessible) dans le cadre de l'accord de licence *Apache Contributor License Agreement* (CLA), Google a officiellement apaisé les craintes d'une action en justice contre les projets Hadoop et CouchDB (Metz, 2010).

Les DPI pourraient également jouer un rôle dans un autre domaine lié aux systèmes de production fondés sur les TIC : les interfaces de programmation d'applications (API). La protection des droits d'auteur inhérents aux API pourrait en effet aider à lutter contre les applications non autorisées. Cette protection contribue non seulement à stimuler l'investissement et l'innovation dans les applications, mais aussi à promouvoir la cybersécurité, dans la mesure où les applications non autorisées peuvent être utilisées pour introduire des programmes malveillants dans les systèmes de production. Toutefois, certains experts craignent que la protection des droits d'auteur liés aux API ne pénalise la création et l'adoption de nouvelles applications, et que le contrôle des DPI n'induisse des comportements anticoncurrentiels²⁶. La tendance à la création d'API plus fermées inquiète donc une partie des acteurs dont les services innovants reposent sur les API libres.

Considérations intéressantes l'action des pouvoirs publics

À la lumière des thématiques examinées dans la section qui précède, un certain nombre de pistes d'action se dessinent. Elles peuvent être regroupées sous trois objectifs : promouvoir les investissements dans les TIC et les données, y compris dans les changements organisationnels complémentaires ; soutenir le développement des compétences et des qualifications à l'appui de la transformation numérique de la production ; et traiter les risques et incertitudes qui se font jour, qu'ils soient liés à l'utilisation des nouvelles technologies numériques ou aux lacunes des cadres réglementaires actuels.

Promouvoir les investissements dans les TIC et les données, et faciliter leur utilisation

- **Les gouvernements qui cherchent à favoriser l'offre de TIC clés devraient envisager de soutenir les investissements en faveur de la R-D axée sur les technologies génériques** comme l'analyse des données massives, l'infonuagique, l'informatique à hautes performances, l'IdO et les technologies renforçant la sécurité et la protection de la vie privée. Dans sa stratégie nationale pour l'économie numérique lancée en 2014, le Canada prévoit par exemple d'investir 15 millions CAD sur trois ans pour soutenir la recherche de pointe dans les technologies quantiques et la commercialisation des résultats de ces activités. La France entend quant à elle investir 150 millions EUR à l'appui de la R-D dans cinq technologies jugées stratégiques : l'IdO, le calcul intensif, l'infonuagique, l'analyse des données massives et la sécurité.
- **Les pouvoirs publics devraient envisager de prendre des mesures agissant sur la demande pour encourager les investissements en faveur des TIC clés génériques et leur adoption, en particulier dans les PME**, par le biais notamment d'activités de sensibilisation, de formation et de mentorat, ou via la mise en place de systèmes de bons (encadré 2.11). Ces mesures devraient également avoir pour objectif de stimuler l'investissement dans les formes complémentaires de capital intellectuel (CI), y compris dans le changement organisationnel (voir OCDE, 2016b). Les dispositifs agissant sur la demande devraient en outre être complémentaires des politiques (déjà en place) de stimulation de l'offre de TIC (à l'instar des programmes de R-D et des stratégies nationales de déploiement du haut débit). En Allemagne, par exemple, les politiques destinées à soutenir l'investissement dans la R-D liée aux applications industrielles des TIC, les activités de recherche sur la sécurité informatique, la microélectronique et les services numériques vont de pair avec des politiques d'action sur la demande mettant l'accent sur la sensibilisation et la formation (comme en témoignent les deux centres de solutions liées aux données massives créés à Berlin et à Dresde). Qui plus est, le

gouvernement allemand a rassemblé plus de 260 exemples de mises en œuvre réussies de projets de type Industrie 4.0 sur une carte interactive²⁷.

- **Les pouvoirs publics devraient mettre en place une combinaison de mesures (policy mix) en faveur de l'innovation afin d'encourager les investissements dans les données** (collecte, curation, réutilisation et couplage) ayant des retombées positives dans différents secteurs, tout en s'attelant à la problématique de la faible appropriation des avantages du partage des données. Sont concernées en premier lieu les données qui revêtent une valeur sociale supérieure à leur valeur privée. En ce qui concerne la question de l'appropriation des avantages du partage des données, il conviendrait d'approfondir la réflexion sur le recours à des solutions combinant droits de propriété intellectuelle (DPI), licences et mécanismes d'incitation alternatifs, tels que les citations de données, les dons de données ou les activités philanthropiques. Ces mécanismes alternatifs se sont révélés particulièrement efficaces dans les domaines de la science et de la recherche. Les chercheurs qui souhaitent donner plus de visibilité à leurs travaux peuvent ainsi publier des ensembles de données par le biais de mécanismes comparables à ceux qui existent déjà pour les citations d'articles scientifiques. Sachant toutefois que les citations de données ne bénéficient pas encore d'une large reconnaissance au sein de la communauté scientifique.
- **Il conviendrait de promouvoir le recours à des normes ouvertes, y compris pour les API et les formats de données.** On pourrait envisager de promouvoir les normes fondées sur des modèles de référence favorisant la concurrence et technologiquement ouverts, de manière à renforcer l'interopérabilité et la réutilisation des données, dynamiser les services numériques et réduire les verrouillages technologiques, tout en stimulant la concurrence entre les prestataires de services (voir OCDE, 2015a, chapitre 2). Par exemple, la stratégie du Royaume-Uni sur l'économie de l'information vise à « garantir le déploiement des principales normes fondamentales – afin d'aider les entreprises à mettre en place facilement des systèmes innovants qui restent ouverts à de nouvelles idées ». Pour ce faire, le gouvernement britannique s'attelle actuellement, par le biais de l'ETSI, du BSI et d'autres organismes de normalisation, à rassembler diverses parties prenantes afin d'assurer la cohérence entre les programmes, d'exploiter les connaissances existantes et de faire en sorte que le Royaume-Uni soit en position de devenir un acteur de poids dans la formulation des futures normes à l'échelle internationale. Le gouvernement allemand promeut quant à lui l'adoption de normes permettant de relier les industries traditionnelles et le secteur des TIC (encadré 2.11).

Encadré 2.11. Exemples d'initiatives publiques destinées à favoriser l'adoption des TIC par les PME

De nombreux gouvernements ont pris des mesures afin d'inciter les PME à adopter les TIC, soit dans le cadre de leur stratégie numérique nationale, soit au titre de stratégies et de programmes distincts. Ces initiatives sont généralement motivées par le constat que l'insuffisance des connaissances et des ressources financières, ainsi que les obstacles freinant le changement organisationnel, peuvent compromettre l'utilisation efficace des TIC. Les petites entreprises qui, trop souvent, ne disposent pas de services informatiques en interne ni de savoir-faire maison, sont les premières concernées. De fait, elles ne possèdent pas les ressources – financières et autres – nécessaires pour investir dans les TIC ou faire appel à des prestataires de services extérieurs. Les initiatives destinées aux PME portent pour la plupart sur : la sensibilisation et la formation, souvent axées sur le

Encadré 2.11. Exemples d'initiatives publiques destinées à favoriser l'adoption des TIC par les PME (suite)

développement du savoir-faire lié aux TIC et, parfois, aux aspects organisationnels ; l'aide financière ; et les réseaux sociaux.

Au Canada, par exemple, la Banque de développement du Canada (BDC) a repensé son soutien aux PME en 2011, de manière à mettre l'accent sur l'adoption des TIC. Son action s'articule autour de trois phases :

- sensibilisation, par le biais notamment de livres et d'articles numériques, de témoignages et de récits d'expériences réussies, et d'évaluations gratuites de la situation, sur le plan technologique, de certaines entreprises par rapport à d'autres PME canadiennes
- soutien financier afin de permettre aux PME de bénéficier de services de conseil destinés à les aider à adapter les solutions TIC à leurs activités, et, plus spécifiquement, à surmonter les obstacles financiers
- crédits pour l'achat de matériel, de logiciels et de services de conseil (avec un budget de 200 millions CAD).

L'intérêt suscité par ces mesures et leur utilisation ont dépassé les attentes. Au cours des 18 premiers mois qui ont suivi leur mise en place, soit entre octobre 2011 et mai 2013, près de 220 000 visiteurs ont consulté le site SmartTech de la BDC ; les deux livres numériques ont été téléchargés à plus de 10 000 reprises ; et la BDC a réalisé plus de 35 000 évaluations en ligne, environ 900 évaluations des solutions TIC et plus de 300 missions de conseil. En outre, la BDC a accordé en moyenne 130 crédits TIC par mois. En revanche, elles ne s'adressent qu'à un segment réduit spécifique du marché canadien des PME, et de nombreuses autres entreprises gagneraient à bénéficier de ces services.

Autre exemple, l'initiative *Mittelstand-Digital* (ou « PME numériques ») a été mise en place en Allemagne par le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWi). Elle vise à montrer aux PME et aux artisans qualifiés l'importance de recourir à des logiciels pour gérer les processus métier, et les aider à amorcer la transformation numérique de leurs activités. L'initiative s'articule autour de trois piliers :

- **Mittelstand 4.0 – production et processus de travail numériques** : ce pilier vise à aider les PME et les artisans qualifiés à opérer la transformation numérique de leurs processus métier et à déployer les applications de l'Industrie 4.0 via des centres de compétences. Des efforts sont notamment entrepris pour sensibiliser aux opportunités et aux défis, développer les compétences technologiques et organisationnelles, et offrir des possibilités de démonstration et de test.
- **Simplement intuitif – facilité d'utilisation pour les PME** : l'objectif est de fournir des mécanismes d'aide au développement et au test afin que les PME puissent améliorer la qualité et l'ergonomie des logiciels de gestion et de production. Ce pilier trouve sa justification dans le constat suivant : l'intuitivité est globalement absente des logiciels utilisés par les PME, alors qu'elle est devenue une composante essentielle des solutions destinées aux utilisateurs particuliers.
- **Standards numériques – standardiser les processus métier, pour une mise en œuvre réussie** : il s'agit là de développer un langage commun aux PME et aux différents domaines d'activité de manière à faciliter l'échange de données. Ce pilier s'appuie sur le constat que les PME doivent supporter des coûts initiaux considérables si elles souhaitent utiliser et mettre en œuvre les standards numériques.

L'initiative *Mittelstand-Digital* montre l'importance de la confiance des PME. Les informations officielles fournies par le gouvernement fédéral, exemptes de tout parti pris,

Encadré 2.11. Exemples d'initiatives publiques destinées à favoriser l'adoption des TIC par les PME (suite)

recueillent une large adhésion, contrairement à celles émanant des consultants informatiques ayant un intérêt commercial, qui reçoivent un accueil plus frileux. La création de réseaux de parties prenantes, qui offrent aux entrepreneurs la possibilité d'apprendre de leurs expériences respectives, a contribué à susciter l'adhésion des PME.

Autre exemple : en Corée, 17 centres d'innovation et d'économie créative ont été créés à l'échelle nationale pour promouvoir l'innovation par le numérique. Un nombre important de centres concentrent leurs efforts sur l'innovation au service de la transformation numérique de la production. Les autorités locales et les grandes corporations coréennes (SKT, Hyundai-Kia, GS, Doosan, LG, Samsung et Lotte, par exemple) gèrent conjointement les centres régionaux. Ceux-ci prennent en charge diverses tâches, à savoir : soutenir les start-ups et les PME dans les différents domaines de spécialité, organiser les partenariats ou la collaboration sur le plan écologique entre les grandes corporations et les entreprises régionales, les aider à surmonter d'éventuelles difficultés financières, encourager l'innovation managériale et technologique et les services de conseil (à travers le tutorat), promouvoir la communication et la coopération entre les participants, et explorer de nouveaux marchés, sur le territoire national comme à l'étranger.

Source : OCDE (2016b), *Stimulating digital innovation for growth and inclusiveness: The role of policies for the successful diffusion of ICT*, <http://dx.doi.org/10.1787/5j1wqvhg3l31-en>.

Soutenir le développement des compétences et des qualifications à l'appui de la transformation numérique de la production

- Les systèmes éducatifs nationaux, en collaboration avec les entreprises et les syndicats, doivent favoriser le renforcement des compétences dans le domaine des TIC, à commencer par les compétences informatiques de base, jusqu'aux compétences spécialisées en matière de données. Les besoins de formation en la matière ne se limitent pas aux TIC, mais englobent la science, les technologies, l'ingénierie et les mathématiques (STIM). Pour y répondre, il convient de prendre des mesures pour : insuffler une culture numérique dans les établissements scolaires ; développer la formation professionnelle et la formation en cours d'emploi ; et relier les domaines d'enseignement, par le biais, par exemple, de la mise en place d'alliances stratégiques entre universités et entreprises, ou de centres de compétences interdisciplinaires. C'est ainsi qu'en Allemagne, deux centres de solutions liées aux données massives ont été créés, à Berlin et à Dresde, dans le cadre de la stratégie nationale pour l'économie numérique (Programme numérique 2014-17).
- **Les seules compétences techniques ne suffisent pas.** Elles doivent être complétées par des connaissances propres à des domaines particuliers (maîtrise de l'intégralité du processus de production, par exemple) et par des compétences plus générales de savoir-être comme la communication, l'autonomie, la réflexion créative et la résolution de problèmes. La demande de compétences non techniques continuera de progresser avec la diffusion des technologies numériques et l'émergence de nouveaux modèles économiques qui transforment les modes de travail (OCDE, 2016d). Ces compétences sont indispensables pour faire face aux effets des technologies qui bouleversent les secteurs existants. De fait, les travailleurs peu qualifiés sont davantage susceptibles d'être victimes de suppressions d'emplois ; d'où l'importance d'améliorer leurs compétences non techniques afin de les aider à s'adapter à de nouveaux métiers et de nouveaux

environnements professionnels. Entreprises et partenaires sociaux ont également un rôle essentiel à jouer, comme le montrent les exemples de bonnes pratiques en matière de mise en œuvre de la formation et de développement des qualifications dans les entreprises, publiés par le gouvernement allemand²⁸.

Traiter les risques et les incertitudes qui font surface

- **Les pouvoirs publics peuvent être amenés à prendre des mesures si les incertitudes réglementaires empêchent l'adoption des TIC.** Tel est notamment le cas lorsque les réglementations conçues pour l'ère pré-numérique ont pour effet involontaire de protéger les entreprises en place contre la concurrence créée par l'avènement des nouvelles technologies, ce qui pourrait mettre à mal les efforts d'innovation par le numérique (voir OCDE, 2017a). Dans le cas de l'IdO, par exemple, la suppression des obstacles réglementaires à l'entrée sur le marché des communications mobiles permettrait aux « utilisateurs aux millions d'appareils » (à l'instar de certains constructeurs automobiles) de s'affranchir du réseau mobile, d'où un renforcement de la concurrence (voir OCDE, 2016a). Autre exemple, dans le secteur de l'automobile et des services de mobilité, les réglementations applicables aux taxis peuvent ralentir la diffusion des applications de mobilité (y compris de covoiturage) et appeler des réexamens et des réformes afin d'autoriser le maintien de ces services basé sur des applications. Dans la même veine, les cadres réglementaires existants empêchent souvent le déploiement de solutions techniques, pourtant disponibles, pour les camions autonomes.
- **Les pouvoirs publics devraient insuffler une culture de la gestion du risque numérique,** comme le préconise la *Recommandation de l'OCDE de 2015 sur la gestion du risque de sécurité numérique pour la prospérité économique et sociale*. À défaut, les parties prenantes continueront d'aborder la sécurité selon une approche traditionnelle qui, non seulement, ne protège pas pleinement les actifs dans l'environnement numérique actuel, mais risque également d'étouffer l'innovation et la croissance (voir OCDE, 2016c). Les obstacles à l'instauration d'une culture de la gestion du risque numérique dans les entreprises, en particulier les PME, sont généralement le manque de savoir-faire en la matière et la croyance – à tort – que la sécurité numérique est une question (technique) liée à la gestion informatique qui ne relève pas de la gestion d'entreprise. Pour y remédier, les pouvoirs publics ont donc donné la priorité à la sensibilisation, la formation et l'éducation dans ce domaine. En France, par exemple, la stratégie nationale pour la sécurité numérique prévoit que le secrétariat d'État au Numérique coordonne, en collaboration avec les ministères concernés et avec le soutien de l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI), la mise en place d'un programme de sensibilisation à la cybersécurité à l'intention des professionnels.
- **Les entraves à l'ouverture de l'internet, légitimes ou non, peuvent limiter les effets de la transformation numérique et nécessiter l'intervention des pouvoirs publics.** Les obstacles les plus fréquents sont liés aux moyens techniques (filtrage des paquets IP, par exemple), utilisés notamment pour optimiser les flux de données pour des besoins particuliers, et aux efforts de « localisation des données » (à l'instar du routage territorial ou de l'obligation légale d'implanter les serveurs sur les marchés locaux). Les effets limitatifs des obstacles à l'ouverture de l'internet sont particulièrement marqués dans les économies présentant un faible déploiement des services fondés sur les données, en raison du dysfonctionnement des marchés d'infrastructures TIC. Néanmoins, comme le montre OCDE (2016e), l'ouverture peut elle aussi présenter des dangers, en particulier si

elle est mise au service d'activités malveillantes. Les obstacles résultant de pratiques d'entreprises ou de politiques publiques peuvent donc avoir un fondement juridique (tel que la protection de la vie privée et des DPI), ou répondre à un impératif de sécurité. Les gouvernements qui cherchent à promouvoir les échanges de services numériques devraient s'inspirer des dispositions de la *Recommandation de 2011 du Conseil de l'OCDE sur les principes pour l'élaboration des politiques de l'Internet*. Ces principes visent à préserver le caractère fondamentalement ouvert de l'internet et la libre circulation de l'information.

- **Il conviendrait d'examiner les obstacles à la réutilisation, au partage et à la connexion des données.** Ces obstacles peuvent être d'ordre technique ; tel est le cas des contraintes limitant la lisibilité des données par les machines selon les plateformes. Ils peuvent également être d'ordre juridique. Il en est ainsi, par exemple, des clauses de « rétention des données » qui figurent dans de nombreux contrats de service, en particulier si elles « sont utilisées pour facturer des frais supplémentaires aux clients ou les empêcher de changer de fournisseur » (Becker, 2012)²⁹. Une réflexion devrait être engagée sur l'accès non discriminatoire aux données (ou « accès dans des conditions d'égalité »), notamment concernant le partage de données ou données ouvertes, ainsi que sur la portabilité des données, que ce soit pour des utilisateurs ou des applications. Il est important lorsqu'il s'agit de la production de biens présentant des avantages publics et sociaux, que les pouvoirs publics ou les entreprises n'aient pas à choisir les « gagnants » – que ce soient des utilisateurs ou des applications – (encadré 2.12).
- **Des cadres cohérents de gouvernance des données devraient être mis en place.** L'accès aux données ne doit pas être nécessairement gratuit ou non réglementé : il importe de trouver un juste équilibre entre, d'une part, l'ouverture des données (et les avantages sociaux qui résultent de l'amélioration de l'accessibilité et de la réutilisation des données) et, d'autre part, les préoccupations légitimes des personnes dont la vie privée et les DPI peuvent être compromis. La mise en œuvre et le contrôle de la gouvernance des données et des cadres régissant les DPI ne sauraient donc se faire sans une démarche associant l'ensemble de l'administration. Pour l'heure, aucun consensus n'a été trouvé sur un cadre de gouvernance des données à l'appui de la réutilisation, du partage et du couplage des données dans les différents secteurs. Ce cadre devrait permettre de résoudre un certain nombre de problématiques telles que la responsabilité, la propriété des données, la curation et la réutilisation des données à des fins autres que celles prévues initialement. Dans le cadre des transactions entre entreprises, ces questions pourraient être traitées par le biais d'accords contractuels bilatéraux (comme c'est d'ailleurs souvent le cas). L'établissement de standards et de bonnes pratiques n'en reste pas moins nécessaire pour limiter l'exposition au risque numérique au sein des chaînes logistiques.
- **Les pouvoirs publics peuvent chercher à encourager l'utilisation responsable des données à caractère personnel pour empêcher les violations de la vie privée.** Ils pourraient envisager de promouvoir les technologies renforçant la protection de la vie privée et de favoriser l'autonomisation des individus en améliorant la transparence du traitement et la portabilité des données, par le biais d'initiatives comme *midata* (au Royaume-Uni) et *MesInfos* (en France). Peut-être devront-ils améliorer l'efficacité des autorités chargées de l'application des règles de protection de la vie privée (en les dotant de moyens et de compétences techniques). Les réglementations en matière de protection des données devraient avoir pour objectif d'assurer une protection optimale de la vie privée et être faciles à mettre en œuvre, de manière à favoriser l'adoption la plus large possible.

Encadré 2.12. Les données ouvertes au service de l'amélioration des performances agricoles : l'exemple du Département de l'Agriculture des États-Unis (USDA)

Les données irriguent de plus en plus l'agriculture, à tel point que les agriculteurs en ont aujourd'hui besoin pour être compétitifs. Les débutants, qui ne disposent pas toujours de données historiques, pourraient donc être pénalisés.

Pour remédier à cette situation, le Département américain de l'Agriculture a ouvert l'accès à ses données. Sont concernées notamment les données relatives à l'offre alimentaire, la demande économique et celles issues de la télédétection, qui sont publiées par le Service national des statistiques agricoles des États-Unis (National Agricultural Statistical Service, NASS) et son Service de recherche économique (Economic Research Service, ERS). De nombreux ensembles de données couvrent les 100 dernières années et sont accessibles par le biais d'API. Le NASS propose par exemple l'API CropScape, qui permet d'accéder directement à une image matricielle intégrant une classification des terres cultivées à des fins agricoles, publiée une fois par an, à la fin de la saison de croissance, ainsi que l'API VegScape, qui permet de visualiser une image matricielle de l'état de la végétation, actualisée toutes les deux semaines et ce, tout au long de l'année. L'USDA publie également les données de l'ERS sur les pratiques de financement agricole et de production végétale, notamment sur les pratiques et les coûts de production (utilisation d'engrais et de pesticides, main-d'œuvre, travail du sol et semences) et sur les ressources financières des entreprises agricoles, ainsi qu'un éventail d'informations financières et démographiques (âge, éducation, profession, revenus non agricoles) relatives aux exploitants agricoles et à leur foyer.

Pour promouvoir la réutilisation des données, l'USDA a lancé, en collaboration avec Microsoft, la compétition *Innovation Challenge*, un marathon de programmation axé sur le développement d'applications logicielles fondées sur les données. L'objectif est d'examiner les effets que pourraient avoir les changements climatiques sur la résilience des systèmes alimentaires aux États-Unis. Des récompenses d'une valeur de 63 000 USD ont été attribuées aux applications qui utilisent les données de l'USDA pour fournir des éclairages utiles aux agriculteurs, aux entreprises agricoles, aux chercheurs ou aux consommateurs américains. L'une des applications primées, dénommée *FarmPlenty Local Crop Trends*, permet aux agriculteurs d'identifier les meilleures cultures en consultant les cultures environnantes, les tendances et les prix : « Ces informations aident les agriculteurs à mieux appréhender quelles cultures tendent à se développer ou, au contraire, à se raréfier dans leur région, et à anticiper l'évolution des prix et de la demande »¹.

1. Voir <http://devpost.com/software/farmplenty-local-crop-trends> (consulté le 15 janvier 2017).

- **Les pouvoirs publics devront peut-être évaluer la concentration des marchés et les obstacles à la concurrence** au moyen de définitions actualisées des marchés visés et en tenant compte du préjudice causé aux consommateurs victimes d'atteintes à la vie privée. Cela pourrait passer par l'instauration d'un dialogue entre les autorités chargées de la réglementation (en particulier dans les domaines de la concurrence, de la protection de la vie privée et de la défense des consommateurs), comme évoqué dans OCDE (2015a, chapitre 2).
- **Il est nécessaire d'approfondir la réflexion sur l'attribution de la responsabilité en cas de décisions inadéquates fondées sur les données.** Les pouvoirs publics pourraient avoir à vérifier si les réglementations et lois en vigueur répondent pleinement à la

question de l'attribution de la responsabilité (entre les décideurs et les fournisseurs des données et des fonctions analytiques) lorsque les décisions fondées sur les données s'avèrent préjudiciables. L'instauration d'un dialogue multipartite aux niveaux national et international pourrait favoriser les échanges de bonnes pratiques et aider à la mise au point d'approches compatibles face à ces défis.

- **Il convient d'examiner avec attention le bien-fondé d'une prise de décision entièrement automatisée, des exigences de transparence et de la nécessité de l'intervention humaine dans les domaines où les décisions peuvent être à l'origine d'importants préjudices.** Les responsables de l'action publique devraient avoir à l'esprit qu'il pourrait être nécessaire d'étendre les exigences de transparence aux processus et algorithmes qui sous-tendent la prise de décision automatisée. Sachant toutefois que ces exigences de transparence pourraient aller à l'encontre des DPI, ainsi que des processus et algorithmes qui se trouvent au cœur des opérations de certaines entreprises. D'autres études doivent être réalisées afin de déterminer comment évaluer au mieux le bien-fondé des algorithmes, tout en respectant les DPI qui s'y appliquent.
- **Les pouvoirs publics pourraient devoir encourager l'amélioration du système de mesure afin de mieux évaluer la valeur économique des données et d'empêcher l'érosion de la base d'imposition et le transfert des bénéfiques.** L'érosion de la base d'imposition et le transfert de bénéfiques est le fait d'une planification fiscale agressive par des entreprises cherchant à réduire artificiellement leur revenu imposable ou à transférer des bénéfiques vers des territoires à faible imposition en tirant parti du caractère immatériel des données et, par là même, de la facilité de les transférer d'une juridiction à l'autre (voir OCDE, 2015a, chapitre 2).

Notes

1. On considère que les TIC avancées, à l'instar des progiciels de gestion intégrés, stimulent la compétitivité des entreprises dans la mesure où elles leur permettent de synchroniser les processus métier internes et de disposer de données en temps réel susceptibles d'étayer leurs décisions de gestion. De ce fait, elles contribuent à réduire les obstacles structurels entre les départements et favorisent la collaboration et l'innovation (pour une quantification des effets bénéfiques des investissements dans les PGI sur les performances des entreprises, voir Hitt et Zhou, 2002).
2. Rolls-Royce s'appuie sur les données massives pour réduire le temps d'arrêt de ses moteurs. Les fonctions analytiques embarquées sur ses systèmes transmettent uniquement les données qui dévient de la normale. Ses équipes sont donc en mesure de surveiller les moteurs en fonctionnement, et d'intervenir rapidement, avant que les problèmes ne prennent une ampleur telle qu'ils pourraient entraîner une interruption de service. Cette approche, qui va dans le sens des contrats de service *Power by the Hour* mis en place par Rolls-Royce, permet à l'entreprise de vendre ses moteurs non plus comme un produit, mais comme un service (Michelin a mis en place une offre similaire, baptisée *kilometre by the hour*).
3. Cela représente une croissance annuelle moyenne (en glissement annuel) de 1.7 %. Ce résultat est obtenu en additionnant les gains de valeur supplémentaire attendus dans chacun des secteurs : mécanique (23 milliards EUR à un taux de croissance en glissement annuel attendu de 2.21 %), équipements électriques (13 milliards EUR, + 2.21 %), automobile (15 milliards EUR, + 1.53 %), produits chimiques (12 milliards EUR, + 2.21 %), agriculture (3 milliards EUR, + 1.17 %) et TIC (14 milliards EUR, + 1.17 %).
4. Le graphique 2.3 étant extrêmement schématisé, les relations complexes et les interactions entre ces technologies ne sont pour la plupart pas représentées.
5. Toutefois, ces estimations ne peuvent être généralisées et ce, pour diverses raisons. Premièrement, les effets attendus de l'innovation fondée sur les données varient d'un secteur à l'autre et sont tributaires de facteurs extérieurs tels que la disponibilité des compétences et des qualifications, ainsi que la disponibilité et la qualité des données utilisées (pertinence et délai de production).

Deuxièmement, ces études sont souvent sujettes à des biais de sélection. Par exemple, on ignore si les entreprises qui recourent à l'innovation fondée sur les données ont gagné en productivité de ce fait, ou si elles étaient, dès l'origine, plus productives. Enfin, ces études vérifient rarement si certaines entreprises ont subi des pertes de productivité en se tournant vers l'innovation fondée sur les données, et ont, par conséquent, interrompu leurs investissements dans ce domaine.

6. Cette estimation s'appuie sur les données de valeur ajoutée par secteur du Bureau of Economic Analysis des États-Unis. Elles sont issues de la base de données *GDP by Industry* (www.bea.gov/iTable/iTable.cfm?ReqID=51&step=1#reqid=51&step=51&isuri=1&5114=a&5102=1).
7. L'étude de l'université Fort Hays a été réalisée à l'aide d'un outil d'estimation mathématique. Elle a porté sur 1 445 parcelles, pour une superficie totale de 135 755 acres réparties sur trois États.
8. En matière d'infonuagique, on distingue trois modèles de services différents, selon les ressources mises à disposition : les infrastructures en tant que services (IaaS) proposent aux utilisateurs des ressources brutes gérées et évolutives, comme des capacités de stockage et de calcul ; les plateformes en tant que services (PaaS) fournissent des ressources informatiques (toute la pile logicielle) via une plateforme sur laquelle des applications et des services peuvent être développés et hébergés ; enfin, les logiciels en tant que services (SaaS) sont des applications s'exécutant dans une infrastructure en nuage. Les « nuages » peuvent également être classés par type (privé, public ou hybride), selon leur appartenance et leur mode de gestion.
9. Suite à ces simulations, Ford a, par exemple, opté pour des châssis en aluminium, synonymes de réductions de coûts et de hausse de la rentabilité. Selon certaines sources, Ford dégagerait 50 % de profits sur ses nouveaux modèles F-150.
10. Un rapport publié par une organisation de parties prenantes révèle qu'à l'horizon 2020, les avantages liés à l'IdO pourraient atteindre 2 000 milliards USD ; 1 000 milliards USD pourraient correspondre à des réductions de coûts (grâce à l'utilisation de compteurs intelligents, sachant que les estimations tablent sur 1.1 milliard de dispositifs en fonctionnement d'ici à 2022) et 1 000 milliards USD à l'amélioration de services tels que la télésurveillance des patients souffrant de maladies chroniques. Une analyse va encore plus loin, en annonçant pour la seule industrie automobile des économies annuelles de plus de 5 600 milliards USD à l'échelle mondiale, grâce à l'utilisation de technologies avancées de connectivité dans les voitures (véhicules semi-autonomes ou entièrement autonomes).
11. Les véhicules sans conducteur comme ceux mis au point par Google s'appuient sur la collecte des données émises par l'ensemble des capteurs connectés à la voiture (notamment par les caméras vidéo et les systèmes de radars), alliées aux données Google Maps et Google Street View (qui fournissent des informations sur les points de repère, ou encore les panneaux et les feux de signalisation).
12. Une entreprise qui investit 1 million USD dans le déploiement d'un logiciel de gestion à grande échelle doit supporter un coût ponctuel qui ne peut être récupéré par la suite.
13. Voir www.mckinsey.com/industries/high-tech/our-insights/disruptive-trends-that-will-transform-the-auto-industry (consulté le 15 janvier 2017).
14. Si les entreprises de l'internet figurant dans le classement des 250 premières entreprises TIC affichaient un chiffre d'affaires annuel moyen par salarié supérieur à 1 million USD en 2012, et dépassant 800 000 USD en 2013, les autres entreprises TIC de ce classement généraient quant à elles entre 200 000 USD (pour les entreprises prestataires de services informatiques) et 500 000 USD (pour les éditeurs de logiciels) (OCDE, 2015b).
15. Comme l'expliquent Mayer-Schönberger et Cukier (2013), mettre en données un phénomène consiste à le convertir dans un format quantifié de manière à pouvoir le présenter dans des tableaux et l'analyser.
16. On parle en anglais d'*infotainment*, mot-valise formé à partir d'*information* et d'*entertainment* (divertissement). Un système d'information récréative installé à bord d'un véhicule peut prendre en charge diverses tâches : gestion et diffusion de contenu audio, assistance à la conduite grâce aux fonctions de navigation, divertissement des passagers arrière, avec des films, des jeux ou l'accès aux réseaux sociaux, réception audio et envoi de SMS, appels téléphoniques, ou encore accès à des contenus via l'internet ou sur smartphone, des conditions de trafic aux résultats sportifs, en passant par les prévisions météorologiques (Beal, 2016).
17. Daimler reste considéré comme l'un des constructeurs automobiles leaders dans le domaine des voitures (semi-) autonomes. En janvier 2015, il a dévoilé, à l'occasion du *Consumer Electronics Show* de Las Vegas, son modèle Mercedes F 015, qui a rejoint seul son emplacement dans le hall d'exposition.

18. L'agriculture sous contrat désigne la production agricole réglementée par un accord entre un acheteur et un producteur qui fixe les conditions relatives à la production et à la commercialisation d'un ou de plusieurs produit(s) agricole(s). En règle générale, l'agriculteur s'engage à fournir les quantités convenues d'un produit agricole donné (FAO, 2012).
19. On estime que d'ici à 2030, 8 milliards de personnes et quelque 25 milliards d'équipements « intelligents » actifs seront interconnectés et interagiront au sein d'un unique réseau informatique colossal, ce qui conduira à l'émergence d'un « superorganisme » intelligent dont l'internet représentera le « système nerveux numérique mondial » (Radermacher et Beyers, 2007 ; O'Reilly, 2014).
20. Par exemple, on estime que les employés des entrepôts d'Amazon au Royaume-Uni parcourent entre 11 et 24 kilomètres par jour (O'Connor, 2013).
21. Le système n'est opérationnel qu'après modélisation de l'emplacement de l'ensemble des produits stockés dans l'entrepôt, ainsi que des déplacements et possibilités de distribution les plus efficaces.
22. Comme l'explique Perkins (2003), la notion de verrouillage est essentiellement liée au fait que les technologies et les systèmes technologiques suivent des trajectoires particulières qu'il est difficile et coûteux de ne pas suivre. C'est pourquoi ces systèmes tendent à perdurer dans le temps, même si des solutions de remplacement potentiellement meilleures viennent les concurrencer. Les verrous joueraient donc un rôle certain dans l'utilisation persistante de technologies jugées inférieures, du clavier AZERTY au moteur à combustion interne.
23. En 2013, l'investissement TIC dans la zone OCDE a représenté 13,5 % de l'investissement fixe total, ou 2,7 % du PIB ; plus des deux tiers de l'investissement TIC portait sur des logiciels et des bases de données.
24. MapReduce est un environnement de programmation conçu pour traiter des ensembles de données volumineux de façon distribuée, présenté par Dean et Ghemawat (2004). En 2006, une mise en œuvre *open source* (code source libre) de MapReduce a vu le jour sous le nom de Hadoop. Financé à l'origine par Yahoo, le moteur Hadoop est désormais disponible en tant que solution *open source* (sous licence Apache) et sous-tend la plupart des plateformes de traitement des données massives. En dehors de Yahoo, Hadoop est à la base de nombreux produits et services fondés sur les données, proposés par les entreprises de l'internet comme Amazon, eBay, Facebook et LinkedIn.
25. Comme l'explique Paul (2010) : « Beaucoup d'entreprises dans les domaines techniques essaient de réunir autant de brevets généraux qu'elles le peuvent de manière à avoir un stock de munitions pour riposter quand elles sont attaquées en justice pour contrefaçon de produit breveté ». Pour en savoir plus sur les stratégies de protection des droits de propriété intellectuelle, voir OCDE (2015d).
26. Le débat sur la possibilité pour les entités juridiques de protéger les droits d'auteur liés aux API a pris de l'ampleur après une requête déposée par l'Electronic Frontier Foundation (EFF, 2014) auprès de la Cour suprême des États-Unis en novembre 2014 (voir *Brief of Amici Curiae Computer Scientists in Support of Petitioner, Google Inc. versus Oracle America, Inc., Supreme Court of the US, No. 14-410, 7 novembre 2014*). Cette requête faisait suite à une décision de justice prise en mai 2012, statuant que Google avait porté atteinte au droit d'auteur qu'Oracle détenait sur les API Java sous Android, sans que le jury n'ait pu « s'accorder sur le point de savoir si cela constituait un usage loyal » (Duckett, 2014).
27. Voir www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/In-der-Praxis/Karte/karte.html (consulté le 16 janvier 2017).
28. Voir www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/digitale-transformation-im-betrieb-aus-und-weiterbildung.pdf (consulté le 16 janvier 2017).
29. Comme l'explique Becker (2012), les clauses de rétention des données sont employées lorsqu'un contrat liant un fournisseur de services infonuagiques et un client est indûment résilié par ce dernier ; elles permettent alors au fournisseur de conserver les données du client jusqu'à ce qu'il règle des frais de résiliation ou l'indemnise pour la perte d'activité, en versant une pénalité de rupture de contrat. Dans certains cas néanmoins, il arrive que ces dispositions soient utilisées pour facturer des frais supplémentaires aux clients ou les empêcher de changer de fournisseur.

Références

- Adler, D. et al. (1995), « Does a manufacturing execution system reduce the cost of production for bulk pharmaceuticals? », *ISA Transactions*, vol. 34, n° 4, pp. 343-347.
- Agweb (2015), « John Deere to purchase precision planting », *Agweb*, www.agweb.com/article/john-deere-to-purchase-precision-planting-naa-agwebcom-editors/.
- Airbus Group (2016), *Factory of the future*, page internet, www.airbusgroup.com/int/en/story-overview/factory-of-the-future.html# (consulté le 3 octobre 2016).
- Arthur, L. (2016), « Getting the right team on the field: Creating an advantage by connecting people, equipment, technology, and insights », présentations John Deere, <https://infoag.org/presentations/2215.pdf> (consulté le 21 avril 2017).
- Bakhshi, H., A. Bravo-Biosca et J. Mateos-Garcia (2014), *Inside the datavores: Estimating the effect of data and online analytics on firm performance*, Nesta, www.nesta.org.uk/sites/default/files/inside_the_datavores_technical_report.pdf (consulté le 13 mai 2015).
- Barua, A., D. Mani et R. Mukherjee (2013), *Impacts of effective data on business innovation and growth*, chapitre 2 d'une étude en trois parties, Université du Texas à Austin (consulté le 20 mai 2015).
- Beal, V. (2016), « In-vehicle infotainment (IVI) », *Webopedia*, www.webopedia.com/TERM/I/in-vehicle-infotainment-ivi.html (consulté le 15 octobre 2016).
- Becker, M.B. (2012), « Interoperability case study: Cloud computing », *Berkman Center Research Publication n° 2012-11*, Université Harvard – Berkman Klein Center for Internet & Society, http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2046987.
- Big Data Startups (2013), *Walmart is making big data part of its DNA*, www.bigdata-startups.com/BigData-startup/walmart-making-big-data-part-dna/ (consulté le 22 août 2014).
- BITKOM et Fraunhofer (2014), *Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*, www.bitkom.org/files/documents/Studie_Industrie_4.0.pdf (consulté le 15 juin 2015).
- Boeing (2013a), *Factory for the future*, page internet, 22 août, www.boeing.com/features/2013/08/factory-for-the-future-08-22-13.page (consulté le 3 octobre 2016).
- Boeing (2013b), *24/7 customer support*, page internet, www.boeing.com/features/2013/07/bca-24-7-customer-spt-07-30-13.page.
- Bruner, J. (2013), « Defining the industrial Internet », *O'Reilly Radar*, <http://radar.oreilly.com/2013/01/defining-the-industrial-internet.html>.
- Brynjolfsson, E. et al. (2008), « Scale without mass: Business process replication and industry dynamics », *Harvard Business School Technology and Operations Management Unit Research Paper*, n° 07-016.
- Brynjolfsson, E., L.M. Hitt et H.H. Kim (2011), « Strength in numbers: How does data-driven decisionmaking affect firm performance? », *Réseau de recherche en sciences sociales (SSRN)*, http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1819486.
- Chick, S., S. Netessine et A. Huchzermeier (2014), « When big data meets manufacturing », *Knowledge, INSEAD*, <http://knowledge.insead.edu/operations-management/when-big-data-meets-manufacturing-3297> (consulté le 15 mai 2015).
- Christensen, C.M. (1997), *The Innovator's Dilemma: When New Technologies Cause Great Firms to Fail*, Harvard Business School Press, Boston.
- Cisco (2016), « Digital transformation with the Internet of Everything », *100 Customer Stories*, www.cisco.com/c/dam/m/en_us/ioe/digital-transformation-stories/digital-transformation-with-the-internet-of-everything.pdf (consulté le 21 avril 2017).
- Crabbe, J. (2013), « Cutting edge it at Boeing: Transforming commercial aviation using WS02 », *WSO2Con US 2013*, <http://wso2.com/blogs/thesource/2014/02/wso2con-insights-how-boeing-transformed-commercial-aviation-using-wso2/> (consulté le 21 avril 2017).
- Crisuolo, P., N. Nicolaou et A. Salter (2012), « The elixir (or burden) of youth? Exploring differences in innovation between start-ups and established firms », *Research Policy*, vol. 41, n° 2, pp. 319-333.
- Cushing, E. (2013), « Amazon Mechanical Turk: The digital sweatshop », *UTNE*, www.utne.com/science-and-technology/amazon-mechanical-turk-zm0z13jfzlin.aspx (consulté le 25 mai 2015).
- Daugherty, P. et al. (2015), « Driving unconventional growth through the industrial Internet of Things », *Accenture Technology*, www.accenture.com/us-en/labs-insight-industrial-internet-of-things (consulté le 21 avril 2017).

- Davidson, P. (2012), « 3-D printing could remake U.S. manufacturing », *USA Today*, 10 juillet, <http://usatoday30.usatoday.com/money/industries/manufacturing/story/2012-07-10/digital-manufacturing/56135298/1> (consulté le 15 mars 2017).
- Dean, J. et S. Ghemawat (2004), « MapReduce: Simplified data processing on large clusters », in *Proceedings of the Sixth Symposium on Operating System Design and Implementation, OSDI*, San Francisco, <http://research.google.com/archive/mapreduce.html> (consulté le 12 juin 2015).
- Denning, S. (2013), « What went wrong at Boeing? », *blog Forbes*, www.forbes.com/sites/stevedenning/2013/01/21/what-went-wrong-at-boeing/#2715e4857a0b77270ce75aad (consulté le 21 avril 2017).
- Dholakia, U. (2015), « My experience as an Amazon Mechanical Turk (MTurk) Worker », *LinkedIn Pulse*, www.linkedin.com/pulse/my-experience-amazon-mechanical-turk-mturk-worker-utpal-dholakia (consulté le 21 avril 2017).
- Duckett, C. (2014), « Computing experts call for repeal of copyrightable API decision », *ZDnet*, www.zdnet.com/computing-experts-call-for-repeal-of-copyrightable-api-decision-7000035590/ (consulté le 21 avril 2017).
- Economist Intelligence Unit (2014), *Networked manufacturing: The digital future*, Economist Intelligence Unit pour le compte de Siemens, www.eiuperspectives.economist.com/sites/default/files/EIU%20-%20Siemens%20-%20Networked%20manufacturing%20The%20digital%20future%20WEB.pdf (consulté le 21 avril 2017).
- Economist Intelligence Unit (2012), *The deciding factor: big data & decision making*, Economist Intelligence Unit pour le compte de Capgemini, www.capgemini.com/insights-and-resources/by-publication/the-deciding-factor-big-data-decision-making/ (consulté le 21 avril 2017).
- EFF (2014), *Brief of Amici Curiae computer scientists in support of petitioner*, Electronic Frontier Foundation, 7 novembre.
- Evans, P.C. et M. Anninziata (2012), « Industrial Internet: Pushing the boundaries of minds and machines », *General Electrics*, www.ge.com/docs/chapters/Industrial_Internet.pdf (consulté le 21 avril 2017).
- Ewing, J. (2015), « Apple and Google create a buzz at Frankfurt Motor Show », *The New York Times*, 17 septembre, www.nytimes.com/2015/09/18/automobiles/apples-auto-inroads-create-a-buzz-at-frankfurt-motor-show.html.
- FAO (2012), *Guiding Principles for Responsible Contract Farming Operations*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, www.fao.org/docrep/016/i2858e/i2858e.pdf.
- FEM (2015), « Industrial Internet of Things: Unleashing the potential of connected products and services », *WEF Industry Agenda*, Forum économique mondial, janvier, www3.weforum.org/docs/WEFUSA_IndustrialInternet_Report2015.pdf.
- Frank-Partners (2016), *Interview with Dave Gordon of Rolls-Royce*, chaîne YouTube Frank-Partners, juillet, www.youtube.com/watch?v=Ldsmpd6yMBo (consulté le 3 octobre 2016).
- Gao, P. et al. (2016), *Disruptive trends that will transform the auto industry*, McKinsey & Company, www.mckinsey.com/industries/high-tech/our-insights/disruptive-trends-that-will-transform-the-auto-industry (consulté le 21 avril 2017).
- Gino, F. et B.R. Staats (2012), « Samasource: Give work, not aid », *Harvard Business School NOM Unit Case n° 912-011, UNC Kenan-Flagler Research Paper n° 2013-12*, <http://ssrn.com/abstract=2014220> (consulté le 26 mai 2015).
- Hammermann, A. et O. Stettes (2016), « Qualifikationsbedarf und Qualifizierung Anforderungen im Zeichen der Digitalisierung », *IW policy paper 3/2016*, Institut der deutschen Wirtschaft, www.iwkoeln.de/_storage/asset/251834/storage/master/file/8562021/download/Qualifikationsbedarf_IW_policy_paper.pdf.
- Harris, D. (2017), *Compare manufacturing execution systems (MES): Buyer's Guide*, page internet, www.softwareadvice.com/manufacturing/execution-systems-comparison/ (consulté le 21 avril 2017).
- Harris, M. (2014), « Amazon's Mechanical Turk workers protest: "I am a human being, not an algorithm" », *The Guardian*, 3 décembre, www.theguardian.com/technology/2014/dec/03/amazon-mechanical-turk-workers-protest-jeff-bezos.
- Horton, J.J. (2011), « The condition of the Turking class: Are online employers fair and honest? », *Economics Letters*, vol. 111, pp. 10-12, http://econpapers.repec.org/article/eeeecolet/v_3a111_3ay_3a2011_3ai_3a1_3ap_3a10-12.htm (consulté le 26 mai 2015).
- Horton, J.J. et L.B. Chilton (2010), « The labor economics of paid crowdsourcing », *Proceedings of the 11th ACM Conference on Electronic Commerce*, pp. 209-18.

- IPO (2014), *Eight great technologies: the patent landscapes*, Intellectual Property Office, Newport, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/360986/Eight_Great_Technologies.pdf (consulté le 21 avril 2017).
- Jahangir Mohammed, J. (2014), « Surprise: Agriculture is doing more with IoT Innovation than most other industries », *VentureBeat*, <http://venturebeat.com/2014/12/07/surprise-agriculture-is-doing-more-with-iot-innovation-than-most-other-industries/>.
- Jasperneite, J. (2012), *Was hinter Begriffen wie Industrie 4.0 steckt*, computer-automation.de, 19 décembre, www.computer-automation.de/steuerungsebene/steuern-regeln/artikel/93559/0/ (consulté le 21 avril 2017).
- John Deere (2017), *AutoTrac Vision*, page internet, www.deere.com/en_US/products/equipment/ag_management_solutions/guidance/auto-trac-vision/auto-trac-vision.page (consulté le 17 mars 2017).
- John Deere (2016), *John Deere – Committed to those linked to the land: Investor presentation*, pp. 11-12, www.deere.com/en_US/docs/Corporate/investor_relations/pdf/presentationswebcasts/strategy_presentation-rev.pdf.
- John Deere (2015), *The payoff from precision agriculture*, page internet, <https://johndeerejournal.com/2015/08/the-payoff-from-precision-agriculture/> (consulté le 3 octobre 2016).
- Kane, G. et al. (2015), « Strategy, not technology, drives digital transformation: Becoming a digitally mature enterprise », *MIT Sloan Management Review*, 14 juillet, <http://sloanreview.mit.edu/projects/strategy-drives-digital-transformation/> (consulté le 15 mars 2017).
- Knowledge@Wharton (2007), « Power by the hour: Can paying only for performance redefine how products are sold and serviced? », Wharton School, Université de Pennsylvanie, <http://knowledge.wharton.upenn.edu/article/power-by-the-hour-can-paying-only-for-performance-redefine-how-products-are-sold-and-serviced/> (consulté le 21 avril 2017).
- Lodefalk, M. (2010), « Servicification of manufacturing – Evidence from Swedish firm and enterprise group level data », *Working Papers n° 2010*, p. 3, School of Business, Université d'Örebro, http://ideas.repec.org/p/hhs/oruesi/2010_003.html.
- MAIC (2013), *Information and communications in Japan*, Livre blanc, Ministère des affaires intérieures et des communications, Japon.
- Markoff, J. (2012), « Skilled work, without the worker », *The iEconomy*, Part 6: Artificial Competence, *The New York Times*, 18 août.
- Marr, B. (2015), *That's data science: Airbus puts 10 000 sensors in every single wing!*, page internet, www.datasciencecentral.com/profiles/blogs/that-s-data-science-airbus-puts-10-000-sensors-in-every-single (consulté le 21 avril 2017).
- Mayer-Schönberger, V. et K. Cukier (2013), *Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work and Think*, John Murray, Londres.
- McCracken, H. (2014), « How Gmail happened: The inside story of its launch 10 years ago », *Time Magazine*, 1 avril, <http://time.com/43263/gmail-10th-anniversary/>.
- McKinsey Global Institute (2015), *The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype*, McKinsey & Company, www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/the-internet-of-things-mapping-the-value-beyond-the-hype.ashx (consulté le 21 avril 2017).
- McKinsey Global Institute (2011), *Big data: The next frontier for innovation, competition and productivity*, McKinsey & Company, www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/ourinsights/big-data-the-next-frontier-for-innovation (consulté le 21 avril 2017).
- Metz, C. (2010), « Google blesses Hadoop with MapReduce patent license », *The Register*, 27 avril, www.theregister.co.uk/2010/04/27/google_licenses_mapreduce_patent_to_hadoop/.
- MIT Technology Review (2010), « The truth about digital sweat shops », *MIT Technology Review*, 12 janvier, www.technologyreview.com/view/417082/the-truth-about-digital-sweat-shops/.
- Mordor Intelligence (2016), *Global precision farming market – by technology, application and geography market shares, forecasts and trends (2015-20)*, www.mordorintelligence.com/industry-reports/precision-farming-market?gclid=Cj0KEQjw7LS6BRDo2Iz23au25OQBEiQAQa6hwK_VYHWSIw7Z_WCx8TEd8lUOfqO3T5xJnApB-f49fokaAh_28P8HAQ (consulté le 21 avril 2017).
- Nasarwanji, A. et al. (2009), « The impact of manufacturing execution systems on labor overheads », *Proceedings of the World Congress on Engineering 2009*, vol. I, WCE, Londres, www.iaeng.org/publication/WCE2009/WCE2009_pp734-737.pdf.

- Noyes, K. (2014), « Cropping up on every farm: Big data technology », *Fortune*, <http://fortune.com/2014/05/30/cropping-up-on-every-farm-big-data-technology/>.
- OCDE (2017a), *Key issues for digital transformation in the G20*, Rapport préparé en vue d'une conférence organisée conjointement par la Présidence allemande du G20 et l'OCDE, OCDE, Paris, www.oecd.org/g20/key-issues-for-digital-transformation-in-the-g20.pdf (consulté le 21 avril 2017).
- OCDE (2017b), OECD.Stat, base de données, http://dotstat.oecd.org/index.aspx?DatasetCode=ICT_BUS (consulté en mars 2017).
- OCDE (2016a), « The Internet of Things: Seizing the benefits and addressing the challenges », *OECD Digital Economy Papers*, n° 252, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jlwvzz8td0n-en>.
- OCDE (2016b), « Stimulating digital innovation for growth and inclusiveness: The role of policies for the successful diffusion of ICT », *OECD Digital Economy Papers*, n° 256, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5j1wqvhg3l31-en>.
- OCDE (2016c), « Managing digital security and privacy risk », *OECD Digital Economy Papers*, n° 254, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5j1wut49ccklt-en>.
- OCDE (2016d), « New skills for the digital economy », *OECD Digital Economy Papers*, n° 258, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5j1wnkm2fc9x-en>.
- OCDE (2016e), « Economic and social benefits of Internet openness », *OECD Digital Economy Papers*, n° 257, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5j1wqf2r97g5-en>.
- OCDE (2016f), OECD.Stat, base de données, http://dotstat.oecd.org/index.aspx?DatasetCode=ICT_BUS (consulté en septembre 2016).
- OCDE (2015a), *Perspectives de l'économie numérique 2015*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264243767-fr>.
- OCDE (2015b), *Data-Driven Innovation: Big Data for Growth and Well-Being*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264229358-en>.
- OCDE (2015c), *Science, technologie et industrie : Tableau de bord de l'OCDE 2015 – L'innovation au service de la croissance et de la société*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_scoreboard-2015-fr.
- OCDE (2015d), *Enquiries into Intellectual Property's Economic Impact*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/sti/ieconomy/intellectual-property-economic-impact.htm.
- OCDE (2014a), « Cloud computing: The concept, impacts and the role of government policy », *OECD Digital Economy Papers*, n° 240, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jxzf4lcc7f5-en>.
- OCDE (2014b), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2014*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2014-fr.
- OCDE (2013), « Exploring Data-Driven Innovation as a New Source of Growth: Mapping the Policy Issues Raised by "Big Data" », *OECD Digital Economy Papers*, n° 222, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/10.1787/5k47zw3fcp43-en>.
- O'Connor, S. (2013), « Amazon unpacked », *FT Magazine*, 8 février, www.ft.com/intl/cms/s/2/ed6a985c-70bd-11e2-85d0-00144feab49a.html#slide0 (consulté le 24 mars 2015).
- O'Reilly, T. (2014), « IoTH: The Internet of things and humans », *O'Reilly Radar*, <http://radar.oreilly.com/2014/04/iOTH-the-internet-of-things-and-humans.html> (consulté le 21 avril 2017).
- Parmar, R. et al. (2014), « The new patterns of innovation », *Harvard Business Review*, janvier-février, <https://hbr.org/2014/01/the-new-patterns-of-innovation> (consulté le 15 mars 2017).
- Paul, R. (2010), *Google's MapReduce patent: What does it mean for Hadoop?*, *Arstechnica.com*, <http://arstechnica.com/information-technology/2010/01/googles-mapreduce-patent-what-does-it-mean-for-hadoop/> (consulté le 24 mai 2015).
- Perkins, R. (2003), « Technological "lock-in" », *International Society for Ecological Economics, Internet Encyclopaedia of Ecological Economics*, www.isecoeco.org/pdf/techlkin.pdf.
- Pierpaoli, E. et al. (2013), « Drivers of precision agriculture technologies adoption: A literature review », *Procedia Technology*, vol. 8, pp. 61-69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.11.010>.
- Pingdom (2013), *The top 100 web hosting countries*, page internet, 14 mars, <http://royal.pingdom.com/2013/03/14/web-hosting-countries-2013/> (consulté le 19 mai 2015).

- Radermacher, F.J. et B. Beyers (2007), *Welt mit Zukunft –Überleben im 21. Jahrhundert* [Un monde d’avenir – Survivre au XXI^e siècle], in *Welt mit Zukunft – Die Ökosoziale Perspektive*, 2001 (2^e éd.), Murmann Verlag, Hambourg.
- Roboglobal (2016), « Big data, the cloud and... FANUC and Kuka? », *Robo News*, Robo Global <http://roboglobal.com/big-data-the-cloud-and-fanuc-and-kuka>.
- Ross, J. et al. (2010), « Who are the Turkers? – Worker demographics in Amazon Mechanical Turk », *CHI EA 2010*, pp. 2863-72, www.international.ucla.edu/media/files/SocialCode-2009-01.pdf (consulté le 15 mai 2015).
- Rüssmann, M. et al. (2015), *Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries*, Boston Consulting Group, www.bcgperspectives.com/content/articles/engineered_products_project_business_industry_40_future_productivity_growth_manufacturing_industries/ (consulté le 8 février 2016).
- Schimmelpfennig D. et R. Ebel (2016), « Sequential adoption and cost savings from precision agriculture », *Journal of Agricultural and Resource Economics*, vol. 41, n° 1, pp. 97-115, http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2714959.
- Scott, A. (2015), « INSIGHT – Boeing uses its clout to control supplier consolidation », *Reuters*.
- Snatkin, A. et al. (2013), « Real time production monitoring system in SME », *Estonian Journal of Engineering*, vol. 19, n° 1, pp. 62-75, <http://dx.doi.org/10.3176/eng.2013.1.06>.
- Strategic Direction (2004), « Meeting the manufacturing challenge: Performance advantage of MES », *Strategic Direction*, vol. 20, n° 11, pp. 28-30, <http://dx.doi.org/10.1108/02580540410567265>.
- Sullivan, G.P. et al. (2010), « Operations and maintenance best practices: A guide to achieving operational efficiency, release 3.0 », *Pacific Northwest National Laboratory*, Département américain de l’Énergie, Washington.
- Tambe, P. (2014), « Big data investment, skills, and firm value », *Management Science*, <http://ssrn.com/abstract=2294077> (consulté le 10 juin 2015).
- Uddin, Z. (2012), « The dystopian digital sweatshop that makes the Internet run », *AlterNet*, www.alternet.org/labor/dystopian-digital-sweatshop-makes-internet-run (consulté le 21 avril 2017).
- VMware (2011), « Business agility and the true economics of cloud computing », *Business White Paper*, www.vmware.com/files/pdf/accelerate/VMware_Business_Agility_and_the_True_Economics_of_Cloud_Computing_White_Paper.pdf (consulté le 21 avril 2017).
- Vodafone (2015), *M2M Barometer 2015 report*, Vodafone, <http://m2m-mktg.vodafone.com/barometer2015>.
- Zittrain, J. (2009), « The Internet creates a new kind of sweatshop », *Newsweek*, 12 août, www.newsweek.com/internet-creates-new-kind-sweatshop-75751 (consulté le 15 mai 2015).

PARTIE I

Chapitre 3

Bioproduction et bioéconomie

par

Le Secrétariat de l'OCDE

La biotechnologie industrielle implique la production de biens à partir de biomasse renouvelable et non de ressources fossiles épuisables. Objet de bien des progrès et réalisations ces dernières années, elle apporte la preuve que protection de l'environnement peut aller de pair avec création d'emploi et croissance économique. Plusieurs obstacles s'opposent néanmoins à son déploiement au service d'une large gamme de produits. Certains, de nature technique, nécessitent davantage de recherche et développement. D'autres sont dus au fait que la bioproduction est en concurrence directe avec les industries pétrolière, gazière et pétrochimique qui peuvent se prévaloir de décennies d'expérience, de chaînes d'approvisionnement perfectionnées, d'économies à grande échelle et de subventions. Un troisième type d'obstacles, enfin, est lié aux incertitudes qui entourent la durabilité de la biomasse destinée à servir de matière de base de la production future. Il en résulte que les mesures nécessaires pour exploiter les potentialités de la bioproduction sont très diverses : elles pourront passer par un soutien public à la recherche, l'élaboration d'un indicateur de durabilité de la biomasse, des programmes d'étiquetage des produits à l'intention des consommateurs, ou encore des initiatives en faveur de l'enseignement et de la formation du personnel.

Les données statistiques concernant Israël sont fournies par et sous la responsabilité des autorités israéliennes compétentes. L'utilisation de ces données par l'OCDE est sans préjudice du statut des hauteurs du Golan, de Jérusalem-Est et des colonies de peuplement israéliennes en Cisjordanie aux termes du droit international.

Introduction

L'expansion de la bioéconomie est plus que jamais indispensable. L'actualité de 2015 – en particulier la COP21 et le Sommet mondial sur la bioéconomie – a propulsé sous les projecteurs de la scène politique le concept de bioéconomie qui, depuis déjà plus de dix ans, gagnait en importance. Ces récents événements, ainsi que l'élaboration du Programme de développement durable de l'Organisation des Nations Unies (ONU), sont intervenus en réponse aux « grands défis » que constituent le changement climatique, la sécurité énergétique, la sécurité alimentaire, la sécurité de l'eau et l'épuisement des ressources naturelles. L'expansion d'une économie fondée sur les biotechnologies peut aider à rapprocher croissance économique et réalisation des objectifs environnementaux et, aussi, à atteindre des objectifs comme le développement industriel rural. À l'heure actuelle, au moins 50 pays, dont ceux du G7, sont dotés d'une stratégie nationale en faveur de la bioéconomie ou de politiques connexes (El-Chichakli et al., 2016).

La biotechnologie industrielle implique la production de biens à partir de biomasse renouvelable et non de ressources fossiles épuisables, la biomasse pouvant être issue du bois, des cultures vivrières et non vivrières, voire des déchets ménagers. Elle fait l'objet de bien des progrès et réalisations. Par exemple, plusieurs décennies de recherche en biologie ont donné naissance à la biologie de synthèse et aux technologies d'édition du génome (la biologie de synthèse consiste à concevoir et à construire des éléments biologiques, des fonctions et des systèmes nouveaux, et à reconstruire des systèmes biologiques naturels existants). Alliés à la génomique moderne, qui constitue la base d'informations de toutes les sciences modernes du vivant, les outils sont en place pour amorcer une révolution biotechnologique dans la production. Les percées les plus récentes vont des biobatteries à la photosynthèse artificielle, en passant par les micro-organismes capables de produire des biocarburants. Début 2017, il a même été annoncé que des scientifiques avaient réussi à synthétiser du graphène à partir d'huile de soja, comme on le verra plus loin dans ce chapitre.

Toutefois, aussi remarquables que soient ces nouvelles avancées, c'est avec le déploiement de bioraffineries de pointe que la biotechnologie industrielle pourra jouer à moyen terme un rôle environnemental déterminant (Kleinschmit et al., 2014). En substance, une bioraffinerie transforme de la biomasse en produits commercialisables (denrées, alimentation animale, matériaux, produits chimiques) et en énergie (combustible, électricité, chaleur). Ce chapitre propose, sur la base d'une récente enquête de l'OCDE, une synthèse des différentes lignes de conduite adoptées dans le monde pour développer les bioraffineries de pointe.

Avec le développement des bioraffineries se pose la question fondamentale de la durabilité de la biomasse que ces installations ont pour vocation de transformer. Les pouvoirs publics peuvent concourir à la mise en place de chaînes d'approvisionnement durables pour cette production fondée sur les biotechnologies. Dans cette optique, il est urgent qu'ils soutiennent les efforts engagés pour mettre au point une définition complète ou universelle de la durabilité (en ce qui concerne les matières de base), des outils de

mesure de cette durabilité, et des accords internationaux sur les indicateurs requis afin de stimuler les activités de collecte de données et de mesure (Bosch, van de Pol et Philp, 2015). Il est par ailleurs indispensable de disposer de normes de performance environnementale applicables aux bioproduits dans la mesure où très peu rivalisent actuellement avec les produits pétrochimiques en termes de coût et où la réglementation impose souvent une exigence de durabilité.

Des bioraffineries de démonstration sont en activité en phase pilote et commerciale. Indispensables pour répondre aux questions techniques et économiques entourant la production avant l'étape des investissements coûteux à grande échelle, elles n'en sont pas moins des investissements à haut risque dans la mesure où les technologies concernées n'ont pas encore été éprouvées. Il est donc nécessaire de les financer au moyen de partenariats public-privé pour limiter les risques encourus par les parties privées et démontrer la volonté des pouvoirs publics de poursuivre dans la durée des politiques cohérentes dans les domaines de l'énergie et de la production industrielle.

Alors que les biocombustibles font l'objet d'initiatives depuis déjà plusieurs décennies, les pouvoirs publics ne prêtent guère attention aux produits chimiques fondés sur les biotechnologies, qui présentent pourtant un potentiel immense de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Weiss et al., 2012).

En termes de réglementation, les pouvoirs publics devraient se concentrer sur trois objectifs :

- Favoriser l'utilisation d'instruments, en particulier les normes, afin de faire disparaître les obstacles aux échanges de bioproduits.
- S'attaquer aux contraintes réglementaires qui freinent les investissements.
- Fixer pour les bioproduits des règles équivalentes à celles applicables aux biocombustibles et à la bioénergie (Philp, 2015).

Une meilleure réglementation des déchets pourrait également doper la bioéconomie. Il faudrait par exemple qu'elle soit moins normative et plus souple, de manière à autoriser le bioraffinage des résidus agricoles et forestiers ainsi que des déchets ménagers¹. À travers la passation des marchés publics, les administrations pourraient aussi jouer un rôle de premier plan dans la tenue du marché.

Comme exposé dans ce chapitre, les pouvoirs publics pourraient soutenir de diverses manières la bioproduction et l'ingénierie métabolique (qui consiste à utiliser le génie génétique pour modifier le métabolisme de micro-organismes afin de les transformer en produits utiles) aux stades de la R-D et de la commercialisation. Il pourrait s'agir, par exemple, d'accompagner la R-D à la convergence de la biotechnologie industrielle et des nouveaux procédés chimiques inoffensifs pour l'environnement, ou encore de favoriser l'utilisation accrue du calcul, de l'analyse de données et des technologies numériques en biologie de synthèse (qui implique l'écriture d'un nouveau code génétique) et en ingénierie métabolique.

La bioproduction pose comme défi majeur d'être pluridisciplinaire. Les chercheurs devront être en mesure de collaborer à la croisée d'une multitude de disciplines : agriculture, biologie, biochimie, chimie des polymères, science des matériaux, sciences de l'ingénieur, évaluation environnementale, économie, mais aussi politiques publiques. Les subventions de la recherche et de la formation devront aider à produire non seulement les technologies requises, mais aussi une communauté d'experts techniques (Delebecque et

Philp, 2015). Comme on le verra dans ce chapitre, les pouvoirs publics disposent d'un certain nombre de solutions éprouvées pour relever le défi.

L'acheminement vers un système de production de l'énergie et des matériaux fondé sur les ressources renouvelables sera long et semé d'embûches techniques et politiques. À la différence des transitions antérieures, du bois au charbon, puis du charbon au pétrole, la tâche est compliquée par les défis planétaires qui se posent aujourd'hui et qui la rendent d'autant plus urgente.

Un cadre d'action pour la bioéconomie

Le présent chapitre comprend deux parties. La première expose les implications d'un cadre d'action pour la bioéconomie et classe les différentes formes de soutien selon qu'elles sont axées sur l'offre ou sur la demande. La seconde propose un tour d'horizon des applications de la bioproduction et de la biotechnologie industrielle, afin de donner à voir aux décideurs l'impact possible de cette forme d'industrie manufacturière. Des objets de la vie quotidienne, comme les pneus et les bouteilles, sont déjà fabriqués avec des ressources renouvelables. Le problème général à résoudre est celui du passage à une production à grande échelle.

Il existe de nombreuses définitions de la bioéconomie. En cohérence avec l'OCDE (2009), on utilisera la définition de travail suivante aux fins de la présente publication : la bioéconomie recouvre « l'ensemble des activités économiques telles que la biotechnologie contribue de façon essentielle au secteur primaire et à l'industrie, en particulier quand les techniques avancées des sciences de la vie sont appliquées à la conversion de biomasse en matières, produits chimiques et combustibles ».

Des défis environnementaux et économiques d'envergure planétaire

Quand un pays double sa richesse, ses émissions de carbone augmentent d'environ 80 % (PNUE, 2010). Pour relever ce défi environnemental, il est indispensable de découpler la croissance économique de la dégradation de l'environnement : en particulier, il faut considérablement réduire les émissions de carbone (OCDE, 2009). Le G7 a appelé à se rapprocher autant que possible, d'ici 2050, d'une diminution des niveaux d'émission de carbone de 70 % par rapport aux niveaux de 2010 (G7 Germany, 2015). Dans la même ligne que les objectifs de la bioéconomie, l'accord de Paris sur le climat signé en 2015 vise à réduire la pollution causée par le carbone et à créer davantage d'emploi et de croissance sous l'impulsion d'investissements dans des projets sobres en carbone (CCNUCC, 2015).

Il importe que les pouvoirs publics et les acteurs privés voient, au-delà des seules menaces, les opportunités qui découlent de l'épuisement des ressources. Bâtir une bioéconomie offre la possibilité de reconstruire l'industrie et la société de façon durable, et de créer des emplois et de la valeur ajoutée en exploitant la biomasse plutôt que les ressources fossiles. Pour l'Académie nationale des sciences des États-Unis, il s'agit véritablement d'une « vision de l'avenir » car « les matières de base d'origine pétrolière dont on dépend fondamentalement sont une ressource limitée, et la diversification des matières de base élargira encore davantage le champ des possibles pour l'industrie manufacturière chimique » (Académie nationale des sciences, 2015).

Élaborer un cadre d'action pour la bioéconomie : généralités

Toutes les aspirations de la bioéconomie dépendent de son approvisionnement en biomasse durable (Piotrowski, Carus et Essel, 2015). Dans le monde d'après les combustibles

fossiles, une part croissante des produits chimiques, plastiques et textiles, des combustibles et de l'électricité proviendra inévitablement de la biomasse, ce qui accroîtra la concurrence foncière (Haberl, 2015). En effet, d'ici 2050, l'humanité devra aussi produire 50 % à 70 % de denrées alimentaires de plus (FAO, 2009), dans des conditions de sécheresse de plus en plus fréquentes (Cook, Ault et Smerdon, 2015) et sur des sols de mauvaise qualité (Nkonya, Mirzabaev et von Braun, 2016). C'est là que se situe une difficulté majeure pour la bioéconomie : réconcilier les besoins contradictoires de l'agriculture et de l'industrie (Bosch, van de Pol et Philp, 2015). Priorité doit bien sûr être donnée à l'alimentation (El-Chichakli et al., 2016), donc la mesure dans laquelle la production industrielle peut s'appuyer sur la biomasse reste à déterminer (PBL, 2012).

Un autre problème concerne la durabilité des bioproduits, dont les biocombustibles et la bioénergie. En effet, tous les produits et combustibles biosourcés ne sont pas égaux à cet égard. Si certains peuvent présenter des avantages environnementaux (par exemple le fait d'éviter de grandes quantités d'émissions de gaz à effet de serre), il ne faudrait pas supposer que c'est toujours le cas (Posen, Jaramillo et Griffin, 2016). La durabilité des bioproduits doit être examinée au cas par cas (par exemple, Urban et Bakshi, 2009 ; Lammens et al., 2011). De fait, les estimations des impacts environnementaux varient considérablement (Montazeri et al., 2016), ce qui est une entrave sérieuse à la bioproduction. La crédibilité de la filière passe donc par des efforts de normalisation internationale (Carus, 2017). Par ailleurs, on s'inquiète vivement du fait que l'analyse du cycle de vie (ACV) soit le seul outil mis en œuvre dans les évaluations environnementales (ANEC, 2012) : en effet, l'ACV ne mesure que les dimensions environnementales de la durabilité, sans en saisir les aspects économiques et sociaux.

Une cinquantaine de pays ont inscrit des objectifs de bioéconomie dans leurs stratégies économiques et d'innovation. Certains se sont dotés d'une stratégie bioéconomique spécifique, notamment l'Afrique du Sud, l'Allemagne, les États-Unis, la Finlande, le Japon et la Malaisie. D'autres ont des politiques cohérentes avec le développement d'une bioéconomie, par exemple l'Australie, le Brésil, la Corée, l'Inde, l'Irlande, les Pays-Bas, la République populaire de Chine (ci-après la « Chine »), la Russie et la Suède. On trouvera un tour d'horizon complet des différentes intentions nationales dans Bioökonomierat (2015). Les priorités diffèrent d'un pays à un autre, certains se concentrant davantage sur la santé, tandis que d'autres privilégient la bioénergie. Beaucoup, néanmoins, expriment l'intention de développer une bioindustrie dont les produits auraient une valeur ajoutée supérieure à celle des biocombustibles ou de la bioénergie. Cependant, les stratégies bioéconomiques nationales, même si elles témoignent d'une volonté et d'un engagement, tendent à ne pas entrer dans le détail des instruments d'action. De plus, de nombreux autres domaines d'action ont une influence sur la bioéconomie : fiscalité, politique industrielle, politique agricole, gestion des déchets, échanges, et d'autres encore. Cette diversité rend d'autant plus difficile l'élaboration d'un cadre d'action unique pour la bioéconomie.

Les mesures doivent être axées sur l'offre, axées sur la demande et transversales

Plusieurs instruments d'action sont essentiels. Ils sont classés dans le tableau 3.1 dans les trois catégories « volontarisme technologique » (mesures axées sur l'offre), « incitation par le marché » (mesures axées sur la demande) et « actions transversales », et sont décrits plus en détail dans la suite de ce chapitre.

La demande est une source d'innovation majeure, mais tous les pays n'ont pas pleinement pris la mesure de son rôle essentiel pour stimuler l'innovation (Edler et Georghiou, 2007). Ces dernières années, toutefois, beaucoup de pays de l'OCDE ont eu

davantage recours à des instruments axés sur la demande : marchés publics, réglementation, normes, politiques de consommation, ou encore initiatives en faveur de l'innovation stimulée par les utilisateurs (OCDE, 2011a). L'expérience dans la zone de l'OCDE montre que la mise en œuvre de politiques axées sur la demande reste limitée à des domaines où les mécanismes de marché ne suffisent pas à satisfaire les besoins sociétaux (par exemple, environnement) ainsi qu'à des domaines où marchés publics et privés se rejoignent (par exemple, approvisionnement en énergie). Il est donc pertinent que les objectifs stratégiques en matière de bioéconomie soient soumis à des considérations environnementales et énergétiques.

Tableau 3.1. **Instruments d'action d'un cadre pour la bioéconomie**

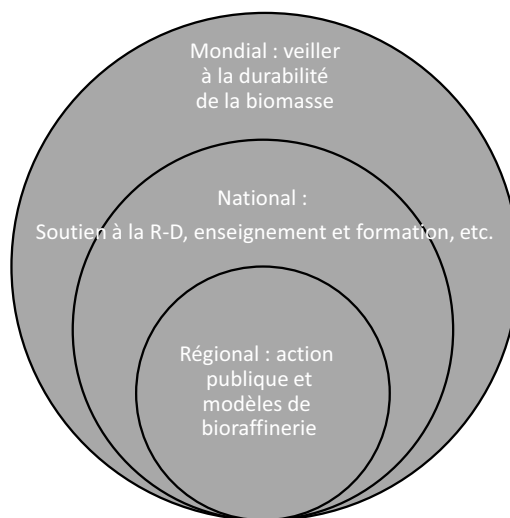
Volontarisme technologique/matières de base	Incitation par le marché	Actions transversales
Accès local aux matières de base	Objectifs et quotas	Standards et normes
Accès international aux matières de base	Obligations et interdictions	Certifications
Subvention de la R-D	Marchés publics	Compétences et formation
Soutien des installations pilotes et des démonstrateurs	Labels et sensibilisation	Pôles régionaux
Soutien financier des projets phares	Soutien financier direct pour les bioproduits	Adhésion du public
Incitations fiscales pour la R-D industrielle	Incitations fiscales pour les bioproduits	
Conditions d'investissement améliorées	Incitations liées aux émissions de gaz à effet de serre (par exemple, SEQE)	
Pôles technologiques	Taxes sur le carbone fossile	
Gouvernance et réglementation	Suppression des subventions aux combustibles fossiles	

Source : D'après Carus, M. (2014), « Presentation at the OECD workshop on bio-based production ».

L'action publique est nécessaire à de multiples niveaux

La bioéconomie nécessite une intervention publique à plusieurs niveaux (graphique 3.1) : régional, avec notamment le déploiement de bioraffineries ; national, s'agissant du soutien à la R-D (par exemple pour la biologie de synthèse) ; et mondial, en ce qui concerne la biomasse et sa durabilité.

Graphique 3.1. **Agir en faveur de la bioéconomie du niveau régional jusqu'au niveau mondial**



Or, le développement d'une bioéconomie se heurte à un obstacle majeur : les secteurs concernés opèrent en silos sans nécessairement communiquer les uns avec les autres. Par exemple, la filière des produits chimiques de base n'interagit pas régulièrement avec les agriculteurs. On retrouve cet isolement entre les différentes familles d'instruments d'action. On trouvera donc ci-après une classification des instruments qui peuvent servir à développer une bioéconomie de portée régionale, nationale et mondiale. Les exemples illustrant la nécessité d'un tel cadre d'action sont tirés de pays de l'OCDE et d'économies partenaires.

Mesures axées sur l'offre

Soutenir la R-D et la commercialisation en ingénierie métabolique et en bioproduction

La biotechnologie essentielle à la production de matières biosourcées est l'ingénierie métabolique, c'est-à-dire le fait d'utiliser le génie génétique pour modifier le métabolisme de micro-organismes. Il peut s'agir d'optimiser des voies biochimiques existantes ou d'intégrer des composés métaboliques, le plus souvent dans des bactéries, des levures ou des plantes, afin de produire avec un rendement élevé des molécules à usage médical ou biotechnologique.

En dépit du grand nombre de succès de recherche en ingénierie métabolique, très peu de nouvelles molécules ont débouché sur un succès commercial. Il faut encore 50 à 300 personnes-années de travail et des millions de dollars pour qu'un produit de l'ingénierie métabolique parvienne sur le marché (Hong et Nielsen, 2012). À titre de comparaison, la chimie connaît des taux de réussite incomparablement plus élevés. Par exemple, plus de 30 produits chimiques dérivés de la biomasse ont actuellement un niveau de maturité technologique de 8 ou plus (CE, 2015), mais quelques-uns seulement sont le fruit de l'ingénierie métabolique. Les autres sont des produits de la chimie traditionnelle utilisant la biomasse comme matière de base.

Pourtant, commencent à apparaître des éléments qui prouvent que les taux de réussite seraient supérieurs si les pouvoirs publics veillaient davantage à soutenir la R-D sur la convergence entre biotechnologie industrielle et « chimie verte » (Dusselier et al., 2015). La chimie verte recouvre la conception de procédés chimiques inoffensifs pour l'environnement débouchant sur la fabrication de produits chimiques ayant une plus faible empreinte écologique. Le succès pourrait être davantage au rendez-vous si, en outre, on consacrait une part accrue de la R-D à renforcer la convergence entre, d'une part, les technologies de l'information et du calcul et, d'autre part, la biologie de synthèse et l'ingénierie métabolique (Rogers et Church, 2016) (encadré 3.1).

Encadré 3.1. Faire converger les technologies de l'information et du calcul en bioproduction pour donner à la biotechnologie son langage universel

Jusqu'à présent, le champ de la biotechnologie a peu prêté attention à des concepts tels que l'interopérabilité, la séparation entre conception et fabrication, ou encore la normalisation des pièces et des systèmes – des notions pourtant centrales en sciences de l'ingénieur. Une règle générale s'applique à tous les secteurs manufacturiers : 70 % environ des coûts de fabrication d'un produit sont déterminés par des décisions prises à la conception, tandis que 20 % seulement dépendent de décisions de production. Quand le cycle de l'ingénierie est appliqué à la biotechnologie, les échecs sont fréquents.

L'industrie manufacturière telle qu'on la conçoit dans l'économie moderne fonctionne parce que les logiciels de conception et de test peuvent communiquer avec les matériels de production via une succession de couches d'interfaces de programmation d'applications. Sur ce modèle, la biotechnologie doit

Encadré 3.1. **Faire converger les technologies de l'information et du calcul en bioproduction pour donner à la biotechnologie son langage universel (suite)**

élaborer ses propres logiciels et langages de programmation à haut niveau pour transformer le cycle de sa propre conception (Sadowski, Grant et Fell, 2016). C'est l'interopérabilité qui permettra d'unifier les différentes technologies en jeu.

Cycle d'ingénierie et biotechnologie : la phase d'essai est un frein

Quand, en génie métabolique, on travaille avec un très grand nombre de micro-organismes génétiquement modifiés, l'une des étapes la plus chronophage est l'évaluation de leurs caractéristiques, ou traits, observables, ce que l'on appelle leur phénotype (Wang et al., 2014). Quand on construit des micro-organismes en vue de produire des biocombustibles ou des produits chimiques biosourcés, le succès de la conception se mesure à la quantité de produit formé. Or, s'il faut répartir différentes souches entre de nombreux instruments d'essai et déterminer la concentration du produit chimique d'intérêt dans chacun, alors (seules) quelques centaines de milliers d'évaluations sont réalisables chaque jour, tandis qu'au contraire, il est possible de concevoir et de construire quotidiennement des milliards de génotypes différents (Rogers et Church, 2016). La productivité globale est limitée par le débit du processus permettant d'évaluer si les organismes qu'on a conçus ont les bons traits. La reproductibilité en biologie de synthèse est également un défi (Beal et al., 2016) à relever pour que la biofabrication devienne une plateforme manufacturière crédible.

Relever ces défis nécessitera de nouveaux moyens d'analyse et de stockage des données

La baisse rapide du coût de la synthèse de l'acide désoxyribonucléique (ADN) a rendu les coûts de synthèse dérisoires pour de nombreux laboratoires. Ainsi qu'on vient de le voir, la phase d'essai demeure un important goulet d'étranglement de la production. Comme les technologies d'automatisation mécanique ou électronique ne peuvent pas compenser la lenteur des essais, les réponses devront venir de la biologie elle-même (Rogers et al., 2015 ; Xiao et al., 2016) avec l'aide de modèles de calcul informatique (Rogers et Church, 2016). De fait, on sait désormais concevoir des capteurs génétiques pouvant signaler qu'un micro-organisme modifié possède le phénotype recherché et constitue donc un produit d'intérêt. Cette méthode permettra d'évaluer des millions de constructions par cycle, mais elle créera aussi une quantité de données sans précédent. À l'ère de l'apprentissage automatique, l'objectif ultime devrait être que les données déterminent l'itération suivante des constructions sans intervention humaine requise (Rogers et Church, 2016). Par exemple, AutoBioCAD promet la conception de circuits génétiques pour *Escherichia coli* (*E. coli*) sans contribution humaine ou presque (Rodrigo et Jaramillo, 2013). Pour ce faire, il faut des algorithmes avec apprentissage automatique qui sachent corrélérer des données issues d'ensembles différents dans le but d'établir, sans connaissance préalable, des correspondances entre gènes, protéines et voies métaboliques (Wurtzel et Kutchan, 2016).

De nombreux chercheurs appellent à développer des langages informatiques entièrement nouveaux pour la biotechnologie. Ils affirment que les variantes de langues naturelles comme l'anglais ou le français sont trop imprécises et ambiguës pour être utiles à la gestion des systèmes hautement complexes de la biologie et de la biotechnologie. Il est temps, semble-t-il, de concevoir des langages de programmations dédiés aux sciences du vivant. Sadowski, Grant et Fell (2016) avancent que le besoin essentiel est de développer et d'adopter des langages machine de haut niveau pour des bioprocédés exécutables. Le langage de programmation Antha, destiné aux calculs en tous genres de la biologie, est sans doute la première tentative réelle engagée dans ce sens. Construit sur la base du langage de programmation Go de Google, avec néanmoins des fonctionnalités propres au domaine, il est supposé permettre la conduite d'expériences d'une complexité jamais atteinte.

Les goulets d'étranglement de la recherche et de la commercialisation en bioproduction

Les succès commerciaux de l'ingénierie métabolique sont loin de rivaliser avec ceux de la recherche. Face à ce manque de réussite commerciale, des chercheurs de l'Institut avancé de science et de technologie de la Corée (Korea Advanced Institute of Science and

Technology, KAIST) ont récemment proposé dix stratégies générales concernant l'ingénierie métabolique des systèmes pour favoriser la création de souches microbiennes industrielles (Lee et Kim, 2015). L'ingénierie métabolique des systèmes diffère de l'ingénierie métabolique traditionnelle en ce qu'elle associe aux approches classiques de l'ingénierie métabolique des outils d'autres domaines tels que la biologie des systèmes, la biologie de synthèse et l'évolution moléculaire. Beaucoup d'entreprises sont compétentes dans une ou plusieurs de ces spécialités, mais peu d'entre elles peuvent toutes les intégrer au sein d'un processus de production. Dans ce domaine comme dans d'autres de la biotechnologie, il faut donc une meilleure collaboration entre le milieu universitaire et les entreprises biotechnologiques industrielles (Pronk et al., 2015) et un transfert des connaissances bien plus rapide entre les secteurs public et privé.

Si l'on y regarde de plus près, la littérature consacrée au sujet met en lumière les défis biotechnologiques déterminants qu'il faudra relever pour accélérer le passage du laboratoire au marché. L'encadré 3.2 décrit les biotechnologies les plus souvent citées dont il faut approfondir le développement. C'est dans ces domaines en particulier qu'il s'agit de financer la recherche publique de façon coordonnée et ciblée.

Encadré 3.2. Poursuivre le développement de certaines biotechnologies pour accélérer le passage du laboratoire au marché

On trouvera ci-après des exemples de biotechnologies dont on préconise souvent d'approfondir le développement.

- **Prétraitement et biotraitement consolidé de la biomasse.** Le Département de l'Énergie des États-Unis estime, comme beaucoup de spécialistes du domaine, que le biotraitement consolidé est le moyen à bas coût ultime de réaliser l'hydrolyse et la fermentation de la cellulose, un ensemble de processus qui rend la cellulose accessible aux micro-organismes (US DOE, 2006). Dans le cas du biotraitement consolidé, le biocatalyseur qui fabrique le produit biochimique est aussi celui qui décompose la biomasse cellulosique (bois ou canne à sucre, par exemple) en sucres fermentables, ce qui supprime l'étape spécifique coûteuse de la dégradation enzymatique et permet d'opérer avec un nombre réduit de réacteurs. Le biotraitement consolidé a fait l'objet de plusieurs succès de recherche (par exemple, Salamanca-Cardona et al., 2016), mais il n'est pas encore viable sur le plan commercial.
- **Croissance sur des composés à un atome de carbone (dits « en C1 »).** Les progrès sont lents car il peut être difficile de travailler en milieu industriel avec les bactéries connues pour se développer sur des substrats en C1. Il est également très difficile d'introduire les mécanismes génétiques d'utilisation du carbone de ces bactéries dans des souches de bactéries exploitables en production (Burk et van Dien, 2016). Pourtant, beaucoup de composés en C1 sont disponibles en grande quantité (par exemple, le méthanol) et certains sont des gaz à effet de serre exploitables (méthane, monoxyde de carbone, CO₂). Leur faible coût et leur abondance en font des substrats attractifs pour le biotraitement. L'entreprise néo-zélandaise LanzaTech, qui a développé cette technologie jusqu'au stade de la démonstration à grande échelle, devrait construire une unité de fermentation sur le site d'une aciérie belge afin de convertir de l'hydrogène et le très toxique monoxyde de carbone en éthanol. Cette initiative est financée en partie par le secteur privé et en partie via le programme Horizon 2020 de l'Union européenne.
- **Conception informatique des enzymes.** Les méthodes actuelles de conception d'enzymes plus actives et plus spécifiques sont au mieux semi-rationnelles. Discipline encore

Encadré 3.2. Poursuivre le développement de certaines biotechnologies pour accélérer le passage du laboratoire au marché (suite)

balbutiante, la conception informatique des enzymes pourrait faciliter la conception rationnelle des protéines voire aider à créer des fonctions entièrement inédites (Privett et al., 2012). Pour repousser encore les frontières et ainsi concevoir, fabriquer et optimiser de nouvelles enzymes de haute performance, il s'agit de créer des plateformes intégrées qui associent modélisation informatique et ingénierie métabolique expérimentale.

- **Cellules minimales pour usines microbiennes bioconfinées.** La conception des futures souches de production se fera à partir de cellules minimales, ou châssis (en d'autres termes, des machines biologiques minimales autoreproductrices que l'on peut adapter pour qu'elles fabriquent des produits chimiques ou des combustibles spécifiques). Ostrov et al. (2016) ont mis au point des outils informatiques et expérimentaux pour rapidement concevoir et prototyper des organismes de synthèse. Malgré les progrès déjà annoncés sur la voie du développement de génomes synthétiques, les efforts à fournir se situent à une échelle encore inexplorée. Concevoir et utiliser des souches de production industrielle nécessite également de savoir bioconfiner les micro-organismes génétiquement modifiés pour empêcher leur propagation dans l'environnement. Or, pour l'heure, il existe des indicateurs nécessaires mais non suffisants pour évaluer le bioconfinement (Mandell et al., 2015). C'est pourquoi les stratégies de développement sont encore incomplètes.
- **Robustesse.** Les micro-organismes naturels ne sont pas destinés à résister aux conditions extrêmes de la production industrielle, c'est pourquoi on doit concevoir de nouveaux traits pour les rendre plus robustes (Zhu et al., 2011). Cette question est si largement posée que l'Agence américaine de recherche avancée dans le domaine de la défense (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) en a fait l'une de ses priorités de recherche. Le portefeuille de la DARPA consacré à la robustesse biologique en milieu complexe (*Biological Robustness in Complex Settings*, BRICS) comprendra un ensemble de programmes visant à mettre au jour les principes de conception d'organismes biologiques robustes en milieu artificiel afin, ensuite, d'appliquer ces connaissances fondamentales à des applications spécifiques telles que la bioproduction à la demande de nouveaux médicaments et combustibles.
- **Productivité.** La plupart des processus microbiens naturels sont incompatibles avec les procédés industriels car les titres des solutions (grammes de produit par litre), les rendements (grammes de produit par gramme de matière première) et la productivité (grammes de produit par litre par heure) sont souvent trop faibles pour être déployables à grande échelle (Maiti et al., 2016). La contrainte fondamentale qui pèse sur la productivité de la cellule hôte est la charge métabolique qui conduit à des modifications physiologiques indésirables. En effet, l'ingénierie métabolique destinée à la bioproduction, en plus de consommer les molécules énergétiques telles que l'adénosine triphosphate (ATP), déclenche des inefficiences énergétiques dans la cellule (Wu et al., 2016). Le titre, le rendement et la productivité peuvent sembler des questions à traiter à l'étape de R-D qui précède la mise sur le marché. Cependant, les problèmes rencontrés sont si courants et insolubles qu'il est probablement nécessaire de financer davantage la recherche fondamentale.
- **Modèles de fermentation à petite échelle.** Les fermenteurs – ces réacteurs clos soigneusement contrôlés dans lesquels des micro-organismes fabriquent des produits utiles – sont les arbitres ultimes de l'optimisation des procédés. Mais ils sont coûteux à exploiter et requièrent généralement une supervision poussée. De plus, le principe de la

Encadré 3.2. Poursuivre le développement de certaines biotechnologies pour accélérer le passage du laboratoire au marché (suite)

fermentation à petite échelle présente des lacunes, notamment pour ce qui est du contrôle du pH, de l'aération du milieu et de la possibilité de procéder à de fréquentes prises d'échantillons. La microfluidique pourra, espérons-le, apporter des solutions à ces problèmes (Burk et van Dien, 2016). Science et technologie de la manipulation et du contrôle de fluides en quantités microscopiques (du microlitre au picolitre) dans des canaux miniatures, la microfluidique permet, puisque les volumes de fluides sont si faibles, de travailler avec un rapport surface/volume très important. Elle pourrait donc aider à accélérer les réactions (transferts de chaleur, transferts de masse, transferts de gaz) et, au cours du procédé de fermentation, économiser les substrats coûteux sur lesquels se développent les micro-organismes.

- **Édition des gènes et du génome de souches de production.** Jusqu'à présent, l'édition et l'ingénierie ciblées du génome se sont révélées difficiles et coûteuses. Il est urgent d'élaborer des méthodes efficaces d'édition génomique multiplex (Esvelt et Wang, 2013). Il serait utile que se règlent les questions concernant les brevets relatifs à l'outil d'édition génomique CRISPR/Cas9 (Ledford, 2016) car cette technologie se prête à la manipulation génétique non seulement de souches de production traditionnelles telles que la levure de boulanger (Stovicek et al., 2015) et *E. coli* (Jiang et al., 2015) mais aussi de souches non conventionnelles comme la diatomée modèle *Phaeodactylum tricornutum* (Nymark et al., 2016) (les diatomées sont des organismes aquatiques unicellulaires photosynthétiques).

Incitations fiscales pour la R-D industrielle

Les incitations fiscales réduisent le coût marginal des dépenses de R-D et d'innovation et sont généralement plus neutres quant au choix des technologies que les mesures de soutien direct. Depuis dix ans, les pays de l'OCDE y ont de plus en plus recours (plutôt qu'à des subventions ou d'autres formes de soutien direct) pour soutenir l'investissement dans la R-D (OCDE, 2014a). La majorité des pays de l'OCDE utilisent ce type d'instrument, tout comme beaucoup d'économies BRICS (Brésil, Fédération de Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud). Aux États-Unis, les incitations fiscales sont considérées comme un moyen important de stimuler la filière des biomatériaux : une série d'entre elles ont été proposées au 112^e Congrès, dont certaines ont été réintroduites au 113^e Congrès.

L'existence aux États-Unis d'un crédit d'impôt en faveur de la production des produits biosourcés pourrait promouvoir l'investissement, la production et l'adoption des bioproduits, de la même façon que les crédits d'impôt en faveur de la production de biogazole et de biocarburants cellulose ont stimulé l'investissement dans ces domaines.

Pôles technologiques

La plupart des pays de l'OCDE soutiennent l'innovation des entreprises en promouvant des programmes structurés autour de pôles. Il existe un soutien à de tels pôles technologiques spécialisés en Australie, en Belgique, au Canada, au Danemark, en Espagne, aux États-Unis, en Irlande, en Israël, en Nouvelle-Zélande, aux Pays-Bas, en Pologne, à Singapour et en Suisse. Pour justifier leurs efforts de soutien aux pôles technologiques – qui se manifeste à travers l'infrastructure, des activités de mise en réseau, des formations ou d'autres mesures – les pouvoirs publics invoquent en premier lieu l'augmentation des externalités de savoir pour tous les acteurs du pôle. Cette possibilité de diffusion des

connaissances est particulièrement pertinente dans le domaine de la biotechnologie industrielle, étant donné la diversité des activités de recherche et de production que cette dernière exige, de l'ingénierie des bioréacteurs jusqu'au génie génétique. À titre d'exemple, il existe en Europe le pôle BioBased Delta au sein duquel se sont engagés des leaders de l'industrie chimique comme Royal Cosun, Suiker Unie, Dow Chemicals, Cargill et Corbion (Deloitte, 2015).

Soutien des petites et moyennes entreprises (PME) et des start-ups

Toutes les PME engagées dans la haute technologie sont confrontées à des problèmes propres à leurs domaines d'activité respectifs. Dans le secteur de la biotechnologie, elles peuvent avoir à faire face à de nombreuses années de recherche à haut risque sans revenus (Pisano, 2010), avec des installations spécialisées coûteuses et une étape complexe d'entrée sur le marché. Quand elles sont spécialisées dans la bioproduction, elles peuvent en outre se retrouver en concurrence avec quelques-unes des plus grandes multinationales pétrolières et pétrochimiques qui, elles, disposent de marchés établis, de chaînes de valeur et d'approvisionnement stables, de technologies éprouvées et d'installations de production entièrement amorties. Pourtant, les pouvoirs publics attendent beaucoup des PME.

Les pôles technologiques et régionaux sont un mécanisme de premier plan pour soutenir les PME car ils leur fournissent toute une gamme de services : accès à du capital-risque et d'autres services financiers ; conseils commerciaux sur l'utilisation stratégique des normes, labels et certificats ; assistance à l'utilisation d'outils spécifiques d'analyse du cycle de vie et de durabilité ; accès à des installations de démonstration et d'essai. Mais les administrations nationales peuvent aussi prévoir divers autres mécanismes de soutien, en particulier des exonérations d'impôt et de cotisations sociales.

Soutien de l'accès local aux matières de base

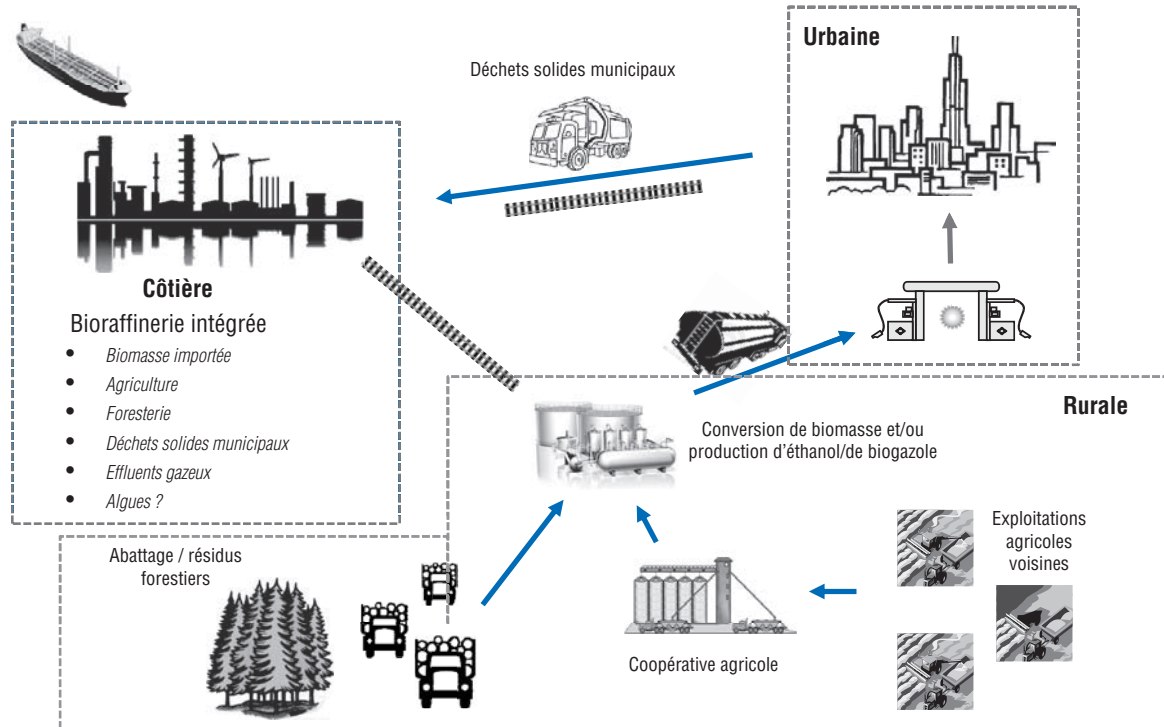
L'utilisation de matières de base locales présente plusieurs avantages stratégiques. Premièrement, il est écologiquement plus avantageux de s'approvisionner localement que de transporter des matières sur de longues distances voire depuis l'étranger (en termes de consommation d'énergie liée au transport). Deuxièmement, la création d'emplois locaux et ruraux peut contribuer à la réalisation d'autres objectifs tels que la spécialisation intelligente (OCDE, 2013b) et la réindustrialisation stimulée par la connaissance. Cependant, de grands défis restent à relever.

Un premier problème important tient à la complexité des chaînes de valeur des bioraffineries (graphique 3.2). L'action publique vise donc à favoriser l'implantation de nombreuses unités de production locales interconnectées qui puissent s'intégrer à d'autres industries voisines, de manière à assurer la consommation complète des résidus et des déchets par divers procédés (Luoma, Vanhanen et Tommila, 2011). Le graphique 3.2 est bien sûr très simplifié puisqu'il omet, d'une part, la contribution des établissements de recherche et des PME de la chimie et des biotechnologies et, d'autre part, les stratégies de fin de cycle comme le compostage. Il n'illustre pas non plus le concept d'utilisation en cascade de la biomasse². Toutefois, il montre le nombre d'acteurs impliqués et la complexité de leurs interactions. Par exemple, la bioraffinerie de Bazancourt-Pomacle en France (Schieb et Philp, 2014) travaille avec 10 000 agriculteurs.

Les politiques publiques promeuvent la R-D le long des chaînes d'approvisionnement et de valeur, mais les marchés d'approvisionnement – par exemple pour les facteurs de la production spécialisée – bénéficient de peu d'attention (Knight, Pfeiffer et Scott, 2015),

ce qui peut dissuader les investisseurs. Ce manque d'intérêt pour les marchés d'approvisionnement traduit peut-être le fait que les pouvoirs publics ne veulent pas être perçus comme intervenant sur les marchés et, possiblement, contrevenant aux bonnes pratiques en matière de concurrence (Institute of Risk Management and Competition and Markets Authority, 2014).

Graphique 3.2. Chaînes de valeur et d'approvisionnement généralisées du bioraffinage



Les parties prenantes concernées sont si diverses qu'elles n'entretiennent presque jamais des contacts réguliers les unes avec les autres dans l'économie fossile (par exemple, les centres de R-D et les établissements publics de recherche, qui tendent à ne pas être implantés en milieu rural, ont besoin de mécanismes pour entrer en relation avec les autres acteurs de la chaîne de valeur de la biotechnologie industrielle). Les groupes de parties prenantes sont également très divers³. De ce fait, l'action publique a un rôle à jouer pour éviter que le processus de communication ne soit aléatoire, de circonstance et inefficace. L'analyse souligne l'importance potentielle des coopératives d'acheteurs et d'autres formes d'intermédiaires sur les marchés d'approvisionnement (Knight, Pfeiffer et Scott, 2015).

Les pôles régionaux peuvent aussi être bien positionnés pour évaluer les solutions de développement régional. Il sera d'autant plus facile de renforcer les capacités au niveau local que les réseaux commerciaux locaux, par exemple les cercles d'échanges et de machines agricoles et forestières (entreprises de location d'équipements), seront de qualité et que les relations seront établies dans la confiance. Encourager la conception d'outils logiciels d'aide à la décision au service du développement de la chaîne d'approvisionnement locale serait une intervention publique relativement peu coûteuse⁴. Les pays européens ont souvent recours au mécanisme du pôle régional pour renforcer les capacités dans le secteur de la biotechnologie industrielle⁵.

En France, dans la région Picardie-Champagne-Ardenne, le pôle Industrie & Agro-Ressources (IAR) a déjà enregistré des résultats tangibles. Fort de plus de 200 membres, il réunit des parties prenantes françaises de la recherche, de l'enseignement, de l'industrie et de l'agriculture autour de l'objectif de l'optimisation de la valeur ajoutée issue de l'exploitation de la biomasse. Bien ancré dans la région, il est le site de bioraffineries dont l'activité est un succès. Son autre ambition est d'intégrer le savoir-faire externe grâce à des alliances stratégiques internationales. Remplissant la fonction classique d'un pôle régional, il rassemble des parties prenantes de l'ensemble de la chaîne de valeur autour d'un problème d'innovation commun.

Accès international aux matières de base : potentiel et durabilité de la biomasse

De grandes quantités de biomasse sont déjà expédiées partout dans le monde, la plupart du temps à destination de pays de l'OCDE (BP-EBI, 2014). La consommation mondiale de biomasse augmente et continuera d'augmenter (Schmitz et al., 2014). Le potentiel de la biomasse et son coût pourraient devenir des déterminants cruciaux des coûts globaux d'atténuation du changement climatique (Rose et al., 2013).

Or, une division s'opère peu à peu entre les économies avancées comme l'Europe, qui ont peu de surplus de biomasse, et les économies en développement non contraintes par des pénuries de biomasse. Il convient donc d'élaborer des politiques harmonisées à l'échelle internationale pour créer et préserver les échanges de biomasse durable, mais aussi pour éviter tout litige international autour de la biomasse (Bosch, van de Pol et Philp, 2015).

Encadré 3.3. Exemples de stratégies innovantes d'approvisionnement en biomasse aux États-Unis et au Japon

La Stratégie en faveur de la biomasse établie par le Japon en 2002 a été une première approche destinée à soutenir l'accès local aux matières de base. Coordinée par trois ministères, à savoir le ministère de l'Agriculture, des Forêts et de la Pêche, le ministère de l'Environnement et le ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie, elle définit trois niveaux d'intervention – technique, régional et national – et fixe des objectifs pour la production, la collecte et le transport, pour les technologies de conversion et pour favoriser la demande d'énergie ou de matières d'origine renouvelable. Les opportunités de commercialisation des technologies de la biomasse ont ainsi été considérablement renforcées.

Une « ville de la biomasse » est une zone où, grâce à la coopération des parties prenantes locales, on implante et on exploite un système complet d'utilisation de la biomasse. Chaque étape du processus – production, conversion, distribution, utilisation – est liée aux autres. Ce sont les collectivités locales qui conduisent l'élaboration et la mise en œuvre des plans d'implantation de villes de la biomasse. Depuis 2005, environ 300 villes de ce type ont été créées dans le pays. Le ministère de l'Agriculture, des Forêts et de la Pêche a également soutenu la création de villes de la biomasse dans des régions pilotes de quatre pays de l'Association des nations d'Asie du Sud-Est (ASEAN), à savoir l'Indonésie, la Malaisie, la Thaïlande et le Viet Nam.

Depuis plus de dix ans, les États-Unis étudient la possibilité, pour alimenter leur bioéconomie nationale, de porter à un milliard de tonnes leur production de biomasse sèche. Le premier « Billion Ton Report » est paru en 2005 (US DOE, 2005) avec des mises à jour en 2011 et 2016 (US DOE, 2011 ; US DOE 2016). Tous ces rapports s'articulent autour du même principe de base : les États-Unis pourraient, selon les hypothèses qui sont faites, produire un milliard de tonnes de biomasse sèche par an, ce qui leur permettrait de remplacer une part importante

Encadré 3.3. Exemples de stratégies innovantes d’approvisionnement en biomasse aux États-Unis et au Japon (suite)

de leur essence (d’origine fossile) par des biocarburants (renouvelables). À l’heure actuelle, le pays consomme 365 millions de tonnes sèches de production végétale agricole, de ressources forestières et de déchets pour fabriquer des biocarburants, des produits biochimiques et d’autres bioproduits. L’estimation principale en exergue des rapports indique que les États-Unis pourraient, en développant leurs ressources biomassiques et en levant les obstacles existants, créer une bioéconomie pesant un milliard de tonnes et ainsi multiplier par cinq les recettes directes de cette filière, ce qui rapporterait près de 259 milliards USD et génèrerait 1.1 million de nouveaux emplois dans l’économie américaine tout entière d’ici 2030 (Rogers et al., 2017).

S’agissant de la durabilité de la biomasse, la réalité est qu’il n’existe pour l’heure ni définition exhaustive ou universelle de la durabilité, ni outil idéal pour la mesurer, ni consensus international sur les indicateurs à employer. Les indicateurs utilisés pour catégoriser la durabilité de la biomasse ne prévoient encore aucune contrainte quant au type de biomasse. Pourtant, l’expansion de la bioéconomie mondiale suscite des inquiétudes importantes en termes de durabilité : impacts possibles sur la sécurité de l’eau et des sols, risques pour la biodiversité, émissions et empreinte carbone, valeurs énergétiques nettes, et changements, en particulier indirects, d’affectation des sols (BR&D, 2016). La production de biomasse nécessite que les pouvoirs publics se penchent sur ces questions (Knudsen, Hermansen et Thostrup, 2015) et élaborent les normes appropriées. La génomique peut aussi contribuer largement à la durabilité de la biomasse, un fait dont de nombreux pays ne tiennent pas suffisamment compte⁶.

Soutien des installations de production : financement des bioraffineries de démonstration et de taille industrielle

Les bioraffineries de démonstration sont difficiles à financer car le volume de production n’est pas suffisant pour agir sur le prix de marché (Philp, Guy et Ritchie, 2013). Les bioraffineries de taille industrielle sont pour leur part difficiles à construire pour des raisons surtout liées aux incertitudes qui entourent les technologies, l’approvisionnement et l’action publique (BR&D, 2016). Le secteur privé n’étant pas prêt à supporter l’intégralité de la charge financière de ces gros investissements, il a fallu des partenariats public-privé (PPP) pour limiter les risques encourus par les investisseurs privés. Le PPP le plus important qui existe actuellement en Europe est le Bio-based Industries Joint Undertaking (BBI JU).

La phase de démonstration est une étape critique sur la voie de la commercialisation. L’installation, plus grande que celle de la phase pilote, permet souvent de mettre en évidence des limitations économiques et techniques qu’il est beaucoup moins coûteux de corriger à cette étape plutôt qu’au moment de l’exploitation industrielle.

Aux États-Unis, ces technologies sont le plus souvent financées par des apports de fonds propres combinés à des ressources publiques, ces dernières prenant la forme soit de subventions fédérales, soit de garanties de prêts apportées par l’État fédéral (encadré 3.4). En apportant une telle garantie, l’État (le garant) s’engage à assumer l’obligation d’un emprunteur privé si celui-ci fait défaut. Les garanties de prêts s’apparentent donc à des financements de projets traditionnels, mais l’État fédéral accepte le risque technologique et apporte son soutien, ce qui accélère les étapes de l’approbation et du contrôle.

Encadré 3.4. Garanties de prêt et programme 9003 de la loi agricole du Département de l'Agriculture des États-Unis

Dans la loi agricole (*Farm Bill*) de 2014, le programme 9003 du Département de l'Agriculture des États-Unis, précédemment intitulé *Biorefinery Assistance Program*, est devenu le *Biorefinery, Renewable Chemical, and Biobased Product Manufacturing Assistance Program*, un titre qui inclut désormais, outre les bioraffineries, les produits chimiques renouvelables et les bioproduits. Le Département de l'Agriculture a reçu pour consigne d'assurer la diversité des types de projets approuvés et de limiter à 15 % du total des fonds obligatoires disponibles les montants utilisés pour les garanties de prêt destinées à promouvoir la fabrication de bioproduits. On retiendra toutefois de cette mesure que le dispositif s'applique désormais à la fois aux biocarburants et aux produits et matières biosourcés. Les garanties de prêts peuvent aller jusqu'à 250 millions USD.

Ces fonds peuvent être utilisés pour financer le développement, la construction et la modernisation des installations suivantes :

- bioraffineries de taille industrielle utilisant les technologies éligibles
- installations de biofabrication utilisant des équipements de traitement et de fabrication à l'échelle industrielle fondés sur des technologies nouvelles pour convertir les produits chimiques renouvelables et autres produits biosourcés des bioraffineries en produits destinés à l'utilisateur final.

Les demandeurs peuvent, dans certaines conditions, avoir accès à des solutions de refinancement.

Il importe de noter que le programme fait une distinction entre les bioraffineries et les installations de biofabrication. La participation de l'État fédéral (garantie de prêt plus autres financements fédéraux) ne peut pas dépasser 80 % du total des coûts du projet éligible. L'emprunteur et les autres parties au projet doivent apporter une part significative de fonds propres.

Le dispositif InnovFin – Financement européen de l'innovation, une initiative conjointe du Groupe Banque européenne d'investissement (BEI) et de la Commission européenne au titre du programme Horizon 2020, accorde des garanties ou des prêts directs à des projets de recherche et d'innovation, en particulier des projets de démonstrateurs industriels (Scarlat et al., 2015). Il s'agit d'une avancée majeure pour l'Europe dont les mécanismes de financement de la bioéconomie n'incluaient précédemment pas les garanties de prêt.

L'action publique devrait s'intéresser aux bioraffineries intégrées

Le meilleur moyen de s'affranchir de la volatilité des prix des matières de base et des produits pourrait être de fabriquer toute une gamme de combustibles et de produits chimiques dans une seule et même installation (encadré 3.5). Mais une telle installation, dite « bioraffinerie intégrée », est techniquement très complexe. Aujourd'hui, le concept de bioraffinerie intégrée est devenu synonyme de celui de bioraffinerie cellulosique. Les quelques bioraffineries cellulosiques qui existent dans le monde produisent de l'éthanol cellulosique en petite quantité.

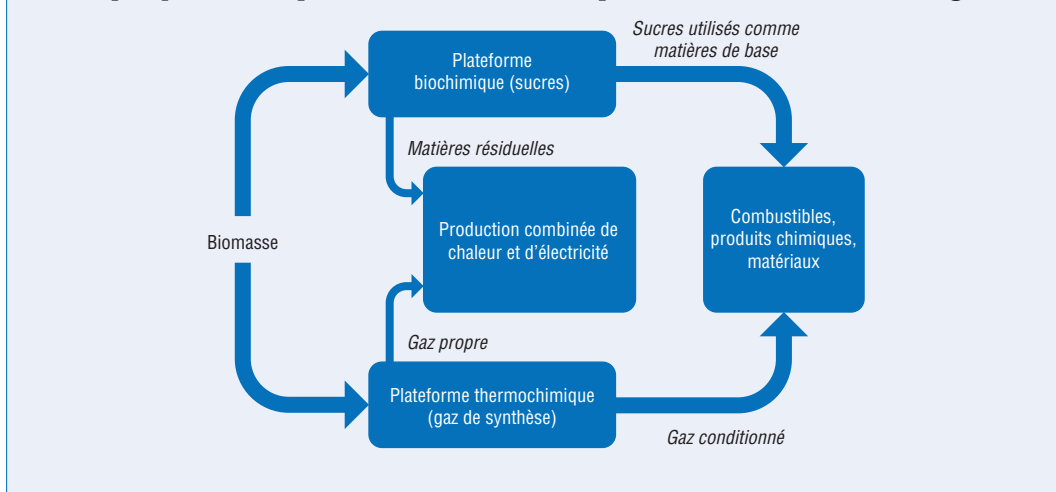
Le modèle de la bioraffinerie intégrée présente plusieurs avantages. Une bioraffinerie intégrée a les moyens de fabriquer d'autres produits ou de consommer d'autres matières de base lorsque, par exemple, l'une de ces dernières devient trop chère. Elle peut aussi, grâce à cette flexibilité, s'adapter aux disponibilités saisonnières (Giuliano, Poloetto et Barletta, 2016).

Les économies d'échelle que permet sa taille industrielle réduisent les coûts de traitement des co-produits obtenus de petites quantités de forte valeur. De plus, comme certains équipements sont communs à plusieurs procédés, il est moins nécessaire de dupliquer les matériels, ce qui réduit le coût en capital. Enfin, la coproduction permet certaines intégrations supplémentaires (par exemple, ce sont l'électricité et la vapeur coproduites avec les résidus de fabrication qui alimentent en énergie l'installation).

Encadré 3.5. Le concept de bioraffinerie intégrée

Une bioraffinerie intégrée transforme de la biomasse en combustibles, produits chimiques, matériaux ou électricité (Keegan et al., 2013). Il n'existe pas encore de bioraffinerie véritablement intégrée qui transformerait l'intégralité de la biomasse, même si certaines installations tendent vers ce taux de conversion. Pour l'heure, les bioraffineries ne sont pas conçues pour fabriquer tout un éventail de produits chimiques à partir de nombreuses matières de base différentes. Les bioraffineries mono-intrant mono-produit, en particulier, courent des risques économiques à cause des variations de prix des matières de base (en particulier, les cultures vivrières). Quand les matières de base et les produits sont diversifiés, il est possible d'adapter le fonctionnement de l'installation aux conditions économiques.

Graphique 3.3. Représentation schématique d'une bioraffinerie intégrée



Synthèse des types de bioraffinerie

Il n'existe que quelques types de bioraffinerie (voir encadré 3.5 et République fédérale d'Allemagne, 2012). Les bioraffineries de première génération utilisent généralement comme matière de base une culture vivrière quelconque. En termes de durabilité économique, la canne à sucre brésilienne est actuellement la matière première privilégiée des bioraffineries (par exemple, Gouvernement du Royaume-Uni, 2012). En 2011, il y avait 490 installations de production de biogazole et d'éthanol à partir de canne à sucre (Brazil Biotech Map, 2011). À la mi-2016, ce chiffre avoisinait les 300.

Les préoccupations de tous bords concernant l'utilisation de cultures vivrières comme matières premières ont conduit au développement de diverses bioraffineries de deuxième génération. La filière la plus importante est celle qui utilise des matières de base lignocellulosiques pour fabriquer, dans des bioraffineries intégrées, des produits chimiques, des matériaux et même de la bioénergie à partir des résidus. La biomasse lignocellulosique

se répartit en quatre grandes catégories (Tan, Yu et Shang, 2011) : les résidus agricoles (par exemple, tiges et feuilles de maïs, bagasse de canne à sucre) ; les cultures dédiées à la production énergétique ; les résidus du bois (y compris déchets de scieries et d'usines à papier) et les déchets solides fermentables et papetiers municipaux. Une autre filière émergente à fort potentiel est celle qui consiste à transformer par fermentation des effluents gazeux industriels en produits utiles. Les bioraffineries de ce type, autrefois purement théoriques, sont aujourd'hui une réalité, mais elles sont encore extrêmement rares.

Les bioraffineries alimentées par des résidus du bois bénéficient d'une attention croissante compte tenu de l'évolution des modes de production papetière qu'on observe dans le monde. Leur déploiement fait sens dans de nombreux pays dotés depuis longtemps d'une industrie papetière. La densité énergétique relativement élevée du bois est intéressante du point de vue du transport. Les gammes de produits les plus populaires sont généralement fabriquées à partir de fibres de bois (biocarburants, pâte/papier, biomatériaux, produits biochimiques). L'écorce et les autres parties des arbres, comme les feuilles, qui constituent les déchets forestiers, restent une ressource sous-exploitée (Devappa, Rakshit et Dekker, 2015). Les bioraffineries du bois les plus avancées se trouvent dans les pays scandinaves.

Encadré 3.6. Synthèse d'une enquête de l'OCDE sur les catégories de bioraffineries

L'OCDE a élaboré une enquête à l'intention des exploitants de bioraffineries. Les cinq exploitants qui ont répondu représentaient les principaux types de bioraffineries :

- première génération (France) utilisant des cultures vivrières (en particulier, betterave à sucre, blé et alfalfa)
- deuxième génération (Norvège) utilisant du bois pour produire de l'éthanol et des produits biochimiques
- deuxième génération (Italie) utilisant de la lignocellulose (paille de blé, paille de riz et canne géante [qui n'est pas la canne à sucre])
- deuxième génération (Canada) utilisant des déchets solides municipaux non compostables et non recyclables
- deuxième génération (Italie) utilisant des chardons non comestibles pour produire des produits biochimiques.

Points communs

Compte tenu de l'éventail des matières de base et des technologies de procédé, ces bioraffineries présentent de nombreuses différences. Elles ont néanmoins aussi des points communs, les plus significatifs pour les décideurs étant les suivants : approvisionnement local en biomasse grâce à des accords passés avec des agriculteurs, des coopératives et des villes (pour les déchets municipaux) ; technologies propriétaires (aucune bioraffinerie n'utilise de technologie sous licence) même si des partenariats sont en place ; toutes ont reçu un financement public sous une forme ou une autre (au moins pour la R-D et les projets pilotes).

Enseignements à tirer

- Dans un secteur où les risques financiers sont très élevés, le principe qui veut que tous les risques incombent au premier qui change ne s'applique pas : les types de bioraffinerie sont en constante évolution et les matières de base, les technologies de conversion et les produits sont variés. Les différentes matières de base, les différentes technologies, les différents modèles économiques peuvent intéresser tout un éventail d'investisseurs.

Encadré 3.6. Synthèse d'une enquête de l'OCDE sur les catégories de bioraffineries (suite)

- Les modèles économiques de type coopératif ou familial semble un moyen de promouvoir les projets risqués qui s'inscrivent à plus long terme.
- La question de l'acceptabilité des bioraffineries ne devrait pas être difficile à résoudre : certaines sont implantées dans des collectivités locales depuis 60 à 70 ans.
- L'approvisionnement local en biomasse doit être mis en œuvre via des accords spécifiques passés avec des agriculteurs locaux, des coopératives ou des municipalités. Ces accords sont indispensables pour la durabilité économique, environnementale et sociale.
- Le modèle économique des bioraffineries intégrées rend la fabrication de produits à faible valeur (biocarburant, éthanol, produits chimiques de base) une condition préalable à la production de petits volumes de spécialités chimiques ou d'ingrédients pour les produits cosmétiques, médicamenteux et textiles à plus forte valeur.
- Toutes les bioraffineries reçoivent ou ont reçu une certaine forme de financement public (au moins pour la R-D et les projets pilotes). Toutes ont la perspective de dupliquer leur installation ou de déployer leur technologie sous licence.
- La preuve de la faisabilité technologique ayant été apportée, un nombre accru d'investisseurs et d'exploitants devraient avoir davantage d'assurance dans les nouveaux projets. Cela dépendra néanmoins encore en partie des prix du pétrole et du gaz.
- Les bioraffineries de cet échantillon ont nécessité des investissements allant de 100 millions EUR à 300 millions EUR, des chiffres substantiels mais bien inférieurs aux investissements dans les raffineries de pétrole.

Perspectives et entraves

- La compétitivité des bioraffineries dépend énormément de l'existence, pour la biomasse et les matières de base renouvelables, de règles équivalentes à celles qui s'appliquent aux combustibles fossiles (voir Philp, 2015).
- Les politiques publiques européennes devraient être stables au cours du temps. Par exemple, des modifications sur l'obligation et le taux d'incorporation de biocarburants dans les carburants fossiles sont en discussion. Les investisseurs craignent une volte-face des gouvernements, qui pourrait laisser les investissements bloqués.
- Les incertitudes qui entourent la volatilité des prix mondiaux de l'énergie (concurrence du pétrole, du gaz et du charbon) et des produits agricoles rendent extrêmement risqués les plans de développement des nouveaux projets.

Pour conclure, quand on examine en parallèle les enseignements positifs à tirer d'un échantillon de bioraffineries et les défis à relever au niveau mondial, on constate qu'il devrait être possible, dans les décennies à venir, de lever les obstacles et d'avancer beaucoup plus vite sur la voie de la bioéconomie, pour autant que tous les acteurs (secteur public, secteur privé et société civile) dialoguent entre eux. D'autres études de cas seront nécessaires au fil du temps, mais la bioéconomie industrielle a d'ores et déjà franchi avec succès l'étape de la preuve de concept.

Source : Schieb (2017), « OECD survey of biorefinery types ».

À l'avenir, les bioraffineries marines pourraient aussi constituer une solution importante, même si elles présentent des difficultés techniques (Golberg et Liberzon, 2015). Utiliser des algues à la fois comme matière de base et comme biocatalyseur a pour principal avantage d'atténuer la pression qui pèse sur les sols et les cultures vivrières. Les algues ont aussi pour avantage de contenir beaucoup plus d'huile que les cultures terrestres.

Incitation par le marché (mesures axées sur la demande)

Obligations et objectifs

L'examen des obligations et des objectifs révèle les différences entre les stratégies que l'Europe et les États-Unis ont choisi d'appliquer pour faire entrer les biocarburants sur le marché. Dans l'Union européenne (UE), plusieurs États membres ont pris volontairement l'initiative (ce n'était pas une obligation de l'UE) de fixer des objectifs d'incorporation (c'est-à-dire, un pourcentage de biocarburant à mélanger à l'essence ou au gazole). Aux États-Unis, en revanche, les pouvoirs publics ont décidé d'établir des obligations plutôt que des objectifs d'incorporation moins contraignants (Ziolkowska et al., 2010). Ils ont notamment défini les volumes en valeur absolue de biocarburants que le secteur privé doit produire. Ces deux instruments – obligations et objectifs – sont devenus des outils standard pour soutenir l'entrée des biocarburants sur le marché dans les pays de l'OCDE et BRICS (voir OCDE, 2014b).

L'obligation sans doute la plus connue en matière de bioproduction a été mise en place aux États-Unis par la loi de 2007 sur l'indépendance et la sécurité énergétiques (*Energy Independence and Security Act, EISA*) (Federal Register, 2010) : elle impose des volumes élevés de production de biocarburants. Avec cette règle et les obligations d'incorporation, les États-Unis ont ainsi mis en place une politique exhaustive de soutien aux biocarburants.

Cependant, si les obligations n'établissent aucune distinction entre les biocarburants en fonction des matières de base ou des méthodes de production, et ce malgré des divergences importantes en termes de coûts et d'avantages environnementaux, les États pourraient se retrouver à soutenir un biocarburant plus cher que son équivalent pétrolier et moins performant sur le plan écologique (Initiative mondiale sur les subventions, 2007). Pour éviter ce piège, il est important, à court terme, d'harmoniser les analyses du cycle de vie (ACV) à l'échelle de l'industrie et, à plus long terme, de conduire des évaluations de la durabilité qui soient robustes et cohérentes au niveau international.

Marchés publics

Les marchés publics représentent autour de 13 % du produit intérieur brut (PIB) en moyenne dans les pays de l'OCDE (OCDE, 2012b). Bien qu'il soit possible d'y faire appel pour faciliter la commercialisation des produits innovants de la bioéconomie, des difficultés se posent du côté de l'offre comme du côté de la demande.

Du côté de l'offre, seule une petite proportion de l'éventail des produits de la bioéconomie se prête au commerce d'entreprise à consommateur (B2C), le marché sur lequel les acheteurs publics opèrent habituellement (par exemple, carburants et produits de consommation). Les bioproduits sont pour la plupart des produits chimiques ou intermédiaires qui s'échangent uniquement sur le marché interentreprises (B2B).

Du côté de la demande, les marchés publics forment un paysage institutionnel fragmenté : le nombre d'acheteurs publics répertoriés dans l'UE dépasse 2 100 au seul niveau des administrations nationales. Le nombre total des acteurs publics municipaux et régionaux, au sein de l'UE, est estimé, à 250 000. Une telle fragmentation empêche la coordination ainsi que le renforcement des capacités et des savoirs propres au secteur d'activité.

Par ailleurs, les acheteurs publics tendent à être très sensibles au prix, ce qui constitue un frein pour tout produit innovant. Divers instruments d'action visent à lever cet obstacle. Par exemple, aux États-Unis, le programme *BioPreferred* du Département de l'Agriculture vise spécifiquement à augmenter l'achat et l'utilisation des bioproduits : il propose ainsi un

catalogue de quelque 14 000 produits biosourcés. Dans l'UE, la législation de 2014 sur les marchés publics innovants facilite la mise en œuvre de solutions innovantes et le développement de produits innovants, même si elle ne mentionne pas des produits ou des groupes de produits innovants spécifiques. Des projets tels que le Forum de l'innovation biosourcée pour les marchés publics (InnProBio) visent à favoriser la montée en puissance des bioproduits sur les marchés publics européens.

Normes et certifications applicables aux bioproduits

Des normes et certifications strictes donnent confiance aux consommateurs et aux acteurs du secteur en apportant de la crédibilité aux déclarations de performance et de durabilité (tels que « biosourcé », « matière première renouvelable », « biodégradable », « recyclable » ou encore « réduction de l'impact des gaz à effet de serre »). Elles aident à vérifier certaines affirmations concernant la biodégradabilité ou la teneur en produits biosourcés, ce qui favorise le développement du marché (OCDE, 2011b). Toutes ces déclarations doivent pouvoir être vérifiées par les consommateurs, les agences de gestion des déchets et les législateurs. La vérification par un tiers est un moyen d'empêcher toute déclaration environnementale injustifiée.

Les normes ont une importance stratégique : elles constituent une base solide pour l'entrée sur le marché d'un nouveau produit ou d'une nouvelle technologie, ainsi que pour la poursuite des efforts de R-D. Elles contribuent aussi à lever les incertitudes auxquelles les entreprises doivent faire face. Leur élaboration est le fruit d'une coopération étroite entre industriels, chercheurs et décideurs, un facteur indispensable à la création d'un environnement favorable au déploiement à pleine échelle de nouveaux produits et de nouvelles technologies.

En apportant la preuve de la conformité à des exigences juridiques, les normes fournissent également les bases scientifiques nécessaires à la mise en œuvre des lois. Elles peuvent être utilisées pour vérifier que les objectifs stratégiques et techniques sont bien atteints.

À titre d'exemple, l'Association japonaise des bioplastiques (Japan BioPlastics Association, JBPA) a lancé un programme de certification des produits contenant du plastique d'origine biomassique pour favoriser le développement du marché des bioplastiques. Elle a établi des normes et une méthodologie d'analyse et d'évaluation des plastiques, et également créé un logo facilement reconnaissable par les consommateurs. La certification de la JBPA, appelée *BiomassPla*, spécifie que les produits qui portent le logo doivent contenir 25 % en masse de plastique biosourcé.

Les étiquettes des produits doivent fournir des informations claires et fiables sur la performance environnementale des matières biosourcées. Cette règle s'applique en particulier aux bioplastiques, les plus susceptibles d'être controversés dans notre société, compte tenu du bilan négatif et des perceptions attachés à l'utilisation des pétroplastiques. Il existe aujourd'hui dans le monde de nombreux labels écologiques, ainsi qu'une grande variété de définitions et de procédures de certification. Promouvoir une harmonisation de ces écolabels à moyen terme permettrait sans doute de dégager des gains d'efficacité importants.

Taxes sur le carbone fossile et incitations à réduire les émissions

L'analyse de l'OCDE montre que le moyen le plus rentable d'atténuer le changement climatique est d'établir progressivement un signal de prix mondial du carbone en

s'appuyant sur les mécanismes de marché (OCDE, 2013a). La finalité des politiques de tarification du carbone devrait être aujourd'hui d'envoyer des signaux de prix clairs et crédibles qui favorisent la transition vers une économie bas carbone à moyen et à long terme (OCDE, 2015a). Pour fixer des prix du carbone explicites, il convient de mettre en place soit une taxe sur le carbone, exprimée en prix fixe par tonne de carbone rejeté, soit un dispositif de quotas d'émissions cessibles, qui consiste à délivrer un nombre fixe de permis pour établir l'objectif de réduction des émissions puis à laisser l'offre et la demande en déterminer le prix.

Autrefois politiquement impopulaires, les mécanismes de tarification du carbone existent désormais dans des pays, des États fédérés, des régions et des villes qui totalisent environ 12 % des émissions mondiales, soit trois fois plus qu'il y a dix ans (Rydge, 2015). La crainte qu'une tarification du carbone soit dommageable pour la compétitivité industrielle semble reculer. Pour l'heure, plus de 40 pays disposent d'un système de tarification du carbone. Cependant, les prix appliqués sont souvent très bas. Quelque 90 % des émissions produites par la consommation d'énergie ont un coût inférieur à 30 EUR par tonne (le bas de la fourchette d'estimation du coût du carbone) et 60 % ne sont soumises à aucun prix d'aucune sorte⁷.

Les pouvoirs publics peuvent utiliser les recettes de la tarification du carbone de plusieurs façons qui devraient toutes viser l'efficacité. La plus appropriée consiste sans doute à financer la transition énergétique et manufacturière qu'exige le changement climatique. Ainsi, une partie de ces recettes pourrait servir à financer des projets de R-D en bioéconomie (voir par exemple l'encadré 3.7).

Encadré 3.7. **Climate Change and Emissions Management Corporation (CCEMC) et CO₂ Solutions, Canada**

En avril 2007, l'Alberta est devenue la première juridiction d'Amérique du Nord à voter une loi sur le changement climatique exigeant des gros émetteurs de gaz à effet de serre (GES) qu'ils réduisent ces rejets. Deux ans plus tard, était créée la CCEMC, une composante fondamentale de la stratégie de l'Alberta en faveur de la lutte contre le changement climatique et de sa transition vers une économie à faible émission de carbone plus forte et plus diversifiée.

Le gouvernement de l'Alberta administre l'ensemble des financements de mise en conformité chaque année et les mutualise dans un Fonds pour la gestion des émissions et du changement climatique (CCEMF). Versés par les industriels, les montants sont mis à la disposition de la CCEMC via une subvention du gouvernement de l'Alberta.

Le règlement de l'Alberta sur les émetteurs de certains gaz stipule que les installations qui rejettent plus de 100 000 tonnes d'équivalent CO₂ par année doivent ramener ces rejets à 12 % en dessous du seuil de référence. Celles qui ne peuvent atteindre cet objectif ont trois solutions pour se mettre en conformité : améliorer leurs installations pour faire passer leurs émissions en deçà du seuil obligatoire ; acheter des crédits de performance ou des compensations carbone en Alberta ; ou verser au CCEMF 15 CAD pour chaque tonne qui dépasse la limite attribuée.

La CCEMC gère ses ressources comme un portefeuille de projets, avec un large éventail d'investissements. Elle finance des projets à tous les niveaux de la chaîne d'innovation, le plus gros de la somme revenant à des projets de démonstration ou de mise en œuvre.

Encadré 3.7. Climate Change and Emissions Management Corporation (CCEMC) et CO₂ Solutions, Canada (suite)

Par exemple, en 2012 et 2013, CO₂ Solutions (Québec) a obtenu une subvention de 5.2 millions CAD du gouvernement canadien et 7.5 millions CAD de la CCEMC grâce à l'initiative écoENERGIE sur l'innovation pour l'optimisation et le test de la technologie de captage biologique du CO₂ pendant l'extraction de sables bitumineux (CCEMC, 2015).

En novembre 2015, le gouvernement de l'Alberta a annoncé un plan de réduction des émissions de GES de la province, qui prévoit notamment de mettre fin à l'exploitation des centrales à charbon et de fixer un prix du carbone de 30 CAD par tonne jusqu'en 2018, avec des augmentations en termes réels au-delà. Ce plan a été soutenu par des groupes environnementaux et des compagnies pétrolières.

Réforme des subventions aux combustibles fossiles

Non seulement les subventions en faveur des combustibles fossiles compromettent les efforts entrepris pour atténuer le changement climatique, mais elles constituent aussi une politique coûteuse, source de nombreuses distorsions. En faussant les coûts et les prix, elles entraînent des inefficiences dans nos modes de production et de consommation d'énergie (OCDE, 2015b). Leur ordre de grandeur diffère selon la méthode de calcul. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) et le Fonds monétaire international (FMI) utilisent la méthode de l'écart de prix, c'est-à-dire la différence entre les prix intérieurs des combustibles et des prix de référence, ici les prix internationaux des combustibles. L'estimation de l'AIE varie d'une année à l'autre, mais tend à se situer autour de 500 milliards USD par an. Les différences entre les estimations avant taxe et après taxe sont très importantes⁸. Selon une estimation du FMI, les énergies fossiles ont bénéficié du montant phénoménal de 5 300 milliards USD, soit 6.5 % du PIB mondial, en subventions après taxe en 2015 (FMI, 2015)⁹. Toujours selon le FMI, éliminer les subventions après taxe en 2015 aurait pu augmenter les recettes publiques de 2 900 milliards USD (3.6 % du PIB mondial), réduire les émissions mondiales de CO₂ de plus de 20 % et diviser par plus de deux le nombre de décès prématurés liés à la pollution de l'air.

Dans les pays de l'OCDE, plus de 550 subventions à la consommation de combustibles fossiles ont été recensées (OCDE, 2012a). Elles ont totalisé ensemble entre 55 milliards USD et 90 milliards USD par an au cours de la période 2005-11. La suppression progressive des subventions inéconomes à la consommation de combustibles fossiles est une mesure politiquement difficile et impopulaire, aussi nécessaire soit-elle (The Economist, 2014). Les coûts sociaux et environnementaux des subventions aux combustibles fossiles (Whitley et van der Burg, 2015) sont rarement évidents pour le grand public et pourraient même ne pas être clairs pour les ministres des Finances (Edenhofer, 2015). Mais les pouvoirs publics pourraient utiliser l'argent économisé pour, entre autres, financer des projets et des technologies de décarbonation (Martin, 2016) tels que ceux que nécessite la bioéconomie.

Actions transversales (combinaisons de mesures axées sur l'offre et sur la demande)

Construire des indicateurs et convenir d'une terminologie et de définitions communes

Pour construire des indicateurs de performance de la bioéconomie, il est important d'avoir accès à des données robustes. Or, le terme « bioéconomie » lui-même n'a pas le même sens dans tous les pays (Viaggi, 2016). Disposer de la définition normalisée d'un

produit biosourcé (ou bioproduit) est nécessaire pour le développement tant des marchés publics que des entreprises. Le débat autour du dilemme « déchet ou ressource » (autrement dit, quelque chose est-il simplement un déchet sans valeur ou pourrait-il être utilisé comme ressource productive) (House of Lords, 2014) compte également. À cause de cette multiplicité des termes et de l'absence de définitions communes, il est difficile d'évaluer les volumes des différentes matières, aujourd'hui considérées comme des déchets, qui pourraient venir alimenter les bioraffineries. Par exemple, la collecte de données sur les « résidus agricoles » pâtit de ce problème de définition. Ce manque de clarté s'oppose à la facilité avec laquelle on peut identifier les volumes disponibles des cultures vivrières exploitables, par exemple la canne à sucre, dont on collecte à l'échelle internationale des données aisément comparables.

Comme on l'a vu plus haut dans ce chapitre, l'un des objectifs clés du bioraffinage, en particulier les biocarburants et biomatériaux de deuxième génération, est de créer de la valeur à partir de déchets (Fava et al., 2015). Les « biodéchets » ont de plus en plus d'importance pour le bioraffinage et les bioraffineries devraient connaître les tonnages lorsqu'elles établissent leurs feuilles de route. Cependant, toute définition qui exclut les résidus agricoles et forestiers modifie drastiquement les estimations disponibles. La définition de ce qu'on appelle « l'élimination des déchets » pourrait être modifiée pour autoriser la collecte, le transport et le tri en vue d'une éventuelle conversion en bioraffinerie. De fait, si une matière est appelée à être transformée dans une bioraffinerie, il convient de la considérer non plus comme un déchet mais comme une ressource.

Développer les compétences et l'éducation dans le secteur pour former la main d'œuvre

La bioproduction et la bioéconomie constituent généralement des défis pour l'enseignement supérieur, qu'il s'agit de relever rapidement. Par exemple, rien qu'aux Pays-Bas, on s'attend à une demande de 10 000 experts des biotechnologies au cours des dix ans à venir (Langeveld, Meesters et Breure, 2016).

Pour beaucoup, la biologie de synthèse est un domaine qui relève des sciences de l'ingénieur, et non de la biologie (Andrianantoandro et al., 2006). Ses spécialistes doivent être formés dans une ou plusieurs disciplines essentielles – génétique, biologie des systèmes, microbiologie ou chimie –, mais ils doivent aussi maîtriser les techniques de l'ingénierie, et notamment ses méthodes quantitatives, pour pouvoir décomposer la complexité biologique en structures élémentaires normalisées, ou concevoir de nouveaux composants et systèmes biologiques. Or, être un bon ingénieur nécessite d'avoir des compétences en mathématiques, en informatique et en modélisation (Delebecque et Philp, 2015). La pluridisciplinarité est un thème récurrent dans l'enseignement de la biotechnologie industrielle. Par exemple, pour résoudre les problèmes complexes liés à l'augmentation du nombre de biopolymères, « les chercheurs devront être en mesure de collaborer à la croisée des disciplines conventionnelles que sont l'agriculture, la biologie, la biochimie, la catalyse, la chimie des polymères, les sciences des matériaux, les sciences de l'ingénieur, l'évaluation environnementale, l'économie et les politiques publiques » (Zhu, Romain et Williams, 2016).

Il est difficile pour la jeune bioindustrie de trouver des ingénieurs en automatisation spécialistes de la production de souches à haut rendement. Pendant longtemps, il a également été difficile de trouver des personnes qui maîtrisent les procédés de fermentation. Malgré tout, le personnel qu'il est le plus compliqué de recruter est sans doute celui qui a une bonne connaissance de la conception et de la statistique expérimentales (Sadowski, Grant et Fell, 2016). Résoudre ce problème prend toute son importance maintenant qu'il est de plus en plus courant de travailler avec de grands ensembles de données. La bioproduction a besoin

de recruter dans tous ces corps de métier, or elle se heurte pour l'heure à une difficulté essentielle : le nombre de travailleurs qualifiés dont elle a besoin est limité parce qu'elle constitue encore une niche du secteur manufacturier, donc il n'est pas évident pour les pouvoirs publics de donner la priorité à l'enseignement dans ces disciplines.

L'Écosse doit relever toute une série de défis pour favoriser au mieux le développement de son industrie biotechnologique, et en particulier celui de la pénurie des compétences. En réponse directe aux attentes du secteur, le Centre industriel d'innovation dans les biotechnologies (Industrial Biotechnology Innovation Centre, IBioIC) a créé des cursus adaptés pour satisfaire les besoins à tous les niveaux de l'enseignement : des filières d'apprentissage modernes et des diplômes nationaux de niveau supérieur (*Higher National Diplomas*, HND) en biotechnologie industrielle, le premier *Master of Science* (MSc) collaboratif du Royaume-Uni en biotechnologie industrielle, et des bourses doctorales (PhD) avec des universités d'Écosse et des partenaires industriels dans tout le Royaume-Uni. L'IBioIC s'est vu confier la mission de rapporter entre 1 milliard GBP et 1.5 milliard GBP de valeur ajoutée brute à l'économie écossaise d'ici 2025 grâce à l'industrialisation de la biologie. Pour s'acquitter de cette tâche, il doit pouvoir compter sur un apport continu de personnes talentueuses. Cet exemple illustre combien est nécessaire non seulement la capacité de recherche, mais aussi la main d'œuvre.

Intégrer des compétences managériales et transférables aux cursus et recourir à des cours en ligne gratuits (MOOC)

Le programme de *Master of Business Administration* (MBA) classique n'est pas adapté à l'industrie biotechnologique en général car elle connaît des évolutions rapides qui rendent importantes la gestion du changement. Quelques cursus courts déjà proposés aux cadres du secteur leur permettent de se tenir informés des derniers développements sans avoir à quitter leur poste pendant de longues périodes (il existe par exemple des MBA dont les enseignements ont lieu par sessions de trois jours). En 2015, le programme londonien SynbiCITE a ainsi proposé un MBA de quatre jours autour des principales stratégies à suivre pour établir, développer et gérer une entreprise de biotechnologie axée sur la biologie de synthèse.

Cela fait déjà plusieurs décennies que se tiennent des échanges concernant les moyens de rendre les diplômes de recherche plus flexibles (Académie nationale des sciences, 1995) en y incluant des formations à des compétences transférables. Les chercheurs d'aujourd'hui doivent acquérir des compétences dans des domaines comme la communication, la résolution de problèmes, le travail en équipe, le réseautage et le management. Une formation officielle dans des domaines de compétences transférables présente plusieurs avantages, comme nous l'indique la littérature (par exemple, OCDE, 2012c).

L'expérience traditionnelle en campus universitaire pourrait être révolutionnée par l'explosion des MOOC qui élargiront, voire remplaceront en partie, les travaux en classe et en laboratoire. À titre d'exemple, l'Université technique de Delft (Pays-Bas) et l'Université de Campinas (Brésil) proposent ensemble un MOOC spécialisé dans la biotechnologie industrielle, qui a pour but de transmettre des savoirs et des outils au service de la conception de procédés biotechnologiques durables. Les étudiants mettent en pratique les bases de la biotechnologie industrielle pour élaborer des procédés de fermentation destinés à la production de carburants, de produits chimiques et de denrées alimentaires. Pendant leur formation, ils doivent concevoir un procédé biotechnologique et évaluer sa performance et sa durabilité.

Créer et gérer des établissements de formation de spécialistes grâce à des partenariats public-privé

Les chercheurs en début de carrière ont du mal à acquérir de l'expérience en bioproduction car les universités ne disposent généralement pas des installations nécessaires. Un modèle de formation intéressant est celui des instituts nationaux d'Irlande. L'un d'eux, l'Institut national de recherche et de formation en biotraitement (National Institute for Bioprocessing Research and Training, NIBRT) est une installation dédiée à la formation en biotraitement. Il se trouve que l'Irlande, malgré sa taille relativement modeste, possède un grand secteur pharmaceutique. L'institut met au point des solutions de formation personnalisées pour ses clients, le public visé pouvant aller de l'opérateur au cadre supérieur, et la formation peut être dispensée dans un environnement de production réaliste. Ce type d'environnement, plutôt rare dans les universités, est mieux adapté à la formation des professionnels du secteur. Une telle installation pourrait aussi servir à donner aux étudiants une première expérience des conditions de travail en milieu industriel.

Une autre solution consiste à proposer des stages dans des centres de recherche industrielle comme Fraunhofer en Allemagne et VTT en Finlande, ou dans des instituts de recherche tels que l'Organisme de recherche scientifique et industrielle (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) en Australie, le RIKEN au Japon, l'Institut de recherche en bioscience et biotechnologie (Korea Research Institute of Bioscience & Biotechnology, KRIBB) en Corée ou encore le KAIST en Corée également (encadré 3.8). De tels stages permettent aux étudiants d'acquérir des compétences pratiques sans avoir à satisfaire aux exigences universitaires telles que la publication d'articles dans des périodiques.

Encadré 3.8. Établissements de recherche et biotechnologie industrielle

Plusieurs établissements de recherche prestigieux proposent des services dérivés de leurs activités de recherche en biotechnologie industrielle. Ces services pourraient s'avérer déterminants pour le renforcement des capacités des bioéconomies nationales. En voici quelques exemples.

CSIRO, Australie. Le CSIRO collabore avec un large éventail de secteurs d'activité : agriculture et alimentation ; santé et biosécurité ; numérique, énergie, utilisation des sols et eau ; secteur manufacturier ; ressources minérales ; océans. Les recherches en biotechnologie industrielle et environnementale sont les suivantes : bioprocédés pour une gestion durable des ressources ; catalyseurs biologiques pour des industries durables ; compréhension des procédés métaboliques.

Entre autres projets, le CSIRO cherche à utiliser les flux de déchets d'eucalyptus des industries du bois ou du papier pour fabriquer des bouteilles et des emballages en polytéréphtalate d'éthylène (PET) biosourcé. Ce composé chimique aromatique peut être soumis à des transformations supplémentaires pour donner des dérivés à forte valeur ajoutée en mesure de remplacer les additifs pétrosourcés qui entrent dans la composition des matériaux d'emballage. L'expertise acquise en biocatalyse et en ingénierie enzymatique est étendue au développement des capacités en biologie de synthèse. Le CSIRO a mis au point et breveté un système efficace de nano-usine enzymatique qui comprend plusieurs nano-réacteurs capables de convertir le glycérol en molécules à forte valeur, par exemple des produits pharmaceutiques. Il a également élaboré une technique de production de graphène à partir d'huile de soja (Seo et al., 2017).

Encadré 3.8. **Établissements de recherche et biotechnologie industrielle** (suite)

RIKEN, Japon. Le RIKEN est le plus gros établissement de recherche fondamentale et appliquée du Japon. Il mène des activités de recherche fondamentale tout en visant l'innovation. Son programme consacré à l'ingénierie de la biomasse fait intervenir plusieurs disciplines telles que les bioplastiques, la génomique de synthèse, la recherche sur les enzymes, la recherche sur la cellulose et la recherche sur les usines cellulaires. Le RIKEN dispose aussi d'un bureau de développement commercial qui promeut la collaboration en fonction des besoins de l'industrie¹. Son programme *Junior Research Associate (JRA)* fournit des postes à temps partiel dans ses installations à de jeunes chercheurs inscrits en thèse dans une université japonaise. De cette façon, le RIKEN donne à des doctorants la possibilité de mener des travaux de recherche aux côtés de ses scientifiques, et se donne les moyens de renforcer ses relations avec les universités japonaises.

KRIBB, Corée. Le KRIBB compte plusieurs centres spécialisés dont la mission est de répondre aux besoins de la bioproduction : un centre de recherche sur les biomatériaux industriels, un centre de recherche sur la biologie de synthèse et les produits biochimiques, un centre de recherche sur les usines cellulaires et un centre de génie des procédés biotechnologiques. Il dispose également d'un centre d'aide aux PME qui soutient le développement des capacités et la croissance des PME axées sur les biotechnologies.

KAIST, Corée. Le KAIST est un établissement de premier plan dans le domaine de l'ingénierie métabolique, qui se consacre en particulier à la bioproduction de polymères et de molécules plateformes à usage industriel (Lee et al., 2011). Au moins trois centres du KAIST contribuent aux travaux dans le domaine de la biotechnologie industrielle : le centre de la biotechnologie de synthèse et des systèmes, le centre de recherche sur le génie des procédés biotechnologiques, et le centre de recherche en bio-informatique.

1. Par exemple, l'équipe chargée d'étudier les usines cellulaires a biosynthétisé le 4-vinyl phénol, le monomère d'un plastique aux propriétés analogues à celles du polystyrène (Noda et al., 2015).

Une réglementation insuffisante peut être dommageable

La réglementation recouvre la mise en place de règles par l'administration et les instances gouvernementales dans le but d'influer sur les comportements des acteurs privés de l'économie. En matière d'innovation, la vocation première de la réglementation devrait être de stimuler l'innovation, même si l'effet contraire est indéniablement possible. Une réglementation complexe et chronophage est beaucoup plus dommageable pour les petites entreprises axées sur les biotechnologies que pour les grandes. Les pouvoirs publics pourraient agir pour limiter cet impact.

Une étude conduite pour le gouvernement des Pays-Bas (Sira Consulting, 2011) a identifié quelque 80 obstacles réglementaires à la bioéconomie, qu'elle a répartis en plusieurs catégories :

- **Contraintes fondamentales.** Ces contraintes nécessitent une démarche politique et stratégique (par exemple, droits d'importation, règles équivalentes pour tous, certification, faisabilité financière).
- **Contraintes antagonistes.** Ces contraintes ne peuvent pas être supprimées, mais les pouvoirs publics peuvent aider les entreprises à satisfaire à la réglementation (par exemple, règlement REACH¹⁰).
- **Contraintes structurelles.** Ces contraintes nécessitent d'ajuster la réglementation, sans exiger d'action politique ou stratégique.

- **Contraintes opérationnelles.** Dans ce cas, ce n'est pas la réglementation qui est le problème, mais sa mise en œuvre par les autorités locales, par exemple. Ces contraintes peuvent entraîner, en particulier pour les PME, des obstacles importants à l'investissement dans la bioéconomie.

Dans la bioéconomie, un exemple souvent cité de réglementation ayant réussi à stimuler l'innovation est l'interdiction des sacs en plastique à usage unique en Italie (voir par exemple, OCDE, 2013c). En janvier 2011, l'Italie a promu une réglementation inédite dont l'objectif était de remplacer les sacs en plastique traditionnels par des sacs biodégradables et compostables (en conformité avec la norme CEN harmonisée 13432) et des sacs réutilisables à longue durée de vie. On estime que cette réglementation a eu plusieurs effets souhaitables. Elle a notamment déclenché de nouveaux investissements dans la production de bioplastiques, avec des effets en cascade positifs tout au long de la chaîne de valeur, et permis d'améliorer la gestion des déchets, les citoyens italiens adoptant peu à peu des comportements positifs pour la durabilité environnementale.

Faire la synthèse : l'innovation des systèmes au service d'une économie coordonnée

L'innovation des systèmes est une démarche transversale consistant à mobiliser une combinaison d'innovations technologiques et sociales pour résoudre des problèmes systémiques par nature. Faisant intervenir de nombreux acteurs des différents niveaux de l'administration ainsi que de sphères non gouvernementales, elle se place dans une perspective à long terme. C'est pourquoi, dans toute politique d'innovation système, la gouvernance est un facteur déterminant.

Étant donné la complexité de ses chaînes de valeur et d'approvisionnement, la bioéconomie implique nécessairement l'innovation des systèmes. Par exemple, la production de carburants est un système qui s'étend des activités d'exploration et de forage jusqu'à l'automobile et au-delà. Quand l'action publique est menée dans des domaines si interconnectés, il est possible que des facteurs externes la détournent de son objectif initial. À titre d'exemple de la complexité et du risque encouru, considérons le cas de la Suède qui a tenté d'introduire le carburant éthanol (encadré 3.9) pour se libérer de ses importations de pétrole brut (Commission pour l'indépendance pétrolière, 2006), et qui s'est heurtée à différents obstacles, parmi lesquels le manque d'adhésion du public (Sprei, 2013).

Encadré 3.9. Suède, éthanol, innovation systémique et adhésion du public

La transition de l'essence à l'éthanol nécessite des véhicules polycarburants pouvant rouler à l'E85 (85 % d'éthanol et 15 % d'essence). Dans un premier temps, ces véhicules ont été importés en Suède. Ford y a commercialisé le premier modèle polycarburant en 2002. À partir de 2005, Saab et Volvo ont choisi d'entrer à leur tour sur le marché. Dans les années qui ont suivi, le nombre de modèles polycarburants a continué d'augmenter, jusqu'à 74 différents en 2010. La part des ventes elle aussi a progressé chaque année, pour atteindre près de 25 % du marché total en 2008. Mais, après cette date, les ventes ont diminuées et ne représentaient plus que 5 % des voitures neuves vendues en 2011.

Dans le nouveau système, on favorise la demande de véhicules polycarburants, mais un véhicule polycarburant peut aussi rouler à l'essence classique. C'est pourquoi il faut commencer par établir l'infrastructure permettant d'acheter du carburant E85, et aussi inciter les consommateurs à y recourir s'il est plus coûteux que l'essence ordinaire. L'éthanol et les carburants alternatifs ont donc bénéficié d'importantes mesures de et les carburants

Encadré 3.9. Suède, éthanol, innovation systémique et adhésion du public (suite)

alternatifs ont donc bénéficié d'importantes mesures de soutien de la part des autorités suédoises, allant de l'obligation de proposer un carburant alternatif dans les stations-service à la subvention à l'achat d'un véhicule polycarburant. Les mesures prises incluaient:

- remise de 10 000 SEK (plus de 1 000 EUR) pour les acheteurs d'un véhicule polycarburant
- exemption du péage de congestion à Stockholm
- remise sur le prix de l'assurance
- gratuité de places de parking dans la plupart des grandes villes suédoises
- réduction de la taxe annuelle d'immatriculation du véhicule
- réduction de 20 % de la taxe sur les véhicules de sociétés si les véhicules sont polycarburants
- depuis 2005, obligation pour les stations-service du pays qui vendent plus de 3 millions de litres de carburant par an de proposer au moins un type de biocarburant à la vente (Parlement de Suède, 2009).

En Suède, les carburants font l'objet à la fois d'une taxe sur le carbone et d'une taxe sur l'énergie. Les biocarburants en ont cependant été exemptés, ce qui les a rendus plus compétitifs en termes de prix et a encouragé leur utilisation.

D'avril 2007 à fin juin 2009, les particuliers ont bénéficié d'une remise de 10 000 SEK pour l'achat d'un véhicule dit « vert », comprenant les véhicules polycarburants consommant moins de 9.2 litres pour 100 kilomètres (km). Cette remise en juin 2009 a été remplacée par une exonération de la taxe de circulation pendant cinq ans. Cette taxe est calculée en fonction des émissions de CO₂ du véhicule et variable d'un modèle à un autre. Ce changement explique une part de la baisse des ventes aux particuliers. Cependant, les ventes de véhicules verts ont continué d'augmenter. Il semble que les ventes de véhicules conventionnels produisant des émissions de CO₂ inférieures à 120 grammes par km n'aient pas été impactées par cette nouvelle taxe, en particulier les nouveaux véhicules diesel (Sprei, 2013).

Le carburant E85 avaient de nombreux avantages : réduction des émissions de CO₂, possibilité de produire du carburant dans le pays grâce à l'éthanol de blé et l'éthanol lignocellulosique, et avantage économique pour le propriétaire du véhicule en cas d'augmentation des prix du pétrole. Toutefois, fin 2007, une opposition a mis en doute les avantages environnementaux de ce carburant. Quand les prix mondiaux des denrées alimentaires ont commencé à augmenter, l'opinion publique a rapidement vu un lien avec l'utilisation croissante des biocarburants, à tort ou à raison. Les émissions en lien indirect avec l'occupation des sols et aux nouvelles productions ont été mises en avant, ce qui a fragilisé l'image de carburant écologique qu'avait l'éthanol. L'opinion publique a commencé à s'opposer à l'éthanol.

Dans le même temps, les véhicules diesel qui satisfaisaient aux critères écologiques sont entrés sur le marché et sont devenus un substitut possible aux véhicules polycarburants. Malgré les importantes subventions, le prix de l'E85 restait trop élevé pour faire concurrence au gazole. Il restait peu d'arguments convaincants pour privilégier l'achat d'un véhicule polycarburant plutôt qu'un diesel à faibles émissions. Les subventions publiques peuvent au début, aider à créer un marché mais, ne peuvent pas être maintenues longtemps, il est nécessaire qu'il y ait une action publique plus attractive sur le long terme.

On en retiendra que l'innovation de système nécessite les efforts coordonnés de plusieurs ministères ou administrations – chargés notamment de l'agriculture, du commerce, de l'énergie, de l'environnement, des transports et de l'industrie – afin, entre autres, de limiter la duplication inutile des travaux et de prévenir les effets de blocage qui peuvent s'avérer coûteux. Un système entier peut tomber en panne si certaines de ses parties ne fonctionnent pas correctement. Telle est la règle qui s'applique à toute approche système de politique d'innovation.

Le périmètre de la bioproduction : diversifier les produits et fabriquer à plus grande échelle

Cette partie du chapitre présente l'offre de plus en plus étendue de produits biosourcés et analyse les conséquences de la croissance du secteur, notamment pour l'action publique.

Les produits de base tels que les bioplastiques utilisables pour fabriquer des bouteilles sont des produits à faible valeur et facilement fabriqués en grande quantité. Les substituer aux pétroplastiques permettrait d'éviter une grande partie des émissions. À l'autre bout du spectre, les produits biopharmaceutiques ont beaucoup de valeur mais sont plus difficiles et coûteux à commercialiser. Certaines sociétés pharmaceutiques cherchent pourtant déjà à assurer la durabilité des procédés de production (Watson, Crampton et Dillon, 2017) et, pour cela, auront en partie recours à la bioproduction. L'exemple spécifique de la soie d'araignée synthétique, présenté plus loin, est intéressant : la résistance très élevée et la biocompatibilité de ce matériau permettent d'envisager sa commercialisation sur le marché spécialisé des articulations et des tissus artificiels.

Il est également probable que, dans un avenir proche, les transports par véhicules légers et moyens deviennent électriques, ce qui permettrait l'affranchissement des carburants liquides. Dès 2017, par exemple, des experts de l'énergie ont suggéré à l'Écosse d'envisager l'interdiction des véhicules à essence et diesel¹¹. En Suède, le groupe Scania a entrepris de lancer un poids lourd hybride à usage urbain qui peut rouler en mode tout électrique ou avec du carburant renouvelable. De fait, le gouvernement suédois ambitionne de disposer d'une flotte de véhicules ne dépendant pas des combustibles fossiles d'ici 2030 (Hellsmark et al., 2016). S'agissant des transports maritimes et aériens, en revanche, il est difficile d'imaginer une solution de remplacement des carburants liquides. Mais les aéroports de Los Angeles et d'Oslo sont les premiers au monde à avoir intégré des biocarburants dans leur processus régulier de ravitaillement (Il Bioeconomista, 2016a). Plusieurs compagnies aériennes, notamment KLM et United Airlines, achètent désormais du biocarburant aéronautique. En mai 2016, Cathay Pacific a ouvert pour deux ans une ligne aérienne entre Toulouse et la Chine sur laquelle circuleront des avions alimentés au biocarburant aéronautique. Et en septembre 2016, Gevo a annoncé qu'il venait de conclure avec Deutsche Lufthansa AG un accord portant sur l'approvisionnement de kérosène fabriqué à partir d'alcool jusqu'à 8 millions de gallons par an (*alcohol-to-jet – ATJ*).

Les pays de l'OCDE ne pourraient pas avoir un niveau de vie si élevé sans les innombrables produits chimiques utilisés au quotidien. Or, 96 % des produits manufacturés contiennent au moins un produit chimique (Milken Institute, 2013), il est clair que les produits pétrochimiques seront beaucoup plus difficiles à remplacer que les carburants fossiles. Premier consommateur industriel d'énergie, le secteur de la chimie totalise quelque 10 % de la consommation d'énergie finale dans le monde (Broeren, Saygin et Patel, 2014). Il est également la troisième source industrielle d'émissions après le secteur de l'acier et celui du ciment (AIE, 2012).

La fabrication du plastique absorbe environ 8 % de la production pétrolière mondiale, soit 4 % pour la production des matières premières et 3 à 4 % pour la production de l'énergie consommée par les procédés manufacturiers (Hopewell, Dvorak et Kosior, 2009). C'est la raison pour laquelle, d'ici 2050, la consommation de pétrole brut destinée à la fabrication du plastique pourrait atteindre entre 28 % et 32 % des niveaux actuels de production de pétrole brut, ce qui mettrait les plastiques en concurrence avec les combustibles pour l'accès au pétrole brut. Une telle croissance est en décalage complet avec les nouvelles découvertes de pétrole, actuellement au plus bas niveau atteint depuis 60 ans.

Le moyen le plus évident d'obtenir des produits chimiques durables de substitution directe (c'est-à-dire en remplacement) ou de même fonction (des molécules de nature différente mais de même fonction) passe par l'utilisation de matières de base renouvelables. L'idée de faire appel aux biotechnologies pour fabriquer des produits chimiques entièrement artificiels ne s'est concrétisée qu'avec l'émergence de l'ingénierie métabolique dans les années 90 (Wong, 2016). Malgré les nombreux défis à résoudre, la voie biotechnologique présente plusieurs avantages par rapport à la voie strictement chimique. L'extrême diversité du métabolisme microbien permet de choisir parmi un très grand nombre de réactions biochimiques (une base de données contient 130 000 hypothétiques réactions enzymatiques). De plus, les processus microbiens se déroulent à basse température et principalement à pression atmosphérique, ce qui constitue un atout sur les plans environnemental et économique.

À ce jour, la chimie renouvelable reste bien en avance sur la biotechnologie industrielle pour ce qui est de la fabrication des produits chimiques de base. De nombreux produits chimiques ont déjà pu être fabriqués avec des micro-organismes. Toutefois, si la plupart sont des succès de recherche, beaucoup pourraient ne jamais atteindre l'étape de la commercialisation. Les raisons à cela, à la fois techniques et financières, sont interdépendantes (par exemple, des biotechnologies plus efficaces feraient baisser le coût de production, ce qui rendrait les produits chimiques et matériaux biosourcés plus compétitifs face aux produits de la pétrochimie). Fondamentalement, la bioproduction sans soutien public est confrontée à des défis considérables compte tenu des économies d'échelle réalisables dans la pétrochimie.

Cependant, quand on examine de plus près la structure de l'industrie pétrochimique moderne, on constate qu'une grande partie de la production chimique organique ne vise à fabriquer qu'un nombre relativement limité de produits différents. Le Département de l'Énergie des États-Unis (US DOE, 2004) a identifié 12 molécules plateformes que l'on peut produire à partir de sucres par transformation biologique ou chimique (une molécule plateforme est une molécule avec plusieurs groupes fonctionnels qui, de ce fait, peut donner naissance à de nouvelles familles de molécules utiles). De leur côté, Saygin et al. (2014) estiment que sept polymères pourraient techniquement remplacer la moitié du total des polymères produits en 2007. Ces exemples soulignent combien les plastiques sont devenus le matériau de prédilection dans un très grand nombre d'applications.

L'arrivée d'équivalents biosourcés des thermoplastiques qui dominent le marché, à savoir le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) et le polytéréphtalate d'éthylène (PET) est l'un des développements importants. Le bio-PE et le bio-PP, synthétisés par voie chimique à partir de monomères produits par fermentation, présentent des caractéristiques de performance identiques à celles de leurs équivalents d'origine pétrolière et, qui plus est, peuvent entrer directement dans les systèmes de recyclage existants. Rattachés à la

catégorie des bioplastiques puisque leurs atomes de carbone proviennent de sources renouvelables, ils peuvent potentiellement contribuer à la réduction des émissions de GES. Il est d'ailleurs anticipé que la production mondiale des bioplastiques évolue considérablement pour finir dominée par les thermoplastiques biosourcés durables (OCDE, 2013c) plutôt que par les plastiques biodégradables.

Les moyens biotechnologiques de produire les composés aromatiques (c'est-à-dire les composés chimiques qui émettent une odeur) sont particulièrement difficiles à mettre en œuvre. Ces composés aromatiques sont en effet fabriqués en très gros volumes, et leur large éventail de fonctions n'est pas facile à remplacer. À titre d'exemple, la production du seul benzène atteindra plusieurs dizaines de millions de tonnes en 2017. Le benzène peut être utilisé en tant que tel, à des fins spécifiques, mais il entre aussi dans la composition d'autres produits chimiques de valeur supérieure. Pourtant, les composés aromatiques de base s'avèrent extrêmement difficiles à bioproduire. Plusieurs études se sont penchées sur la production microbienne de composés aromatiques à partir de la biomasse (Kawaguchi et al., 2016), mais elles ne visaient pas les composés aromatiques de base.

D'un autre côté, certains facteurs environnementaux incitent clairement à produire des aromatiques biosourcés (Eriksson, 2013). Les plus gros réservoirs renouvelables de composés aromatiques sont la lignine et l'hémicellulose. La lignine est la source d'aromatiques renouvelable la plus complexe à exploiter, mais elle ne saurait être ignorée : en effet, quelque 50 millions de tonnes de lignine sont produites chaque année dans le monde par les seuls procédés de dépulpage ; la masse totale de lignine disponible dans la biosphère dépasse les 300 milliards de tonnes et augmente chaque année d'environ 20 milliards de tonnes (Smolarski, 2012).

Aux États-Unis, la société Anellotech développe des solutions intégrant la chimie du renouvelable au défi de la production des composés aromatiques. Son procédé consiste à chauffer rapidement de la biomasse non alimentaire – bois, sciure, tiges et feuilles de maïs, bagasse de canne à sucre – puis à transformer immédiatement les gaz ainsi obtenus en hydrocarbures grâce à un catalyseur recyclable. Le mélange final de benzène, toluène et xylènes (BTX) est analogue à celui que l'on peut obtenir à partir du pétrole.

Les composés BTX font partie intégrante de la production d'un grand nombre de plastiques, parmi lesquels le polyuréthane, le polycarbonate, le polystyrène et le nylon. Les aromatiques sont également très largement présents dans l'industrie automobile. Le groupe Toyota est d'ailleurs le premier utilisateur de matériaux renouvelables dans ses véhicules (OCDE, 2011b).

La bioproduction et sa visibilité

Pour le grand public et les décideurs, la bioproduction manque de visibilité. Le tableau 3.2 présente des exemples de produits dont la visibilité a fortement augmenté ces dernières années. Néanmoins, cette révolution de la production pourrait passer inaperçue parce qu'un produit biosourcé ressemble en tous points à son équivalent pétrosourcé (qu'il s'agisse d'un pneu, de l'écran d'un smartphone ou d'une bouteille). La certification et l'étiquetage aideraient à accroître la visibilité, en donnant confiance aux fabricants et en favorisant une meilleure perception et donc l'adhésion du public. Le nouvel élan depuis 2015, particulièrement avec la COP21 l'intérêt pour l'économie circulaire, pourraient aussi être des leviers pour amener la bioproduction sous les projecteurs.

Tableau 3.2. **Des produits biosourcés de plus en plus familiers**

Produit	Contexte
Des pissenlits pour le latex	Des prototypes de pneus contenant du latex biosourcé ont été présentés à la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques, à Copenhague, en décembre 2009. La Fraunhofer-Gesellschaft et le fabricant de pneumatiques Continental ont construit une installation pilote de production de caoutchouc à partir de pissenlits. Le pissenlit russe pousse dans des sols qui ne conviennent pas à l'agriculture.
Du sucre pour les bouteilles	Les deux groupes Coca Cola et PepsiCo utilisent des bouteilles en plastique en partie biosourcées. La bouteille de Coca Cola contient du mono-éthylène glycol dérivé de la fermentation du sucre qui, une fois mélangé avec d'autres composants, donne du polytéréphtalate de polyéthylène biosourcé (bio-PET). L'objectif à long terme est de remplacer le PET pétrosourcé.
De l'huile de soja pour le graphène	Le graphène est plus de 200 fois plus résistant que l'acier et conduit mieux l'électricité que le cuivre. Si l'on ajoute environ 1 % de graphène à un plastique, on peut transformer ce dernier en conducteur électrique. Le graphène est cependant plus coûteux que d'autres matériaux. Des chercheurs du CSIRO, en Australie, ont mis au point un nouveau procédé de synthèse du graphène à partir d'huile de soja (Seo et al., 2017).
De l'huile de ricin pour les prises murales	DuPont extrait une molécule plateforme de l'huile de ricin, à partir de laquelle il synthétise un polyamide à 68 % biosourcé (le polyamide synthétique que l'on connaît sous le nom de nylon). Ce polyamide est aussi résistant que le nylon qui entre habituellement dans la fabrication des prises murales.
Des bioplastiques pour les voitures	L'une des premières utilisations des bioplastiques a été de remplacer les composants métalliques ou pétroplastiques dans les véhicules, ce qui permettait de gagner en masse et/ou de réduire les émissions de GES. Ford et Toyota, entre autres, réfléchissent aujourd'hui aux moyens d'utiliser des bioplastiques dans les textiles des habitacles et mettent en œuvre certaines de ces solutions. Daimler et Royal DSM ont collaboré à la création d'un couvercle de moteur en plastique à 70 % biosourcé.
Du sucre pour les tapis	DuPont et Mohawk associent du propanediol biosourcé et une molécule plateforme pétrosourcée pour produire une fibre de tapis souple, durable et facile à nettoyer. Ce textile est à 37 % d'origine biologique.
Des levures pour les crèmes de soin du visage	Korres cultive des levures qui, lorsqu'elles sont exposées à de l'ozone ou à des ultraviolets, produisent des hexapeptides (courts peptides de six acides aminés). Ces composés servent ensuite d'ingrédients actifs anti-âge dans certaines crèmes de soin du visage.
Produits biopharmaceutiques	On produisait jusqu'à maintenant les antibiotiques avec des micro-organismes. Désormais, on a recours à la biologie de synthèse pour fabriquer un antipaludique puissant. En 2014, Sanofi a livré à des pays africains où le paludisme est endémique les premiers lots à grande échelle de traitements antipaludiques fabriqués à partir d'un nouveau dérivé de l'artémisinine semi-synthétique.
Compléments pour l'alimentation humaine et animale	Cargill fabrique un édulcorant en produisant, par la biologie de synthèse, une levure capable de transformer des molécules de sucre de manière à ce qu'elles présentent les mêmes propriétés que la stévia, sans que la plante elle-même ne soit nécessaire. Calysta est spécialisé dans la production de protéines microbiennes destinées aux marchés de l'alimentation du bétail et des poissons.
Des enzymes dans les détergents	Les détergents biologiques contiennent toute une gamme d'enzymes permettant un lavage à basse température, par exemple à 30 °C, ce qui se traduit par des économies d'énergie, une réduction des émissions, et un moindre coût.
De la soie d'araignée dans les implants médicaux	La soie d'araignée est un matériau extrêmement résistant que l'on trouve aujourd'hui dans les sutures, les armatures, les greffes et certains implants médicaux. Oxford Biomaterials, Orthox Ltd et Neorotex Ltd étudient un certain nombre d'applications biomédicales de la soie d'araignée génétiquement modifiée. L'armée des États-Unis teste actuellement des vêtements de protection en soie d'araignée. Enfin, la variante <i>E. coli</i> de la soie d'araignée pourrait remplacer le Kevlar dans les air bags.

Conclusions

Ce chapitre a décrit le début de la transition vers un nouveau modèle de production fondée sur les biotechnologies (Il Bioeconomista, 2016b). Plusieurs pays, bien placés dans le domaine de la recherche en bioéconomie, sont peu avancés sur la voie du déploiement (via des bioraffineries et des unités de production chimique). Les bioraffineries cellulosiques, sources de grands espoirs, se révèlent malheureusement, sujettes à des défaillances techniques inquiétantes. À ce jour, les volumes d'éthanol cellulosique que l'on produit sont encore limités et dépendants des aides publiques (Peplow, 2014). Les progrès de la recherche ont beaucoup d'avance sur ceux du déploiement à pleine échelle, ce qui n'est pas une surprise dans un secteur aussi jeune. Ce chapitre a également décrit les principaux instruments d'action à mettre en œuvre pour rétablir l'équilibre entre R-D et succès commercial.

Schieb et al. (2015) prévoient que, pour que la bioéconomie industrielle soit un succès, le nombre de bioraffineries, aussi bien aux États-Unis qu'en Europe, doit augmenter pour atteindre un chiffre entre 300 et 400. Cette progression représente un investissement très lourd, qui devra provenir en majeure partie du secteur privé. Les échanges avec les acteurs de l'industrie de la bioproduction, demandent des politiques stables et de long terme afin de gagner la confiance du secteur privé pour investir dans des projets risqués.

Les messages sur la durabilité atteignent désormais l'industrie fossile. Le changement de cap est évident quand les administrateurs du Rockefeller Family Fund déclarent : « À l'heure où l'on s'emploie partout dans le monde à supprimer l'utilisation des combustibles fossiles, cela n'aurait que peu de sens – financièrement ou éthiquement – de continuer à détenir des investissements dans de telles entreprises » (Cunningham, 2016). L'Arabie saoudite elle-même prévoit de diversifier son économie et de mettre fin prochainement à sa dépendance vis-à-vis du pétrole¹². L'industrie pétrolière doit aussi garder à l'esprit le fait que les véhicules électriques pourraient venir perturber leur domaine d'activité. Ces véhicules pourraient en effet se substituer à la demande de quelque 2 millions de barils de pétrole par jour d'ici 2025, un volume équivalent à celui de la surcapacité qui a déclenché la plus grosse récession pétrolière de la génération au cours des trois dernières années (Bloomberg, 2017).

L'incitation principale pourrait désormais venir de la ratification de l'Accord de Paris en 2016. L'action publique se concentre actuellement sur la tarification du carbone, qui pourrait apporter aux États des recettes importantes – avec à leur charge, ensuite, de dépenser cette nouvelle manne au service de technologies de décarbonation de l'énergie et de la production. Ce chapitre a présenté quelques domaines des sciences et des technologies vers lesquels ces ressources pourraient être réorientées. En tout état de cause, il est indispensable que la bioéconomie fasse partie des futurs paysages énergétiques et productifs (Szarka et al., 2017).

Notes

1. À ce jour, la biologie de synthèse est encadrée par la réglementation applicable aux organismes génétiquement modifiés (OGM). Il n'est probablement pas nécessaire à moyen terme de modifier substantiellement le système en place, mais les pouvoirs publics doivent exercer une veille. S'il semble qu'on retrouve en biologie de synthèse les mêmes questions de biosécurité que celles que posent les OGM, la nature pluridisciplinaire de la discipline signifie néanmoins qu'il faut davantage sensibiliser et former les parties prenantes non familières du domaine. La biologie de synthèse soulève en outre des préoccupations de biosécurité spécifiques :

- Comme, avec la biologie de synthèse, on peut sans difficulté concevoir de l'ADN quelque part, le construire ailleurs, et le livrer encore ailleurs, l'utilisation du matériel génétique fini peut être découplée de son origine.
- La synthèse peut ouvrir la porte à ceux qui cherchent à obtenir des pathogènes particuliers à des fins dommageables et qui, ainsi, pourraient contourner les règles nationales et internationales de biosécurité (cependant, pour l'heure, il est beaucoup plus facile de modifier génétiquement un pathogène existant que de recourir à la biologie de synthèse pour en créer un).

De l'avis général, la fabrication et la vente d'ADN de synthèse doivent faire l'objet d'un processus de sélection. Les principaux aspects qu'il convient de contrôler sont les suivants : sélection pour éviter la synthèse de pathogènes connus ou d'ADN liée à des toxines ; sélection pour éviter d'expédier des produits à des clients douteux ; autorisation des équipements et des substances requis pour la synthèse des oligonucléotides.

2. Le concept d'utilisation en cascade de la biomasse recouvre l'idée que la biomasse sert à fabriquer d'abord de faibles volumes de produits à forte valeur, puis de plus gros volumes de produits à moins forte valeur, et ainsi de suite jusqu'à extraction de la majeure partie de la valeur. Avec ce qui reste, on peut alors produire de l'électricité ou de la chaleur (eau chaude, chauffage urbain).

3. Les parties prenantes régionales sont notamment les agriculteurs, les sylviculteurs et leurs associations professionnelles et coopératives, les acheteurs, les cercles d'échanges et de machines agricoles et forestières, les transporteurs et les autres prestataires logistiques, les entreprises des secteurs de la chimie et des combustibles, les bioraffineries, les sociétés de capital-risque, les entreprises agroalimentaires, les établissements de R-D, les PME spécialistes des technologies, les entreprises de gestion des déchets, les autorités de réglementation et les agences de recyclage et de gestion des déchets.
4. Par exemple, la base de données mise au point par Black et al. (2016) pour l'évaluation des chaînes d'approvisionnement en biomasse à l'appui du développement des bioraffineries tient compte de l'origine des matières ainsi que des aspects logistiques, techniques et stratégiques. Plus la nécessité d'établir des chaînes d'approvisionnement en biomasse sur mesure devient réelle, puis il est important d'améliorer la prise de décision. À l'avenir, les concepteurs de nouveaux projets industriels seront amenés à prendre de nombreuses décisions critiques pour leur activité, concernant l'origine de la biomasse et l'implantation des bioraffineries. Les logiciels du type décrit ici pourraient simplifier ce processus décisionnel. Il pourrait s'agir d'outils open-source développés avec les organisations des pôles régionaux.
5. Cela s'est produit par exemple en Allemagne, en Belgique, en France, en Italie, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni, des pays qui disposent tous d'un secteur de la chimie étendu et stratégique. En 2006, le ministère fédéral allemand de la Recherche et de l'Éducation a mis des pôles en concurrence pour renforcer la biotechnologie industrielle nationale. Les cinq pôles de biotechnologie industrielle sélectionnés ont reçu des financements d'un montant total de 60 millions EUR.
6. Encore trop peu largement reconnue, la génomique a commencé à révolutionner la production alimentaire sans modification génétique. Grâce aux progrès qu'elle permet, il est possible d'améliorer les programmes de sélection et ainsi d'accélérer les succès pour un large éventail d'espèces végétales et animales. La plupart des types d'élevage et d'agriculture peuvent bénéficier de la génomique, notamment sur certains points économiquement fondamentaux, comme l'efficacité alimentaire et la résistance aux maladies, qui peuvent aider à renforcer la sécurité alimentaire aujourd'hui et à l'avenir. La génomique peut aussi contribuer largement à la durabilité de la biomasse. Par exemple, les cultures énergétiques constitueront à l'avenir une part importante de la production biomassique. Or, l'impact de la génomique sur la sélection végétale commence à peine à se faire sentir, un message que de nombreux cercles de décideurs ne perçoivent pas encore très bien. Il est important, pour de nombreux pays, de mieux cerner les avantages de la génomique en agriculture : ils pourraient orienter plus efficacement les programmes de recherche pertinents, par exemple en finançant des programmes de formation des agriculteurs à la génomique (le programme irlandais *Beef Data and Genomics Programme* sur la génomique et l'élevage bovin en est un bon exemple).
7. L'« écart de prix du carbone », un indicateur synthétique qui donne la mesure dans laquelle les prix effectifs du carbone s'écartent de la tarification des émissions à 30 EUR par tonne, met en lumière les moyens possibles de renforcer la tarification du carbone (OCDE, 2016).
8. Il y a subvention avant taxe quand les consommateurs de l'énergie paient un prix inférieur au coût d'approvisionnement.
9. Il y a subvention après taxe quand le prix payé par le consommateur est inférieur au coût d'approvisionnement auquel on a ajouté une taxe « corrective » appropriée qui reflète le dommage environnemental associé à la consommation d'énergie ainsi qu'une taxe supplémentaire sur la consommation qui s'applique à tous les biens de consommation pour augmenter les recettes.
10. Le règlement européen (CE) du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH) porte sur la production et l'utilisation des substances chimiques ainsi que leurs effets potentiels sur la santé humaine et l'environnement.
11. Voir www.thetimes.co.uk/edition/scotland/energy-experts-call-for-ban-on-diesel-and-petrol-vehicles-jfghn0qdz.
12. Voir <http://vision2030.gov.sa/en/media-center>.

Références

- Académie nationale des sciences (2015), *Industrialization of Biology: A Roadmap to Accelerate the Advanced Manufacturing of Chemicals*, Académie nationale des sciences, Washington, DC.
- Académie nationale des sciences (1995), *Reshaping the Graduate Education of Scientists and Engineers*, National Academy Press, Washington, DC.

- AIE (2012), *Energy Technology Perspectives 2012: Pathways to a Clean Energy System*, AIE/OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/energy_tech-2012-en.
- Andrianantoandro, E. et al. (2006), « Synthetic biology: New engineering rules for an emerging discipline », *Molecular Systems Biology* vol. 2, n° 1, 16 mai, <http://dx.doi.org/10.1038/msb4100073>.
- ANEC (2012), « ANEC position. Environmental assessment goes astray. A critique of environmental footprint methodology and its ingredients », ANEC-ENV-2012-G-008final, Association européenne pour la coordination de la représentation des consommateurs pour la normalisation (ANEC), Bruxelles.
- Barton, N.R. et al. (2015), « An integrated biotechnology platform for developing sustainable chemical processes », *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, n° 42, pp. 349-360.
- Beal, J. et al. (2016), « Reproducibility of fluorescent expression from engineered biological constructs in *E. coli* », *PLoS ONE*, vol. 11, n° 3, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0150182>.
- Bioökonomierat (2015), « Bioeconomy policy (Part II). Synopsis of national strategies around the world », Bioökonomierat, Berlin.
- Black, M.J. et al. (2016), « Developing database criteria for the assessment of biomass supply chains for biorefinery development », *Chemical Engineering Research and Design*, n° 107, pp. 253-262.
- Bloomberg (2017), « Electric cars could cause big oil this much damage », page web, 2 février.
- Bosch, R., M. van de Pol et J. Philp (2015), « Define biomass sustainability », *Nature*, n° 523, pp. 526-527.
- BP-EBI (2014), « Biomass in the energy industry. An introduction », British Petroleum, Londres.
- Brazil Biotech Map (2011), Brazilian Association of Biotechnology (BRBIOTEC), www.cebrap.org.br/v1/upload/pdf/Brazil_Biotec_Map_2011.pdf.
- BRDI (2016), « The billion ton bioeconomy initiative: Challenges and opportunities », Initiative biomasse de recherche et de développement (BRDI), États-Unis, https://biomassboard.gov/pdfs/the_bioeconomy_initiative.pdf.
- Broeren, M.L.M., D. Saygin et M.K. Patel (2014), « Forecasting global developments in the basic chemical industry for environmental policy analysis », *Energy Policy*, n° 64, pp. 273-287.
- Burk, M.J. et S. van Dien (2016), « Biotechnology and chemical production: challenges and opportunities », *Trends in Biotechnology*, n° 34, pp. 187-190.
- Carus, M. (2017), « Bio-based economy and climate change – Important links, pitfalls and opportunities », nova Institut GmbH, Cologne, janvier.
- Carus, M. (2014), « Presentation at the OECD workshop on bio-based production », 9 octobre, Turin.
- CCEMC (2015), « Reducing GHG emissions. Funding a way forward », Climate Change and Emissions Management Corporation, Alberta, <http://ccec.ca/about/#sthash.wStfoHNS.dpuf>.
- CCNUCC (2015), « Adoption of the Paris agreement », FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1, Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>.
- CE (2015), « From the sugar platform to biofuels and biochemical », rapport final pour la Direction générale Énergie de la Commission européenne, ENER/C2/423-2012/SI2.673791, avril.
- Commission pour l'indépendance pétrolière (2006), « Making Sweden an oil-free society », Commission pour l'indépendance pétrolière, Stockholm, www.government.se/contentassets/537fc9cf3cf84f0d815329f4d6d64a04/making-sweden-an-oil-free-society.
- Cook, B.I., T.R. Ault et J.E. Smerdon (2015), « Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains », *Science Advances*, vol. 1, n° 1, <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1400082>.
- Cunningham, N. (2016), « Rockefeller Family Fund blasts ExxonMobil, pledges divestment from fossil fuels », Oil Price, <http://oilprice.com/Energy/General/Rockefeller-Family-Fund-Blasts-ExxonMobil-Pledges-Divestment-From-Fossil-Fuels.html>.
- Delebecque, C. et J. Philp (2015), « Training for synthetic biology jobs in the new bioeconomy », *Science*, 2 juin, <http://dx.doi.org/10.1126/science.caredit.a1500143>.
- Deloitte (2015), « The Biobased Delta. Where agro meets chemistry. A globally competitive region for developing biobased business », www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/nl/Documents/manufacturing/deloitte-nl-manufacturing-biobased-delta-agro-meets-chemistry.pdf.
- Devappa, R.K., S.K. Rakshit et R.F. Dekker (2015), « Forest biorefinery: Potential of poplar phytochemicals as value-added co-products », *Biotechnology Advances*, n° 33, pp. 681-716.

- Dusselier, M.P. et al. (2015), « Shape-selective zeolite catalysis for bioplastics production », *Science*, n° 349, pp. 78-80.
- Edenhofer, O. (2015), « King Coal and the queen of subsidies », *Science*, n° 349, pp. 1286-1287.
- Eidler, J. et L. Georghiou (2007), « Public procurement and innovation – Resurrecting the demand side », *Research Policy*, n° 36, pp. 949-963.
- El-Chichakli, B. et al. (2016), « Five cornerstones of a global bioeconomy », *Nature*, vol. 535, n° 7611, pp. 221-223.
- Eriksson, N. (2013), « Production of four selected renewable aromatic chemicals », École polytechnique Chalmers, Göteborg, Suède, <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/185085/185085.pdf>
- Esvelt, K.M. et H.H. Wang (2013), « Genome-scale engineering for systems and synthetic biology », *Molecular Systems Biology*, vol. 9, 22 janvier, <http://dx.doi.org/10.1038/msb.2012.66>.
- FAO (2009), *The State of Food and Agriculture. Livestock in the Balance*, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Fava, F. et al. (2015), « Biowaste biorefinery in Europe: Opportunities and research & development needs », *New Biotechnology* 32, pp. 100-108.
- Federal Register (2010), « Regulation of fuels and fuel additives: Changes to renewable fuel standard program: Final rule », *Federal Register* 75, n° 58. FRL-9112-3, Book 2, pp. 14669-15320.
- FMI (2015), « How large are global energy subsidies? », Document de travail du Fonds monétaire international WP/15/105, Fonds monétaire international, Washington, DC.
- G7 Germany (2015), « Think ahead. Act together », Déclaration des chefs du Sommet du G20, 7-8 juin, https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/7320LEADERS%20STATEMENT_FINAL_CLEAN.pdf.
- Giuliano, A., M. Poletto et D. Barletta (2016), « Process optimization of a multi-product biorefinery: The effect of biomass seasonality », *Chemical Engineering Research and Design*, n° 107, pp. 236-252.
- Golberg, A. et A. Liberzon (2015), « Modeling of smart mixing regimes to improve marine biorefinery productivity and energy efficiency », *Algal Research*, n° 11, pp. 28-32.
- Gouvernement du Royaume-Uni (2012), « UK Bioenergy Strategy », page web, www.gov.uk/government/publications/uk-bioenergy-strategy.
- Haberl, H. (2015), « Competition for land: A sociometabolic perspective », *Ecological Economics*, n° 119, pp. 424-431.
- Hellmark, H. et al. (2016), « Innovation system strengths and weaknesses in progressing sustainable technology: The case of Swedish biorefinery development », *Journal of Cleaner Production*, n° 131, pp. 702-715.
- Hong, K.K. et J. Nielsen (2012), « Metabolic engineering of *Saccharomyces cerevisiae*: a key cell factory platform for future biorefineries », *Cellular and Molecular Life Sciences*, n° 69, pp. 2671-2690.
- Hopewell, J., R. Dvorak et E. Kosior (2009), « Plastics recycling: Challenges and opportunities », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B 364, pp. 2115-2126.
- House of Lords (2014), « Waste or resource? Stimulating a bioeconomy », Science and Technology Select Committee, 3rd Report of Session 2013-14, The Stationery Office Limited, House of Lords, Londres, www.publications.parliament.uk/pa/ld201314/ldselect/ldsctech/141/141.pdf
- Il Bioeconomista (2016a), « KLM signs a three-year contract for the supply of biofuel in Los Angeles », *Il Bioeconomista*, 13 septembre.
- Il Bioeconomista (2016b), « Novamont opens world's first commercial-scale bio-BDO plant in North-eastern Italy », *Il Bioeconomista*, 30 septembre.
- Initiative mondiale sur les subventions (2007), « Biofuels – at what cost ? Government support for ethanol and biodiesel in selected OECD countries », www.iisd.org/gsi/sites/default/files/ocedbioduels.pdf.
- Institute of Risk Management and Competition and Markets Authority (2014), « Competition law risk, a short guide », Crown copyright, Londres.
- Jiang, Y. et al. (2015), « Multigene editing in the *Escherichia coli* genome via the CRISPR-Cas9 system », *Applied and Environmental Microbiology*, vol. 81, pp. 2506-2514.
- Kawaguchi, H. et al. (2016), « Bioprocessing of bio-based chemicals produced from lignocellulosic feedstocks », *Current Opinion in Biotechnology*, n° 42, pp. 30-39.

- Keegan, D. et al. (2013), « Cascading use: A systematic approach to biomass beyond the energy sector », *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 7, pp. 193-206.
- Kleinschmit, D. et al. (2014), « Shades of green: A social scientific view on bioeconomy in the forest sector », *Scandinavian Journal of Forestry Research*, n° 29, pp. 402-410.
- Knight, L., A. Pfeiffer et J. Scott (2015), « Supply market uncertainty: Exploring consequences and responses within sustainability transitions », *Journal of Purchasing & Supply Management*, n° 21, pp. 167-177.
- Knudsen, M.T., J.E. Hermansen et L.B. Thostrup (2015), « Mapping sustainability criteria for the bioeconomy », Report of Université d'Aarhus, Département d'agroécologie.
- Kuntz (2016), « Scientists should oppose the drive of postmodern ideology », *Trends in Biotechnology*, n° 34, pp. 943-945.
- Lammens, T. et al. (2011), « Environmental comparison of biobased chemicals from glutamic acid with their petrochemical equivalents », *Environmental Science and Technology*, n° 45, pp. 8521-8528.
- Langeveld, J.W.A., K.P.H. Meesters et M.S. Breure (2016), « The bio-based economy and the bioeconomy in the Netherlands », *Biomass Research Report 1601*, n° 59015257, Biomass Research, Wageningen.
- Ledford, H. (2016), « CRISPR patent probe begins », *Nature*, vol. 531, n° 7593, p. 149.
- Lee, S.Y. et al. (2011), « Biorefinery research in Korea », *Asia-Pacific Biotech News*, n° 15, p.15.
- Lee, S.Y. et H.U. Kim (2015), « Systems strategies for developing industrial microbial strains », *Nature Biotechnology*, n° 33, pp. 1061-1072.
- Luoma, P., J. Vanhanen et P. Tommila (2011), *Distributed Bio-based Economy: Driving Sustainable Growth*, SITRA, Helsinki.
- Maiti, S. et al. (2016), « Agro-industrial wastes as feedstock for sustainable bio-production of butanol by *Clostridium beijerinckii* », *Food and Bioproducts Processing*, vol. 98, pp. 217-226.
- Mandell, D.L. et al. (2015), « Biocontainment of genetically modified organisms by synthetic protein design », *Nature*, vol. 518, n° 7537, pp. 55-60.
- Martin, T. (2016), « Hasten end of dated fossil-fuel subsidies », *Nature*, vol. 538, n° 7624, p. 171.
- Milken Institute (2013), « Unleashing the power of the bio-economy », Milken Institute, Washington, DC.
- Miller, R.G. et S.R. Sorrell (2013), « The future of oil supply », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, A 372: 20130179, <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2013.0179>.
- Montazeri, M. et al. (2016), « Meta-analysis of life cycle energy and greenhouse gas emissions for priority biobased chemicals », *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, n° 4, pp. 6443-6454.
- Nkonya, E., A. Mirzabaev et J. von Braun (dir. pub.) (2016), *Economics of Land Degradation and Improvement – A Global Assessment for Sustainable Development*, Springer, Heidelberg.
- Noda, S. et al. (2015), « 4-Vinylphenol biosynthesis from cellulose as the sole carbon source using phenolic acid decarboxylase-and tyrosine ammonia lyase-expressing *Streptomyces lividans* », *Bioresource Technology*, n° 180, pp. 59-65.
- Nymark, M. et al. (2016), « A CRISPR/Cas9 system adapted for gene editing in marine algae », *Scientific Reports*, n° 6, p. 24951, <http://dx.doi.org/10.1038/srep24951>.
- OCDE (2016), *Effective Carbon Rates. Pricing CO₂ through Taxes and Emissions Trading Systems*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264260115-en>.
- OCDE (2015a), *Aligning Policies for a Low-carbon Economy*, produit en coopération avec l'Agence internationale de l'énergie, le Forum international des transports, et l'Agence de l'OCDE pour l'énergie nucléaire, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264233294-en>.
- OCDE (2015b), *Rapport accompagnant l'inventaire OCDE des mesures de soutien pour les combustibles fossiles*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264243583-fr>.
- OCDE (2014a), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2014*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/0f30fee4-fr>.
- OCDE (2014b), « Biobased chemicals and plastics. Finding the right policy balance », *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers* n° 17, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/23074957>.
- OCDE (2013a), « Climate and carbon : Aligning prices and policies », *OECD Environment Policy Papers*, n° 1, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5k3z11hjg6r7-en>.

- OCDE (2013b), « Innovation-driven growth in regions: The role of smart specialisation », OCDE, Paris, www.oecd.org/innovation/inno/smart-specialisation.pdf.
- OCDE (2013c), « Policies for bioplastics in the context of a bioeconomy », *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers* n° 10, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5k3xpf9rrw6d-en>.
- OCDE (2012a), *Inventory of Estimated Budgetary Support and Tax Expenditures for Fossil Fuels 2013*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264187610-en>.
- OCDE (2012b), « Progress made in implementing the OECD recommendation on enhancing integrity in public procurement », Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/gov/ethics/combined%20files.pdf.
- OCDE (2012c), *Transferable Skills Training for Researchers : Supporting Career Development and Research*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264179721-en>.
- OCDE (2011a), *Demand-side Innovation Policies*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264098886-en>.
- OCDE (2011b), *Future Prospects for Industrial Biotechnology*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264126633-en>.
- OCDE (2009), *La bioéconomie à l'horizon 2030 : Quel programme d'action ?*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264056909-fr>.
- Ostrov, N. et al. (2016), « Design, synthesis, and testing toward a 57-codon genome », *Science*, n° 353, pp. 819-822.
- Parlement suédois (2009), « Pumplagen – uppföljning av lagen om skyldighet att tillhandahålla förnybara drivmedel », Parlement suédois, Stockholm.
- PBL (2012), « PBL Note. Sustainability of biomass in a biobased economy. A quick-scan analysis of the biomass demand of a bio-based economy in 2030 compared to the sustainable supply », Agence néerlandaise pour l'évaluation de l'environnement (PBL), n° 500143001.
- Peplow, M. (2014), « Cellulosic ethanol fights for life. Pioneering biofuel producers hope that US government largesse will ease their way into a tough market », *Nature*, vol. 507, n° 7491, p. 152.
- Philp, J.C. (2015), « Balancing the bioeconomy: supporting biofuels and bio-based materials in public policy », *Energy & Environmental Science*, n° 8, pp. 3063-3068.
- Philp, J.C., K. Guy et R.J. Ritchie (2013), « Biofuels development and the policy regime », *Trends in Biotechnology*, n° 31, pp. 4-6.
- Piotrowski, S., M. Carus et R. Essel (2015), « Global bioeconomy in the conflict between biomass supply and demand », *Nova Paper* n° 7 on bio-based economy, 2015-09, Nova Institute, Hürth.
- Pisano, G.P. (2010), « The evolution of science-based business: innovating how we innovate », préparé pour *Industrial and Corporate Change*, Document de travail, n° 10-062.
- PNUE (2010), *Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials*, Programme des Nations unies pour l'environnement, Nairobi.
- Posen, D., P. Jaramillo et W.M. Griffin (2016), « Uncertainty in the life cycle greenhouse gas emissions from US production of three biobased polymer families », *Environmental Science and Technology*, n° 50, pp. 2846-2858.
- Privett, H.K. et al. (2012), « Iterative approach to computational enzyme design », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, pp. 3790-3795.
- Pronk, J.T. et al. (2015), « How to set up collaborations between academia and industrial biotech companies », *Nature Biotechnology*, n° 33, pp. 237-240.
- République Fédérale d'Allemagne (2012), « Biorefineries roadmap », Ministère fédéral de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Protection des consommateurs (BMELV), Berlin.
- Rodrigo, G. et A. Jaramillo (2013), « AutoBioCAD : Full biodesign automation of genetic circuits », *ACS Synthetic Biology*, n° 2, pp. 230-236.
- Rogers, J.K. et G.M. Church (2016), « Multiplexed engineering in biology », *Trends in Biotechnology*, n° 34, pp. 198-206.
- Rogers, J.N. et al. (2017), « An assessment of the potential products and economic and environmental impacts resulting from a billion ton bioeconomy », *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, n° 11, pp. 110-128.
- Rose, S. et al. (2013), « Bioenergy in energy transformation and climate management », *Climatic Change*, n° 123, pp. 477-493.

- Rydge, J. (2015), « Implementing effective carbon pricing », *New Climate Economy*, Commission mondiale sur l'économie et le climat, <http://2015.newclimateeconomy.report/wp-content/uploads/2015/10/Implementing-Effective-Carbon-Pricing.pdf>.
- Sadowski, M.I., C. Grant et T.S. Fell (2016), « Harnessing QbD, programming languages, and automation for reproducible biology », *Trends in Biotechnology*, n° 34, pp. 214-27.
- Salamanca-Cardona, L. et al. (2016), « Consolidated bioprocessing of poly (lactate-co-3-hydroxybutyrate) from xylan as a sole feedstock by genetically-engineered *Escherichia coli* », *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 122, n° 4, www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389172316300317.
- Saygin, D. et al. (2014), « Assessment of the technical and economic potentials of biomass use for the production of steam, chemicals and polymers », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 40, pp. 1153-1167.
- Scarlat, N. et al. (2015), « The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts », *Environmental Development*, n° 15, pp. 3-34.
- Schieb, P.-A. (2017), « OECD survey of biorefinery types », document interne, OCDE, Paris.
- Schieb, P.-A. et al. (2015), *Biorefinery 2030: Future Prospects for the Bioeconomy*, Springer, Heidelberg.
- Schieb, P.-A. et J.C. Philp (2014), « Biorefinery policy needs to come of age », *Trends in Biotechnology*, n° 32, pp. 496-500.
- Schiermeier, Q. (2013), « Renewable power: Germany's energy gamble », *Nature*, vol. 496, n° 7444, pp. 156-158.
- Schmitz, C.H. et al. (2014), « Land-use change trajectories up to 2050: Insights from a global agro-economic model comparison », *Agricultural Economics*, n° 45, pp. 69-84.
- Seo, D.H. et al. (2017). « Single-step ambient-air synthesis of graphene from renewable precursors as electrochemical genosensor », *Nature Communications*, n° 8, p. 14217, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms14217>.
- Sira Consulting (2011), « Botsende belangen in de biobased economy. Een inventarisatie en een analyse van de belemmeringen in de transitie naar een biobased economy », Sira Consulting, La Haye.
- Smolarski, N. (2012), « High-value opportunities for lignin: Unlocking its potential », www.greenmaterials.fr/wp-content/uploads/2013/01/High-value-Opportunities-for-Lignin-Unlocking-its-Potential-Market-Insights.pdf.
- Sprei, F. (2013), « Boom and bust of flex-fuel vehicles in Sweden », *ECEEE Summer Study Proceedings*, n° 4, pp. 1031-1039, http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/189865/local_189865.pdf.
- Stovicek, V., I. Borodina et J. Forster (2015), « CRISPR – Cas system enables fast and simple genome editing of industrial *Saccharomyces cerevisiae* strains », *Metabolic Engineering Communications*, vol. 2, pp. 13-22.
- Szarka, N. et al. (2017), « Interpreting long-term energy scenarios and the role of bioenergy in Germany », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, n° 68, pp. 1222-1233.
- Tan, T., J. Yu et F. Shang (2011), « Biorefinery engineering », in M. Moo-Young (dir. pub.), *Comprehensive Biotechnology* (2^e éd.), Ch. 2.58, Elsevier, Amsterdam, pp. 815-828.
- The Economist (2014), « Floored. Carbon taxes are as necessary as they are unpopular », *The Economist*, 20 mars, www.economist.com/news/britain/21599420-carbon-taxes-are-necessary-they-are-unpopular-floored.
- Urban, R.A. et B.R. Bakshi (2009), « 1, 3-Propanediol from fossils versus biomass: A life cycle evaluation of emissions and ecological resources », *Industrial and Engineering Chemistry Research*, n° 48, pp. 8068-8082.
- US DOE (2016), « 2016 Billion-ton report: Advancing domestic resources for a thriving bioeconomy, Volume 1 : Economic availability of feedstocks », Langholtz, M.H., B.J. Stokes et L.M. Eaton (directeurs), ORNL/TM-2016/160, Laboratoire national d'Oak Ridge, Oak Ridge, TN.
- US DOE (2011), « US billion-ton update: Biomass supply for a bioenergy and bioproducts industry », R.D. Perlack et B.J. Stokes (directeurs), ORNL/TM-2011/224, Laboratoire national d'Oak Ridge, Oak Ridge, TN.
- US DOE (2006), « Breaking the biological barriers to cellulosic ethanol: A joint research agenda », DOE/SC-0095, Bureau de la science du Département de l'Énergie des États-Unis et Bureau de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables, Washington, DC, www.doeenestolive.org/biofuels/.
- US DOE (2005), « Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: The technical feasibility of a billion-ton annual supply », DOE/GO-102995-2135 ou ORNL/TM- 2005/66, Département de l'Énergie des États-Unis, Laboratoire national d'Oak Ridge, Oak Ridge, TN.

- US DOE (2004), « Top value added chemicals from biomass (results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas, vol. 1) », Werpy, T. et G. Petersen (dir. pub.), Département de l'Énergie des États-Unis, Washington, DC.
- Viaggi, D. (2016), « Towards an economics of the bioeconomy: Four years later », *Bio-based and Applied Economics*, n° 5, pp. 101-112, <http://dx.doi.org/10.13128/BAE-20086>.
- Wang, B.L. et al. (2014), « Microfluidic high-throughput culturing of single cells for selection based on extracellular metabolite production or consumption », *Nature Biotechnology*, vol. 32, pp. 473-478.
- Watson, A., A. Crampton et B. Dillon (2017), « Greening medicines », *The Chemical Engineer*, février, pp. 22-25.
- Weiss, M. et al., 2012, « A review of the environmental impacts of bio-based materials », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, pp. S169-S181.
- Werpy, T. et G. Petersen (dir. pub.) (2004), « Top value added chemicals from biomass (results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas, vol. 1) », Département de l'Énergie des États-Unis, Washington, DC.
- Whitley, S. et L. van der Burg (2015), « Fossil fuel subsidy reform: From rhetoric to reality », *New Climate Economy*, Londres et Washington, DC, <http://newclimateeconomy.report/misc/working-papers>.
- Wong, K.-C. (dir. pub.) (2016), *Computational Biology and Bioinformatics: Gene Regulation*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Wu, G. et al. (2016), « Metabolic burden: Cornerstones in synthetic biology and metabolic engineering applications », *Trends in Biotechnology*, vol. 34, pp. 652-664.
- Wurtzel, E.T. et T.M. Kutchan (2016), « Plant metabolism, the diverse chemistry set of the future », *Science*, vol. 353, pp. 1232-1236.
- Zhu, L. et al. (2011), « Engineering the robustness of *Clostridium acetobutylicum* by introducing glutathione biosynthetic capability », *Metabolic Engineering*, vol. 13, pp. 426-434.
- Zhu, Y., C. Romain et C.K. Williams (2016), « Sustainable polymers from renewable resources », *Nature*, vol. 540, n° 7633, pp. 354-362.
- Ziolkowska, J. et al. (2010), « Targets and mandates: Lessons learned from EU and US biofuels policy mechanisms », *AgBioForum*, n° 13, pp. 398-412.

PARTIE I

Chapitre 4

**Exploiter le potentiel
des nanotechnologies pour préfigurer
la prochaine révolution
de la production**

par

Steffi Friedrichs

Direction de la science, de la technologie et de l'innovation, OCDE

Les nanotechnologies sont des technologies généralistes qui ont déjà permis de nombreuses innovations de produit et de procédé ainsi que des améliorations de la productivité et de la durabilité dans presque tous les secteurs d'activité. Elles peuvent donner lieu à d'autres innovations et à l'émergence de nouveaux marchés dans un avenir proche, mais poursuivre les progrès dans ce domaine nécessite d'importants investissements dans la recherche et le développement et dans la commercialisation. De tels investissements devraient être soutenus par des collaborations intranationales et internationales afin de donner naissance à des infrastructures de recherche virtuelles, pour permettre le partage d'équipements au coût autrement prohibitif et le développement d'écosystèmes de recherche pluridisciplinaires réunissant universités, recherche publique et petites et grandes entreprises. L'enjeu est d'exploiter toute la puissance d'innovation des nanotechnologies dans tous les secteurs existants ou qui pourraient se développer. Il convient de concevoir de nouveaux modèles économiques et de financement de l'innovation qui tiennent compte de la pluridisciplinarité croissante de l'innovation et de son recours accru au numérique. Il convient également de lever les obstacles réglementaires à la commercialisation des nanotechnologies.

Introduction

Les nanotechnologies sont de plus en plus utilisées dans les procédés de production et les produits manufacturés. Elles permettent de remplacer les processus de production énergivores par d'autres moins coûteux (pour la fabrication des cellules photovoltaïques, par exemple, remplacement de la fusion de zone par l'impression sur rotative à l'air libre). Elles sont aussi à l'origine de nouveaux produits à usage unique bon marché (comme les laboratoires sur puce dans le domaine de la diagnostique).

Si l'on s'attend à ce que les nanotechnologies jouent un rôle plus important dans le secteur productif et dans les sciences, c'est que les nanosciences et leurs manifestations nanotechnologiques constituent l'étape ultime du contrôle de la matière – puisqu'il s'agit d'opérer à une échelle de longueur à laquelle la forme et la taille des agrégats d'atomes déterminent les propriétés et les fonctions de tous les matériaux et systèmes, y compris ceux des organismes vivants.

À courte et moyenne échéance, les nanotechnologies nous permettront de continuer d'améliorer nos produits et procédés de production. À plus longue échéance, les innovations qu'elles rendent possibles pourraient nous aider à créer des produits et des procédés entièrement nouveaux. Dans tous les cas, la productivité pourrait augmenter, et la demande de travailleurs qualifiés s'amplifiera. Il sera nécessaire de mieux comprendre les phénomènes à l'échelle nanométrique, donc d'investir dans la recherche scientifique fondamentale et appliquée.

Pour que les nanotechnologies nous livrent tous leurs avantages économiques et sociétaux, les responsables politiques devraient envisager la mise en œuvre de certains instruments spécifiques. Le présent chapitre examine et propose les suivants :

- investissements dans la recherche et le développement (R-D) et dans la commercialisation des nanotechnologies
- investissements dans des infrastructures de recherche virtuelles, et soutien de ces infrastructures, pour permettre le partage d'équipements au coût autrement prohibitif et favoriser un environnement de recherche collaboratif réunissant milieu universitaire, recherche publique et petites et grandes entreprises
- aide à la mise en place d'écosystèmes de recherche interdisciplinaires
- nouveaux modèles économiques et de financement de l'innovation, qui tiennent compte en particulier de la nature de plus en plus collaborative de la R-D lors des inventions complexes, et de l'essor du numérique dans les processus de recherche et de production
- identification et levée, en temps opportun, des obstacles réglementaires à l'innovation dans les nanotechnologies, en particulier les incertitudes réglementaires.

De la curiosité scientifique à la technologie de rupture

Le préfixe « nano » désigne l'échelle de longueur correspondant à un milliardième de mètre et, par extension, l'intervalle compris entre 1×10^{-9} m et 100×10^{-9} m (à titre de

comparaison, une feuille de papier ordinaire mesure environ 100 000 nanomètres d'épaisseur). Le terme « nanotechnologies » recouvre toutes les propriétés de la matière et tous les effets technologiques que rendent possible les phénomènes scientifiques intervenant à l'échelle de longueur du nanomètre. Les interactions à ce niveau que l'on appelle aussi « échelle nanométrique » ou « nano-échelle » sont fondamentales pour la vie et le monde matériel. L'échelle nanométrique est le domaine où les atomes, dépourvus de propriétés physiques propres, forment des liaisons entre eux, constituant ainsi les unités fonctionnelles les plus petites (nanométriques) de la matière, dont on observe les propriétés, les fonctionnalités et les mécanismes dans les mondes inorganique et organique.

La définition la plus large des nanotechnologies englobe par conséquent l'ensemble des phénomènes et processus intervenant à la nano-échelle, qui ont donné lieu à tout un éventail d'innovations : calculateur quantique (physique), matières invisibles (chimie des solides), tissus artificiels et cellules solaires biomimétiques (biologie), activateurs théranostiques pour la médecine (rendus possibles par les systèmes nano-électromécaniques créés en sciences de l'ingénieur).

Parce qu'elles nous donnent la possibilité de comprendre et de modifier les propriétés de la matière à l'échelle de l'atome, les nanotechnologies sont une composante déterminante de nombreux procédés de production et produits manufacturés avancés. Par exemple, elles peuvent aider à remplacer les procédés de production énergivores par d'autres moins coûteux (pour la fabrication des cellules photovoltaïques, par exemple, remplacement de la fusion de zone par l'impression sur rotative à l'air libre). Elles sont aussi à l'origine de la solution technique qui rend possible l'écran souple. Enfin, elles peuvent servir de fondement à de nouveaux produits de pointe à usage unique (comme les laboratoires sur puce dans le domaine de la diagnostique).

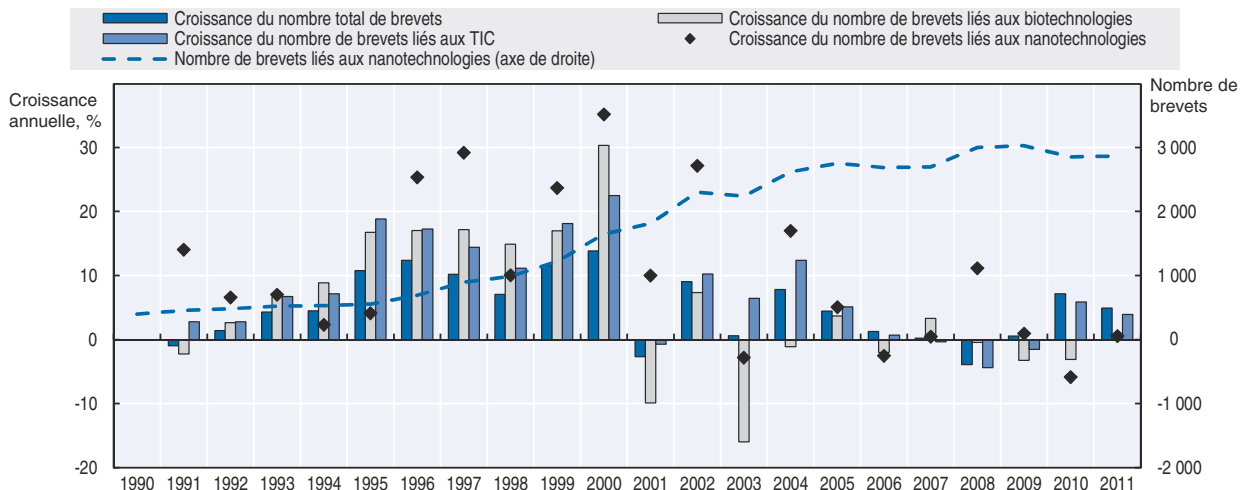
Les nanotechnologies sont des technologies généralistes (Helpman, 1998 ; Lipsey, Carlaw et Bekar, 2005) D'ailleurs il a souvent été dit qu'elles lanceraient la prochaine révolution industrielle. Elles devraient avoir un impact substantiel (dans certains cas, de rupture) dans tous les secteurs industriels, et faire émerger des secteurs entièrement nouveaux. Au fur et à mesure de leur développement, les nanotechnologies se verront intégrées à une gamme toujours plus large d'utilisations et réclameront des technologies et institutions complémentaires.

Dans les années 80, les études de prospective scientifique et technologique annonçaient que la progression serait fulgurante, de l'étape initiale de la découverte des techniques de maîtrise de la matière à l'échelle nanométrique, jusqu'à l'objectif final de la construction de n'importe quel système fonctionnel complexe à partir de ses plus petits éléments constitutifs (Drexler, 1986).

Le graphique 4.1 montre que la croissance du nombre de brevets liés aux nanotechnologies (losanges noirs) a connu une série de hausses plusieurs fois supérieures aux augmentations analogues mesurées pour des technologies génériques comparables telles que les biotechnologies (barres grises) et les technologies de l'information et de la communication (TIC) (barres bleues claires). Si l'on ajoute à cela la progression globale du nombre de brevets liés aux nanotechnologies déposés entre 1990 et 2011 (ligne pointillée bleue, axe de droite), on se rend compte que le domaine diversifié des nanotechnologies a déclenché des vagues répétées de recherches et de dépôts de brevets technologiques. Le graphique 4.2 détaille le phénomène en s'intéressant aux sous-domaines des nanotechnologies qui ont suscité un intérêt croissant pour certains phénomènes observés à l'échelle nanométrique.

Graphique 4.1. Évolution des brevets liés aux nanotechnologies, aux biotechnologies et aux TIC, 1990-2011

Taux annuels de croissance, familles de brevets IP5

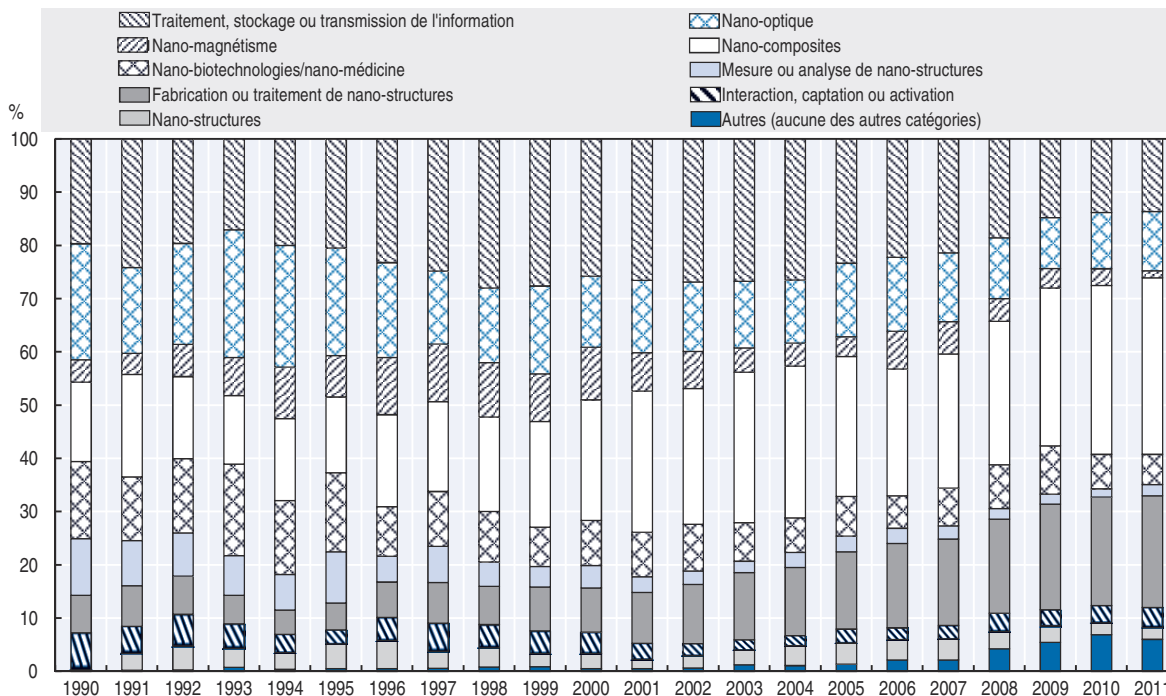


Source : OCDE (2016b), base de données STI Micro-data Lab: Intellectual property, <http://oe.cd/ipstats> (consulté en octobre 2016).

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933679773>

Graphique 4.2. Évolution des sous-domaines des nanotechnologies, 1990-2011

Part de chaque sous-domaine dans le total des brevets liés aux nanotechnologies des familles IP5



Source : OCDE (2016b), base de données STI Micro-data Lab: Intellectual property, <http://oe.cd/ipstats> (consulté en octobre 2016).

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933679792>

Le graphique 4.2 illustre la grande variété des applications nanotechnologiques pour lesquelles il a été recherché la protection d'un brevet. Il montre également une évolution au cours du temps de l'importance relative des neuf sous-domaines des nanotechnologies définis par les offices des brevets à des fins de classification. Alors que la « nano-optique »

et « le traitement, le stockage ou la transmission de l'information » dominaient les nanotechnologies en 1990, les « nanocomposites » et « la fabrication ou le traitement de nanostructures » étaient passés au premier plan en 2011. Les pourcentages indiqués dans le graphique 4.2 ont été établis sur la base des nombres de dépôts de familles de brevets IP5, la date de demande antérieure étant prise en compte.

Le nouveau visage d'une technologie générique révolutionnaire

On attribue souvent la première prédiction du potentiel d'innovation des nanotechnologies au physicien Richard Feynman, dans un exposé de 1959 intitulé « There's plenty of room at the bottom ». Une vision de la révolution de toutes les sciences et technologies des matériaux que le contrôle de la matière à l'échelle nanométrique pourrait amorcer (Feynman, 1960). Pourtant, il a fallu attendre le développement de la microscopie avancée dans les années 80 et, en particulier, l'invention du microscope à effet tunnel (qui permet la visualisation en temps réel de la nano-échelle) en 1981 (Binnig et Rohrer, 1986) pour voir apparaître le terme de « nanotechnologie ». Ce terme sera de plus en plus utilisé par la suite pour décrire un domaine de recherche interdisciplinaire en plein essor.

La recherche à l'échelle nanométrique est néanmoins soumise à des glissements thématiques, engendrés par la nouvelle compréhension que l'on acquiert de cette échelle et par d'autres découvertes scientifiques telles que l'isolation et la caractérisation du graphène en 2004 (Novoselov, 2004).

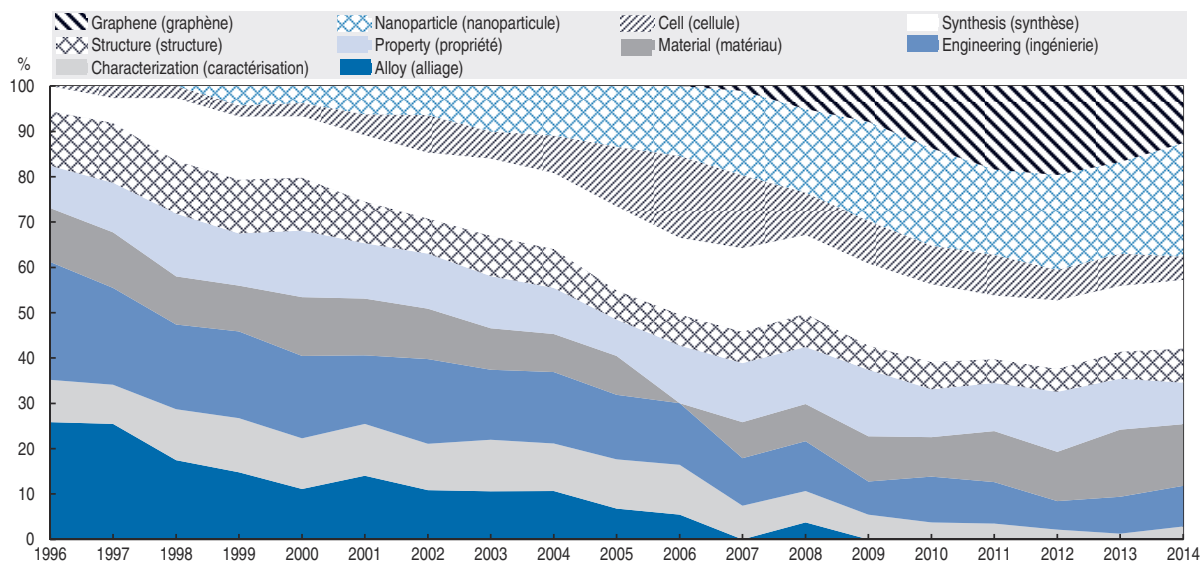
Le graphique 4.3 montre l'évolution des dix mots-clés les plus récurrents dans les titres d'articles de périodiques scientifiques consacrés aux nanotechnologies entre 1996 et 2014 (les pourcentages ont été calculés à partir du compte des occurrences normalisés de ces mots-clés). Au cours des deux dernières décennies, l'angle de la recherche sur les nanotechnologies s'est déplacé, des sciences de l'ingénieur intéressées par les matériaux inorganiques et leurs propriétés en 1996, à des applications scientifiques beaucoup plus larges. En 2014, la discipline était dominée par l'étude de matériaux appliqués spécifiques, comme les nanoparticules et le graphène, et l'application des nanotechnologies dans les tissus biologiques, comme la cellule.

Leurs possibilités d'application se multipliant, les nanotechnologies se verront intégrées à une gamme toujours plus large d'utilisations et réclameront des technologies et institutions complémentaires qui puissent favoriser la recherche interdisciplinaire et donner accès aux puissants équipements de caractérisation nécessaires à la recherche dans cette discipline.


Jusqu'à présent, toutefois, l'approfondissement des connaissances des phénomènes nanométriques et leur application à la conception de matériaux avancés et à la nano-ingénierie progresse à une vitesse beaucoup plus lente que celle que l'on pouvait espérer dans les années 80. Ce rythme décevant s'explique principalement par le coût élevé de l'instrumentation de R-D ainsi que par les échecs notoires des nanotechnologies quand les procédures à l'échelle du laboratoire doivent être déployées à plus grande échelle pour être commercialisés. L'étape de la production commerciale reste difficile à atteindre en raison principalement de notre maîtrise insuffisante des processus physiques et chimiques à l'échelle nanométrique et de notre incapacité à contrôler les paramètres de production à cette échelle. On assiste cependant à des progrès dans ce domaine depuis quelques années, en particulier grâce aux techniques avancées de stockage et de traitement de données de plus en plus utilisées en conception et en développement de matériaux.

Graphique 4.3. Évolution des principaux mots clés dans les articles consacrés aux nanosciences (1996-2014)

Part des dix mots-clés les plus récurrents dans les articles scientifiques (en anglais, avec leur traduction française entre parenthèses)



Source : Elsevier (2016), Scopus Custom Data, base de données, version 12.2015 (consultée en octobre 2016). Fouille de texte réalisée avec VOSviewer, version 6.1.3.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679811>

Même si les nombreux nouveaux produits des nanotechnologies qu'on espérait initialement voir apparaître n'ont pas vu le jour, on améliore progressivement les procédés de production, de fabrication, de maintenance et de transport en innovant grâce aux nanotechnologies. Depuis dix ans, de plus en plus de projets de R-D portent sur des procédés et produits nanotechnologiques dont l'adoption se fait ensuite rapidement. Par exemple, beaucoup de grandes entreprises se sont servies des nanotechnologies comme de technologies génériques au service d'innovations de procédé permettant d'atteindre les objectifs de protection de l'environnement et de développement durable : baisse des émissions de carbone grâce à la réduction des temps de réaction des procédés de production chimique ; baisse de la consommation de carburant des véhicules grâce à l'ajout de nanoparticules améliorant la combustion dans le gazole ; moindre recours aux solvants organiques grâce aux nanoparticules utilisables en suspension dans l'eau ; et remplacement de toxines et carcinogènes connus dans des composés de haute performance (notamment, remplacement de la poudre de nickel dans les alliages pour lames de turbines).

Pour ce qui est de l'innovation de produit à grand échelle, l'application des nanotechnologies prend la forme non pas d'une évolution radicale mais d'une amélioration graduelle des matériaux connus. Par exemple, l'industrie cosmétique incorporait auparavant aux crèmes solaires de grosses particules d'oxyde de zinc qui leur donnaient une consistance épaisse et une apparence opaque. Grâce aux nanotechnologies, elle a pu s'engager dans la fabrication à haute précision des nanoparticules d'oxyde de zinc qui absorbent le plus les ultraviolets (UV) donc protègent le plus contre ces rayonnements. En définitive, il est devenu possible d'ajouter une substance de protection UV translucide aux produits cosmétiques du quotidien. Dans un autre domaine, un rapport de 2014 a conclu que les nanotechnologies pourraient contribuer à la durabilité et à l'efficacité de l'utilisation des ressources, dans l'industrie pneumatique, par exemple (OCDE, 2014).

Par ailleurs, les nanomatériaux avancés sont de plus en plus utilisés dans des procédés de fabrication à grande échelle de produits de haute technologie. À titre d'exemple, on les utilise (principalement, la silice amorphe synthétique colloïdale) pour abraser et polir finement des composants électroniques ou optiques.

Selon une étude de la Commission européenne (CE, 2012), environ 70 % des innovations de produit sont fondées sur des matériaux présentant des propriétés nouvelles ou améliorées. À l'avenir, la production et la fabrication de matériaux et de composants se feront de plus en plus souvent sous contrôle numérique, des capteurs assurant la liaison entre le monde physique et ce que l'on appelle les « jumeaux numériques » (c'est-à-dire, les représentations entièrement virtuelles d'objets complexes, exécutées parallèlement au développement de ces objets dans le monde physique, voir chapitre 6), ce qui permettra d'établir des boucles de retour d'information et d'amélioration fondées sur l'apprentissage automatique, comme on va le voir dans la section suivante.

Un lien entre les mondes numérique et physique

L'une des nano-applications les plus importantes à moyen et à long terme sera la mise au point de capteurs et de détecteurs de haute précision. Capables de sonder les briques élémentaires de la matière aux niveaux atomique ou moléculaire, les capteurs nanotechnologiques peuvent être fabriqués à différentes fins. Par exemple, ils peuvent être spécifiquement adaptés pour : détecter des molécules organiques dans l'air ambiant avec une sensibilité et une sélectivité très importantes (comme cela doit être le cas dans les systèmes de surveillance de la sécurité de l'air) ; fournir les résultats de tests de dépistage rapides (tels que ceux des analyses de sang pendant une épidémie de grippe) ; effectuer des contrôles en ligne de la qualité pendant un procédé de fabrication à haut rendement dans un système complexe (par exemple, production de puces informatiques) ; ou encore tester la structure et certaines propriétés de matériaux nouvellement conçus et développés (par exemple, des matériaux créés pendant le nouveau processus à haut rendement que constitue l'optimisation simultanée, décrite au chapitre 6).

La généralisation des jumeaux numériques donnera de plus en plus d'importance aux nanotechnologies en tant que lien entre les mondes numérique et physique. Mais pour que les petites et moyennes entreprises (PME) puissent, elles aussi, recourir à des jumeaux numériques, le coût de cette technique doit être substantiellement réduit. Le concept des « mondes miroirs », défini par l'informaticien David Gelernter il y a plus de 20 ans, devient enfin réalisable en pratique grâce à la plus grande rapidité des connexions internet, au stockage de données, à l'informatique en nuage et aux algorithmes avancés, qui permettent d'enregistrer les données massives relatives aux performances d'un matériau ou d'un composant dans d'immenses « lacs de données » prêts à servir aux processus ultérieurs de conception, de développement ou de maintenance (The Economist, 2016). D'après une estimation du McKinsey Global Institute, créer de telles connexions entre les mondes physique et numérique pourrait générer jusqu'à 11 000 milliards USD de valeur économique par an d'ici 2025, dont un tiers dans le secteur manufacturier (McKinsey Global Institute, 2015).

Les grandes entreprises des secteurs des matériaux et de l'ingénierie profitent de plus en plus des possibilités des nanotechnologies afin de mettre au point des capteurs polyvalents pour créer les jumeaux numériques de tous les types de biens physiques qu'ils conçoivent (The Economist, 2016).

Le rôle moteur des nanotechnologies dans la prochaine révolution de la production

Aujourd'hui, les nanotechnologies fournissent des réponses innovantes à un certain nombre de défis majeurs, tels que la durabilité environnementale des procédés industriels (par exemple, baisse de la consommation d'énergie et de solvants), la mitigation du changement climatique (par exemple, nanomatériaux de captage du carbone et de stockage de l'énergie), la fourniture à bas coût de produits de prévention des risques pour la santé (par exemple, crèmes solaires invisibles), ou encore le développement de kits de diagnostic rapide (par exemple, capteurs à petite échelle pour les laboratoires sur puce). Cette section présente trois cas d'étude, qui se rapportent aux secteurs des cellules photovoltaïques, de l'automobile et de la fabrication de bouteilles en plastique qui mettront en lumière ce que les nanotechnologies permettent sur les procédés et les technologies en milieu industriel, et en particulier sur la productivité

Étude de cas A : des cellules photovoltaïques plus sûres et plus répandues grâce aux nanotechnologies

Les nanotechnologies devraient révolutionner les cellules photovoltaïques et leur production pour quatre raisons, décrites ci-après.

1. Parce qu'on peut maintenant déterminer avec précision la composition et/ou la structure d'un matériau à l'échelle nanométrique, on a pu créer de nouveaux matériaux photoactifs plus performants que les matériaux classiques selon au moins trois critères :
 - **Coût de production.** Il est possible de réduire substantiellement le coût de production des cellules photovoltaïques traditionnelles en remplaçant certains métaux coûteux (comme le platine) par des matériaux d'un prix plus abordable, notamment des nanocomposites (par exemple, une combinaison de nanofils d'oxyde de zinc sur des feuilles flexibles de graphite) (MIT, 2012) ou la structure en nid d'abeille du graphène dans laquelle on a intercalé du carbonate de lithium (Michigan Technological University, 2013).
 - **Sécurité environnementale.** Il est également possible d'améliorer l'innocuité des panneaux solaires en remplaçant des matériaux connus pour être toxiques (comme le plomb et le cadmium) par des nanocomposites sans risque ou presque pour l'environnement (Los Alamos National Laboratory, 2013).
 - **Rendement énergétique.** Enfin, il est possible d'augmenter le rendement énergétique des cellules photovoltaïques usuelles en réduisant l'épaisseur des couches de matériaux photoactifs au strict minimum (c'est-à-dire, deux feuilles d'une molécule d'épaisseur de graphène et d'autres éléments), ce qui permet d'empiler plusieurs de ces cellules dans un seul et même élément (MIT, 2013).
2. Ramener la taille des matériaux photoactifs à l'échelle nanométrique a permis d'élargir nettement la gamme de procédés industriels adaptés à la production de cellules photovoltaïques et, ainsi, de passer d'une production très spécialisée et très consommatrice d'énergie par fusion de zone (cellules photovoltaïques traditionnelles en silicium) à des techniques à grande échelle, peu coûteuses, de dépôt en couche mince (d'un liquide et/ou d'un gaz) ou d'impression à haut rendement (sérigraphie, impression sur rotative à l'air libre). Ces nouvelles techniques servent à produire les cellules photovoltaïques les plus récentes, dites de deuxième ou de troisième génération.
3. Les cellules en couche mince permettent en outre la création de cellules photovoltaïques flexibles et/ou sphériques, dont l'efficacité de collecte est meilleure que celle des cellules planes (Lin et al., 2014). Des ingénieurs du Laboratoire national sur les énergies

renouvelables (National Renewable Energy Laboratory, NREL) de Golden (Colorado, États-Unis) ont même réussi à concevoir des cellules photovoltaïques en couche mince, fabriquées à coût relativement faible, suffisamment flexibles pour être drapées.

4. La miniaturisation à l'échelle nanométrique de tous les composants actifs d'une cellule photovoltaïque (c'est-à-dire, le matériau photoactif et les deux électrodes) permet d'intégrer sans obstruction des cellules photovoltaïques quasiment transparentes à toute une gamme de composants du bâtiment, ce qui pourrait augmenter la production globale d'électricité d'origine solaire.

Bien que les progrès technologiques rapides et le boom actuel du marché des cellules photovoltaïques ne découlent pas encore véritablement des nanotechnologies, le quadruple impact de ces dernières sur la production de cellules photovoltaïques devrait se faire sentir à moyen et long terme.

Pour l'heure, les cellules photovoltaïques les plus courantes sont celles dites de première génération (en silicium cristallin) et de deuxième génération (composées de fines couches de métaux souvent toxiques). À moyen terme, on verra apparaître sur le marché les cellules photovoltaïques de troisième génération, composées de teintures organiques, dont les fonctionnalités et le mode de production à moindre coût sont le fruit d'innovations fondées sur les nanotechnologies. En parallèle, les nanotechnologies permettront de remplacer les composés toxiques des cellules photovoltaïques de deuxième génération par des nanocomposites aux performances analogues mais sans risque ou presque pour la sécurité.

À plus long terme, les nanotechnologies devraient donner naissance à de nouvelles cellules photovoltaïques translucides et à des procédés d'impression avancés qui permettront de couvrir les composants des bâtiments de cellules photovoltaïques bon marché. Ces évolutions pourraient entraîner une hausse significative de la part de la consommation mondiale d'énergie d'origine solaire, qui est actuellement de 1 % (AIE, 2014).

Étude de cas B : des avantages pour l'industrie automobile et ses clients grâce aux produits et procédés améliorés par les nanotechnologies

Grâce à leurs cycles d'innovation rapides, les secteurs de l'automobile et des transports bénéficient très largement des nanotechnologies. Ils ont déjà commercialisé avec succès de nombreuses applications. Par exemple, la mise au point de catalyseurs et d'additifs pour carburant avancés à base de nanomatériaux a permis d'améliorer les performances environnementales et de réduire la consommation des véhicules ; les nanomatériaux à base de noir de carbone augmentent les performances des pneus ; et les carrosseries bénéficient désormais de protections anti-corrosion développées grâce aux nanotechnologies.

Les innovations fondées sur les nanotechnologies révolutionnent également les procédés de production complexes du secteur automobile. Par exemple, pour réduire la consommation et augmenter la résistance à la corrosion des véhicules, les constructeurs ont remplacé un nombre croissant de pièces automobiles métalliques par des composites polymères. Mais cette amélioration a eu un coût financier et environnemental car les polymères ne sont pas électriquement conducteurs : il a fallu exclure les nouvelles pièces de la ligne de peinture électrostatique. Remédier au problème a nécessité de revêtir les pièces en polymère d'une couche de fond conductrice au cours d'une étape de production distincte avant de les peindre avec les parties métalliques (ou d'établir une deuxième ligne de peinture pour les pièces en polymère, mais au prix de différences dans les propriétés et de l'aspect

visuel). Or, les nanotechnologies apportent une nouvelle solution : l'ajout de petites quantités de nanofibres de carbone (des fibres de carbone fines, légères, extrêmement longues) au composite polymère le rend électriquement conducteur, sans modifier aucune autre de ses propriétés (Burton, 2006). Il a été estimé que cette innovation pouvait réduire les coûts de fabrication de 100 USD par véhicule, soit une valeur nette de l'ordre de 2 milliards USD par an pour l'ensemble du secteur automobile mondial (Burton, 2006).

Étude de cas C : une réduction drastique du coût et de l'empreinte carbone de la production de bouteilles en polytéréphtalate d'éthylène (PET) grâce aux nanomatériaux

L'industrie alimentaire est connue pour sa réticence à adopter des technologies et des matériaux radicalement nouveaux, compte tenu, d'une part, de la charge réglementaire importante qui pèse sur les innovations relatives aux produits d'alimentation humaine ou animale et aux matériaux en contact avec des aliments et, d'autre part, des attitudes de plus en plus sceptiques et nostalgiques des consommateurs, qui façonnent les opinions sur la nourriture et la nutrition plus que sur tout autre produit de consommation. Et pourtant, c'est dans ce secteur que s'est produite la toute première innovation de procédé – et l'une des plus rapides – que l'on doit aux nanotechnologies. En 2007, un brevet a été déposé pour protéger l'idée d'ajouter des nanoparticules thermo-absorbantes aux bouteilles de boisson en polymère qui viennent d'être soufflées afin de raccourcir le temps nécessaire à leur durcissement sous lumière infrarouge. Avec ce nouveau procédé, des nanoparticules en nitrure de titane absorbent la lumière infrarouge, devenant de fait des sources locales et miniatures de chaleur à l'intérieur du polymère (US DOE, 2011 ; Guler et al., 2013). Moins d'un an plus tard, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (AESAs) examinait et approuvait la sécurité de ces nanoparticules dans les bouteilles de boisson usuelles fabriquées en plastique PET (AESAs, 2008). Cette innovation, aujourd'hui vendue dans le monde entier sous la forme d'une solution concentrée de nanoparticules qu'il suffit d'ajouter au PET fondu à l'étape de l'injection dans le moule à préforme, est utilisée par quelques-uns des plus gros fabricants de bouteilles en PET.

La hausse de productivité qui résulte de cette innovation aurait substantiellement réduit les coûts de fabrication, d'abord parce que le temps d'étuvage des bouteilles en PET soufflées à chaud a été raccourci, ensuite parce que la consommation d'énergie requise au cours du procédé a été réduite de 38 %, ce qui revient à presque doubler la baisse des coûts et la réduction des émissions de CO₂ obtenue en mélangeant tout autre additif au polymère.

Implications pour l'action publique

Des infrastructures virtuelles pourraient suppléer aux coûts de R-D élevés

Il est nécessaire d'investir largement dans la R-D. De tels investissements peuvent aider à établir des communautés de recherche et à produire des connaissances suffisantes en attendant que la technologie soit assez développée pour se financer elle-même grâce aux applications industrielles et à leur commercialisation. Les recherches sur les nanotechnologies, très capitalistiques, nécessitent des salles blanches et des techniques de microscopie avancée à la plupart des étapes de la démarche de R-D. Le coût de la R-D consacrée aux nanotechnologies est appelé à rester très élevé (par exemple, au Royaume-Uni, l'utilisation d'un microscope dernier cri pendant une journée peut coûter plus de 5 000 GBP) et pourrait même augmenter encore avec la spécialisation : comprendre pleinement les processus et les propriétés de la matière à l'échelle nanométrique exige des

matériels de plus en plus spécialisés et performants, comme les appareils combinés de nanofabrication (manipulation) et de caractérisation (imagerie).

Mobiliser l'ensemble des outils de recherche et d'ingénierie nécessaires à la mise en place d'infrastructures complètes de R-D pour les nanotechnologies risque d'avoir un coût prohibitif. Les équipements de pointe coûtent plusieurs millions d'euros et nécessitent souvent la construction de bâtiments adaptés. En outre, les instruments de recherche les plus puissants n'existent parfois que sous forme de prototypes. Il est donc presque impossible de rassembler des infrastructures nanotechnologiques complètes dans un seul établissement ou même une seule région. De ce fait, il est impératif d'intensifier la collaboration interinstitutionnelle et/ou internationale pour pouvoir exploiter tout le potentiel des nanotechnologies. Les programmes de R-D financés par les pouvoirs publics devraient être ouverts aux établissements universitaires et aux entreprises (grandes et petites) d'autres pays. Cela permettrait de tisser des liens de collaboration ciblés, orientés vers des solutions précises, entre des partenaires idoines et de créer une infrastructure de R-D virtuelle (c'est-à-dire un réseau d'établissements et de laboratoires qui possèdent des instruments et une expertise complémentaires, entre lesquels les chercheurs peuvent circuler comme s'ils travaillaient dans une même installation de recherche). Une telle infrastructure de R-D a par exemple été créée dans le cadre du projet QualityNano de la Commission européenne (QualityNano, 2015).

La création d'infrastructures virtuelles qui mettent en relation des éléments d'infrastructure de R-D pour former des réseaux pluridisciplinaires de scientifiques et d'ingénieurs offre une alternative moins coûteuse au financement de multiples centres de R-D sur les nanotechnologies. La montée en puissance du numérique rend justement possible l'accès à (parfois très grande) distance à des équipements de R-D de haute technologie, de telle sorte qu'aujourd'hui, les utilisateurs d'un microscope ultramoderne peuvent même conduire leurs expériences depuis un terminal informatique situé sur un autre continent.

L'interdisciplinarité doit être soutenue et encouragée

Les nanotechnologies tendent à prospérer au milieu des disciplines traditionnelles, autrement dit lorsque des infrastructures de recherche et d'ingénierie spécialisées sont disponibles – favorisant ainsi la multidisciplinarité – et que l'expertise des disciplines traditionnelles est mise en commun. De telles conditions peuvent prendre la forme de réseaux virtuels, comme celui constitué en Allemagne pour soutenir la nanotechnologie biomédicale (Malsch, 2005), ou d'établissements de recherche, à travers par exemple les projets de collaboration interdisciplinaire dans la recherche menés au Royaume-Uni. Les responsables publics devraient chercher à soutenir ces réseaux multidisciplinaires, idéalement avec une infrastructure de R-D. Ces réseaux devraient inclure des universités et des petites et grandes entreprises. Encourager les partenariats public-privé est un moyen de favoriser l'excellence à la fois scientifique et commerciale.

De par leur vocation généraliste, les nanotechnologies influent sur un large éventail d'activités industrielles. C'est pourquoi les moyens d'action qui les soutiennent le mieux sont ceux qui tiennent compte de la pratique multidisciplinaire qu'elles exigent. En 2008, la plupart des pays de l'OCDE disposaient de politiques spécifiques et d'instruments de financement de la R-D dédiés, et autour de la moitié de ces pays avaient établi de nouveaux cadres organisationnels et institutionnels pour soutenir les nanotechnologies (OCDE, 2008)¹.

De nouveaux modèles économiques et de financement de l'innovation sont nécessaires pour réaliser la prochaine révolution de la production

Le coût relativement élevé de la R-D dans les nanotechnologies empêche les petites entreprises d'innover et de réussir dans ce domaine. Les grandes entreprises, fortes de leur masse critique de R-D et de production, peuvent acquérir, exploiter des instruments coûteux, se procurer et utiliser des connaissances externes. Elles sont en meilleure posture pour assimiler les nanotechnologies (OCDE, 2010). Les responsables publics devraient soutenir les petites entreprises dans leurs efforts d'innovation et de commercialisation, en prévoyant pour elles des incitations et des soutiens suffisants et appropriés pour qu'elles réalisent pleinement leur potentiel. Ils pourraient aussi s'employer à faciliter l'accès des PME aux équipements nécessaires : en augmentant les subventions de la recherche accordées aux PME ; en subventionnant/exonérant de redevances l'utilisation de ces équipements ; ou en délivrant des bons d'utilisation aux PME. Le développement de réseaux associant établissements universitaires, laboratoires publics de recherche et petites et grandes entreprises crée un cadre propice au partage d'une infrastructure de recherche, tout en aidant dans le même temps les start-ups à s'implanter dans une chaîne de valeur commerciale existante ou potentielle.

Pour que les processus de R-D à haut rendement de demain (tels que la conception simultanée et les jumeaux numériques décrits au chapitre 6) se généralisent dans la filière nanotechnologique, les décideurs des secteurs public et privé doivent envisager de réexaminer les modèles économiques et de financement existants. De nouveaux modèles pourraient bien être nécessaires. La R-D des nouvelles technologies convergentes ainsi que l'invention et la fabrication des produits rendus possibles par ces technologies, se déroulent suivant d'autres processus que ceux que l'on observe traditionnellement (par exemple : construction automobile, industrie alimentaire ou sidérurgie). Cependant, des barrières spécifiques pourraient faire obstacle à l'émergence d'un écosystème adapté, pour les raisons suivantes :

- La généralisation de la conception simultanée et des jumeaux numériques exige la création de grandes bases de stockage, en accès libre, des données (et des métadonnées) de R-D fondamentale produites par les laboratoires de recherche universitaires, les grands centres de R-D de l'industrie et les PME (généralement des start-ups ou des entreprises issues de l'essaimage). La première difficulté tient donc au fait de savoir comment de telles bases de données seraient financées, qui serait responsable de leur création et de leur maintenance, et comment leur qualité serait contrôlée. S'il semble le plus approprié que la responsabilité de ces bases incombe à une enceinte internationale de collaboration entre autorités publiques, il est en revanche moins facile de déterminer comment les coûts de développement, de maintenance et de contrôle qualité seraient couverts. Les pouvoirs publics devraient collaborer à l'élaboration d'une stratégie et d'une feuille de route applicables à des communs de données internationalement partagés.
- Les pouvoirs publics doivent également imaginer des modèles qui permettent de partager librement les données préconcurrentielles sans compromettre la capacité des universités et des petites entreprises à lever des fonds. Dans les situations où grandes entreprises, PME et universités mettraient à disposition leur données de R-D fondamentale (c'est-à-dire à la fois les paramètres et les spécifications des produits et des procédés) dans une base de données en accès libre (partage de données), il serait difficile (peut-être impossible) de conclure des accords de licence ou de prévoir des accords bénéficiant aux contributeurs de l'amont de la chaîne de connaissances (autrement dit, les chercheurs). Ce manque de

protection des données de R-D fondamentale fragiliserait les modèles actuels de collaboration entre universités et industriels – comme le financement de programmes de doctorat sur des thèmes particuliers de recherche – qui sont fondés sur l’affectation de la propriété des différents éléments de savoir nécessaires à la collaboration (notamment, propriété intellectuelle d’amont, articles publiés dans des revues à comité de lecture, et métadonnées concernant les matériaux). Les collaborations de ce type entre le public et le privé sont généralement négociées et garanties par des contrats de collaboration aux termes desquels la part de la propriété de l’invention qui revient à chaque partie dépend des capacités de recherche, des compétences et de la propriété intellectuelle d’amont de cette partie. Si leur principal levier de négociation (les données de R-D fondamentale) devenait librement accessible, les universités pourraient perdre les financements dont elles bénéficient grâce à leur collaboration avec l’industrie et, de ce fait, ne plus avoir les moyens d’acquérir les équipements de pointe nécessaires à la R-D sur les nanotechnologies.

- Les décideurs et les responsables de l’élaboration des politiques devraient travailler à la création d’un écosystème d’innovation qui permet le partage préconcurrentiel des données de R-D fondamentale sans compromettre la protection de la propriété intellectuelle de ceux qui n’ont pas les moyens financiers de faire protéger leurs travaux par des brevets. Il pourrait s’agir de rendre le dépôt de brevet moins coûteux pour les PME, mais aussi d’assurer la protection de la propriété intellectuelle par d’autres moyens.
- Le concept de jumeau numérique met plus en avant encore l’importance des algorithmes de calcul qui peuvent transformer de gros volumes de données sur les matériaux et les procédés en modèles et simulations d’inventions. Si le jumeau numérique devenait un outil d’innovation dominant dans une chaîne de valeur, la valeur ajoutée se déplacerait de l’expert de R-D à la puissance de calcul et d’apprentissage automatique de l’algorithme. Par exemple, dans la chaîne de valeur de la fabrication de matériaux pour les pales de turbine, les savoirs les plus importants sont actuellement aux mains des spécialistes des matériaux et des procédés. Ces experts suggèrent des innovations incrémentielles des compositions et/ou des procédés appliqués pour fabriquer le matériau puis la pale de la turbine. Dans un monde de jumeaux numériques, le développement innovant de la pale de la turbine se ferait depuis un modèle numérique de cette pale, les données de R-D fondamentale sur les pales de turbine venant constamment alimenter un algorithme d’apprentissage automatique qui simulerait les composants idéaux du matériau et les paramètres de fabrication de la pale, tout en mesurant en continu les paramètres cibles d’un prototype de pale de turbine et en ajustant les paramétrages en cas de déviation. Dans ce scénario futuriste, l’étape innovante déterminante viendrait de l’algorithme. À ce sujet, il convient de réfléchir à l’harmonisation internationale de la protection de la propriété intellectuelle des programmes et logiciels, actuellement régie par des règles différentes aux termes des droits des États-Unis et de l’UE.

La collaboration internationale doit aider à éliminer les incertitudes réglementaires

Les incertitudes réglementaires qui entourent l’appréciation des risques et l’homologation des produits issus des nanotechnologies entravent lourdement la commercialisation des innovations associées aux nanotechnologies. La raison en est que des produits en attente d’autorisation de mise sur le marché restent parfois dans les cartons pendant plusieurs années avant qu’une décision soit prise. Il est arrivé que cela pousse des start-ups pourtant prometteuses à mettre la clé sous la porte, ou de grandes entreprises à mettre fin à des projets de R-D ou de mise au point de produits innovants. Dans un rapport

de 2016 sur le traitement de certains produits issus des nanotechnologies dans les flux de déchets, l'OCDE a conclu qu'il fallait redoubler d'efforts pour intégrer les nanotechnologies en toute sécurité dans leurs différents domaines d'utilisation (OCDE, 2016a). Les pouvoirs publics devraient soutenir la définition de règles transparentes et opportunes d'évaluation des risques présentés par les produits issus des nanotechnologies, tout en œuvrant à l'harmonisation internationale de ces règles. Depuis 2006, l'OCDE est à la manœuvre sur la scène internationale pour encourager la convergence des approches réglementaires concernant la sécurité de ces produits (OCDE, 2011).

Note

1. L'OCDE conduit actuellement une étude pour déterminer si ces premiers programmes de financement spécifique de la R-D sur les nanotechnologies ont depuis été remplacés par des mesures plus génériques.

Références

- AESA (Autorité européenne de sécurité des aliments) (2008), «21ème liste de substances présentes dans des matériaux en contact avec les aliments Avis du groupe scientifique sur les matériaux en contact avec les aliments, les enzymes, les arômes et les auxiliaires technologiques (CEF) », *Autorité européenne de sécurité des aliments*, n° 888-890, pp. 1-14, <http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2008.888> (consulté le 20 janvier 2017).
- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2014), «2014 IEA snapshot of global PV markets », AIE/OCDE, Paris, www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/technical/PVPS_report_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2014.pdf (consulté le 20 janvier 2017).
- Binnig, G. et H. Rohrer (1986), «Microscope à effet tunnel », *IBM Journal of Research and Development*, vol. 30, n° 4, pp. 355-69.
- Burton, D. (2006), «Enabling electrostatic painting of automotive polymers with low cost carbon nanofibers », Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA), Washington, DC, <http://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts/index.cfm/fuseaction/display.abstractDetail/abstract/7975> (consulté le 20 janvier 2017).
- CE (Commission européenne) (2012), «Materials Research and Innovation in the Creative Industries », <http://dx.doi.org/10.2777/30054>.
- Drexler, K.E. (1986), *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*, Anchor Books, New York.
- Elsevier (2016), *Scopus Custom Data*, base de données, Version 12.2015 (consulté en octobre 2016).
- Feynman, R.P. (1960), «There's plenty of room at the bottom », *Engineering and Science*, février, pp. 22-36.
- Guler, U. et al. (2013), «Local heating with titanium nitride nanoparticles », *CLEO : 2013, OSA Technical Digest, Optical Society of America*, https://engineering.purdue.edu/~shalaev/Publication_list_files/CLEO2013_LocalHeatingTiN_NPs.pdf (consulté le 20 janvier 2017).
- Helpman, E. (dir. pub.) (1998), *General Purpose Technologies and Economic Growth*, MIT Press, Cambridge, Mass., et Londres.
- Lin, K.-C. et al. (2014), «Solar Energy Collection on a spherical surface », *Energy and Environmental Engineering*, n° 2, pp. 48-54.
- Lipsev, R., K. Carlaw et C. Bekar (2005), «Economic Transformations – General Purpose Technologies and Long-Term Economic Growth », Oxford University Press.
- Laboratoire national de Los Alamos (2013), «Nontoxic quantum dot research improves solar cells », communiqué de presse.
- Malsch, N.H. (2005), *Biomedical Nanotechnology*, CRC Press, Boca Raton, FL, www.crcpress.com/Biomedical-Nanotechnology/Malsch/p/book/9780824725792.
- McKinsey Global Institute (2015), «The Internet of Things: Mapping the value beyond the hype », McKinsey & Company, www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/the%20internet%20of%20things%20the%20value%20of%20digitizing%20the%20physical%20world/unlocking_the_potential_of_the_internet_of_things_full_report.ashx (consulté le 18 avril 2017).

- MIT (2013), «Solar power heads in a new direction: thinner », communiqué de presse, MIT News, Institut de technologie du Massachusetts, Cambridge, Mass., <http://news.mit.edu/2013/thinner-solar-panels-0626> (consulté le 20 janvier 2017).
- MIT (2012), «Flexible, light solar cells could provide new opportunities », communiqué de presse, MIT News, Institut de Technologie du Massachusetts, Cambridge, Mass., <http://news.mit.edu/2012/hybrid-flexible-light-solar-cells-1221> (consulté le 20 janvier 2017).
- Novoselov, K.S. et al. (2004), «Electric field effect in atomically thin carbon film », *Science*, n° 306, vol. 306, n° 5696, pp. 666-669, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1102896>.
- OCDE (2016a), *Nanomaterials in Waste Streams: Current Knowledge on Risks and Impacts*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264249752-en>.
- OCDE (2016b), *STI Micro-data Lab: Intellectual property*, base de données, <http://oe.cd/ipstats> (consulté en octobre 2016).
- OCDE (2014), *Nanotechnology and Tyres: Greening Industry and Transport*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264209152-en>.
- OCDE (2011), «Nanosafety at the OECD: The first five years 2006-2010 », OCDE, Paris, www.oecd.org/science/nanosafety/47104296.pdf (consulté le 20 janvier 2017).
- OCDE (2010), *The Impacts of Nanotechnology on Companies: Policy Insights from Case Studies*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264094635-en>.
- OCDE (2008), «Inventory of national science, technology and innovation policies for nanotechnology 2008 », OCDE, Paris, www.oecd.org/sti/nano/43348394.pdf (consulté le 20 janvier 2017).
- QualityNano (2015), site web du projet, www.qualitynano.eu/ (consulté le 20 janvier 2017).
- The Economist (2016), «Machines Learning – Siemens and General Electric gear up for the Internet of Things », *The Economist*, 3 décembre, www.economist.com/node/21711079#print (consulté le 13 décembre 2016).
- Université technologique du Michigan (2013), «3D Graphene: Solar power's next platinum? », communiqué de presse, www.understandingnano.com/3d-graphene-solar-power.html (consulté le 20 janvier 2017).
- US DOE (Département de l'Énergie des États-Unis) (2011), «Infrared Absorbing Nanoparticles for Reducing Cure Temperatures in Industrial Coatings », DOE/EE-0538, mai, Département de l'Énergie des États-Unis, Washington, DC, www1.eere.energy.gov/manufacturing/industries_technologies/nanomanufacturing/pdfs/concept_infrared_nanoparticles.pdf (consulté le 20 janvier 2017).

PARTIE I

Chapitre 5

L'impression 3D et ses conséquences environnementales

par

Jeremy Faludi

Principal, Faludi Design, Université de Californie, Berkeley
et Minneapolis College of Art and Design

avec

Natasha Cline-Thomas et Shardul Agrawala
Direction de l'environnement de l'OCDE

L'impression tridimensionnelle ou 3D, également dénommée « fabrication additive », est appelée à remplacer d'autres technologies de fabrication. Ce chapitre examine ses possibles conséquences sur le plan de la durabilité environnementale et recense les interventions prioritaires des pouvoirs publics pour faire en sorte que ces conséquences soient bénéfiques. Il analyse plusieurs technologies d'impression 3D parmi les plus répandues aujourd'hui et décrit les tendances à la faveur desquelles cette méthode pourrait être en mesure de supplanter d'autres technologies dans un avenir proche. L'impact environnemental des procédés typiques d'impression 3D d'aujourd'hui est comparé à celui de deux méthodes de fabrication classiques, sur la base d'analyses du cycle de vie et de bilans portant notamment sur les émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants atmosphériques, la toxicité des matières et l'appauvrissement des ressources. Ce chapitre analyse également la diffusion annoncée de l'impression 3D dans un nombre croissant de secteurs d'activité. S'il s'intéresse surtout aux procédés dans le domaine des matières plastiques, d'autres matériaux comme les métaux sont également pris en considération. La généralisation de l'impression 3D telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui ne serait pas forcément toujours bénéfique pour l'environnement, mais il existe déjà des technologies qui, si elles cessaient d'être marginales pour devenir la norme dans l'industrie, pourraient permettre de rendre la fabrication nettement plus durable. Le secteur se trouve à la croisée des chemins, et des initiatives judicieuses prises aujourd'hui peuvent permettre d'installer pour des décennies des technologies bénéfiques et faire de l'impression 3D un facteur clé d'un avenir plus durable.

Introduction

La « fabrication additive » ou « impression 3D », comme nous l'appellerons dans ce chapitre, est potentiellement à même de révolutionner les méthodes de fabrication industrielle en reléguant à l'arrière-plan des technologies traditionnelles et de démocratiser la production de biens manufacturés. Au cours de la prochaine décennie, sa montée en puissance dans de multiples secteurs pourrait avoir des avantages sur le plan de la durabilité environnementale, mais aussi des inconvénients. L'impression 3D fait appel à toute une série de technologies et de processus pour produire, à partir d'un fichier numérique, un objet physique tridimensionnel par l'empilement de couches de matière successives. Comme d'autres formes de fabrication, elle est avant tout une façon de produire des pièces ; la plupart des produits sont constitués de nombreuses pièces, dont seule une partie peut être produite par impression 3D.

Les méthodes de fabrication classiques susceptibles d'être remplacées par l'impression 3D sont trop nombreuses et variées pour être toutes décrites ici de manière détaillée ; dans ce chapitre, seuls l'usinage et le moulage par injection seront donc examinés. L'usinage consiste à retirer certaines parties d'un bloc de matériau pour produire la forme finale. Il permet de fabriquer, à partir de divers matériaux, dont des plastiques et des métaux, des pièces aux surfaces bien finies avec une grande précision. De nos jours, il est souvent commandé par ordinateur et utilise comme point de départ le même type de fichier informatique que les imprimantes 3D. L'usinage ne nécessite pas la fabrication d'un moule, si bien que chaque pièce produite peut être unique, mais il requiert souvent une main-d'œuvre qualifiée et produit des quantités non négligeables de déchets. Pour sa part, le moulage par injection consiste à faire fondre du plastique et à l'injecter dans les cavités d'un moule pour produire des pièces en quelques secondes. On ouvre ensuite le moule pour en extraire les pièces ainsi formées, puis on le referme pour fabriquer les suivantes. Cette méthode est adaptée à toutes les matières thermoplastiques et permet de produire avec une grande précision des pièces aux surfaces bien finies. Étant donné qu'elle exige de fabriquer d'abord un moule, elle n'est généralement pas adaptée à la production de pièces personnalisées, mais elle permet de produire des milliers ou même des millions d'éléments identiques à un faible coût et en générant peu de déchets plastiques.

Quant à l'impression 3D, bien que sa montée en régime dans les activités manufacturières et l'intérêt qu'elle suscite dans l'opinion publique soient récents, elle est plus ancienne qu'on le pense généralement, puisqu'elle a vu le jour dans les années 80. Elle a commencé à être largement connue au début des années 2000, au moment où l'expiration des premiers brevets a permis l'apparition de l'impression 3D de bureau à bas coût par l'intermédiaire du mouvement *open source*. Le secteur connaît aujourd'hui une expansion rapide à la faveur de la baisse des prix des imprimantes et des matériaux, de la progression de la qualité d'impression et de la convergence entre innovation privée et *open source* (Hornick et Rol, 2013).

Cet essor a été qualifié de « ruée vers l'or ». De fait, les ventes d'imprimantes 3D ont doublé entre 2005 et 2011 (McKinsey, 2012), et le chiffre d'affaires annuel du secteur devrait dépasser 10 milliards USD à l'horizon 2021 (Wohlers, 2014). À l'heure actuelle, l'impression 3D sert essentiellement à créer des prototypes, des modèles et des outils, tandis que la production directe de pièces entrant dans des biens commercialisés ne représente que 15 % de ses emplois (Beyer, 2014). La situation n'est toutefois pas figée, puisque le segment manufacturier du secteur affiche une croissance de 60 % par an (Cohen, Sargeant et Somers, 2014). Les biens obtenus par impression 3D sont destinés à des produits de niche à forte valeur et fabriqués en petite série, par exemple dans les domaines aérospatial, de la joaillerie et des appareils médicaux. Il n'existe quasiment pas de produits fabriqués intégralement par impression 3D, mais on trouve des pièces issues de l'impression 3D dans des produits commercialisés.

Si beaucoup vantent la durabilité de l'impression 3D, rares sont ceux qui connaissent son véritable impact : en l'occurrence, beaucoup de louanges sont injustifiées, et à l'inverse, bon nombre de promesses à long terme sont méconnues. En 2009, 65 experts ont été invités par la Fondation nationale pour la science des États-Unis (National Science Foundation, NSF) à tracer une feuille de route pour la fabrication additive (*Roadmap for Additive Manufacturing, RAM*). Celle-ci comporte une section consacrée à la durabilité, dans laquelle les experts recommandent de recourir à l'analyse du cycle de vie (ACV) pour quantifier les incidences environnementales de chacun des principaux types d'impression 3D et de les comparer à celles des méthodes de fabrication classiques (Bourell, Leu et Rosen, 2009). La durabilité de l'impression 3D est déterminée entre autres par ses effets sur les transports, par la production de déchets et la consommation d'énergie durant la fabrication, par la consommation d'énergie en phase d'utilisation et par la valorisation des matières dans l'optique d'une économie circulaire. Il existe des cas où les pièces fabriquées par impression 3D réduisent l'impact environnemental d'un produit en phase d'utilisation, comme le montre l'exemple de la tuyère propulsive ainsi fabriquée par General Electric (Freedman, 2011). Cependant, comme de telles améliorations sont difficiles à prévoir et peuvent être limitées aux secteurs automobile et aérospatial, nous nous concentrerons dans ce chapitre sur les incidences environnementales au stade de la fabrication.

L'attention se portera avant tout sur les répercussions de l'impression de pièces en plastique destinées à des produits de consommation et des prototypes, car il s'agit là des plus importants segments du marché de l'impression 3D (Beyer, 2014). Néanmoins, nous aborderons aussi l'impression de pièces en métal et d'autres matériaux, sachant que l'impression 3D pourrait avoir entre autres pour avantage d'élargir le recours à des matériaux de substitution. Le plastique est omniprésent dans le monde d'aujourd'hui parce qu'on peut lui donner presque n'importe quelle forme ; avec l'impression 3D, d'autres matériaux acquièrent cette faculté.

État des applications des technologies d'impression 3D

L'impression 3D recouvre un large éventail de technologies qui associent chacune de façon particulière le matériau et l'imprimante. Par exemple, les matériaux thermoplastiques ne peuvent être imprimés que par des machines dotées d'une source de chaleur pour les faire fondre et les extruder, tandis que les liquides époxy qui doivent faire l'objet d'un durcissement ultraviolet (UV) ne fonctionnent qu'avec des machines pourvues d'une source de rayonnement UV. Certains systèmes sont plus flexibles que d'autres.

Les modèles 3D imprimables sont créés à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) et/ou d'un scanner 3D capable de générer des fichiers informatiques. Les fichiers ainsi obtenus sont ensuite traités par le logiciel pilote de l'imprimante 3D, qui se charge de donner à celle-ci les instructions nécessaires pour les imprimer. Les logiciels pilotes sont pour certains propres à une imprimante ou famille d'imprimantes, comme dans le cas des constructeurs Stratasys et Renishaw, et pour d'autres plus universels, à l'image d'Ultimaker Cura (Ultimaker, 2016) ou de Microsoft Standard Driver (Microsoft, 2016). Les procédés d'impression se distinguent aussi par la nature de leur production ; toutes les imprimantes ne sont pas capables de produire tous les types de pièces.

Beaucoup de systèmes impriment des matériaux de support en plus du matériau du modèle à proprement parler, pour éviter que les pièces s'affaissent ou se déforment en cours de fabrication. De nombreuses pièces imprimées nécessitent un support supplémentaire en fonction de leur géométrie et du procédé d'impression. Si certaines n'ont pas besoin de matériaux de ce type, d'autres en consomment plus que des matériaux d'impression. Les matériaux de support peuvent être les mêmes que ceux des modèles ou différents, et la manière de les retirer varie selon les procédés.

Procédés d'impression

Les procédés d'impression 3D sont nombreux, trop nombreux pour pouvoir être décrits convenablement dans ce chapitre. Nous nous contenterons donc d'en présenter quatre, qui sont très répandus dans l'univers de l'impression laser et constituent potentiellement des procédés durables : l'extrusion thermoplastique, la projection de liant, la photopolymérisation et le frittage laser.

L'extrusion thermoplastique consiste à faire fondre un filament de matériau à l'aide d'une buse chauffante qui se déplace suivant trois axes (X, Y et Z) afin de déposer le matériau sur un lit ou une plateforme. Elle comprend la technologie de modélisation par dépôt de fil en fusion ou FDM (pour *fused deposition modelling*), également appelée impression par dépôt de fil fondu ou FFF (pour *Fused Filament Fabrication*), qui est l'une des plus anciennes technologies de fabrication additive et la première à avoir fait l'objet d'applications *open source*. Ce procédé offre généralement une résolution moindre que les autres technologies, mais il a l'avantage d'être simple, fiable et peu coûteux.

Les matières plastiques généralement utilisées avec cette technologie sont l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), qui sert également à fabriquer les briques Lego ; l'acide polylactique (PLA), matière plastique d'origine végétale et biodégradable qui est souvent employée dans les emballages alimentaires ; et le poly(téréphtalate d'éthylène glycol) (PET), qui est la matière dans laquelle sont fabriqués la plupart des bouteilles en plastique et d'autres emballages courants. La technologie FDM peut aussi être utilisée avec de l'argile, de la pâte à modeler, des élastomères et des alliages eutectiques.

Elle génère potentiellement très peu de déchets lorsque la géométrie des pièces ne nécessite pas de matériau de support, et elle peut en principe extruder n'importe quel thermoplastique, même ceux comprenant des additifs. Les imprimantes fonctionnant par extrusion ne peuvent fabriquer qu'une seule pièce à la fois, et la durée d'impression est directement corrélée à la quantité de matériau imprimée.

Le procédé de projection de liant fonctionne comme l'impression à jet d'encre bidimensionnelle, si ce n'est que l'encre liquide projetée sur le papier est ici remplacée par

du liant liquide qui est projeté sur un lit de poudre, avant que la couche de poudre suivante soit déposée par voie mécanique, et ainsi de suite.

Il permet d'imprimer de nombreux matériaux différents, qui vont du plâtre au sucre (Molitch-Hou, 2015) en passant par la céramique (cuite après impression) et les poudres métalliques (frittées après impression). Des chercheurs de l'Université de Californie à Berkeley ont utilisé le procédé de projection de liant pour imprimer de la sciure, du béton, du sel, de l'amidon et d'autres matières.

Cette méthode permet des impressions de très grande qualité en termes de résolution et de couleur. Théoriquement, la production de déchets peut être quasi nulle, car la poudre est réutilisable et le recours à des matériaux de support n'est pas nécessaire. Parmi les quelques méthodes d'impression qui ont été soumises à une ACV complète, la projection de liant employée avec des matériaux verts est l'une des plus prometteuses en termes de durabilité (Faludi et al., 2015b). Cela étant, bien souvent, les matériaux utilisés lors des expériences n'atteignent pas encore le niveau de qualité requis pour des produits de consommation. Les imprimantes fonctionnant selon ce procédé peuvent fabriquer plusieurs pièces à la fois, et la durée d'impression est davantage liée à la hauteur de la pièce qu'à la quantité de matériau imprimée.

Graphique 5.1. **Pièce imprimée de façon expérimentale par projection de liant**



Source : Faludi, J. et al. (2015b), « Does material choice drive sustainability of 3D printing? », <https://waset.org/Publication/does-material-choice-drive-sustainability-of-3d-printing-/10000327>.

Dans l'impression par photopolymérisation, on emploie un photopolymère liquide qui durcit au contact des rayonnements UV : pour projeter ceux-ci, la stéréolithographie (SLA) utilise un rayon laser UV, la technique de traitement numérique de la lumière ou DLP (*digital light processing*) fait appel à un projecteur d'UV numérique. Le procédé CLIP (*continuous liquid interface production*) recourt à un projecteur UV en modifiant les conditions de polymérisation. La SLA, parfois appelée fabrication optique ou impression résine, est le plus ancien procédé d'impression 3D. La technique DLP est généralement plus rapide, tandis que le procédé CLIP permet de décupler la vitesse d'impression.

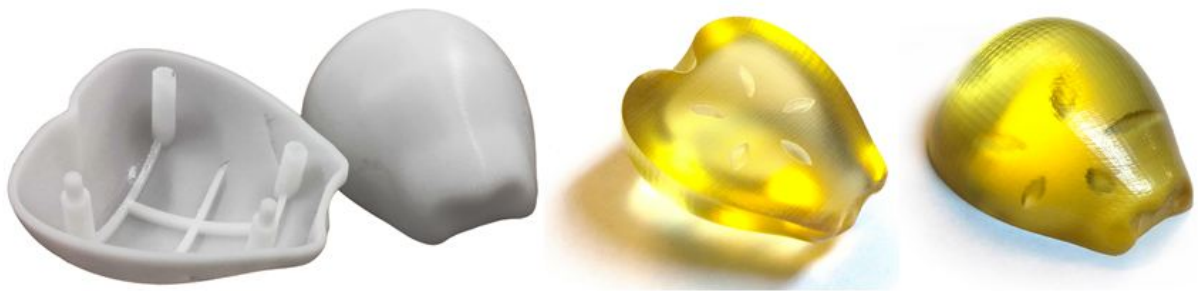
Le système PolyJet est un procédé largement employé qui combine les méthodes de photopolymérisation et de projection de liant. Il utilise des têtes d'impression pour projeter un photopolymère sur une surface, puis le durcit à l'aide d'une lampe UV. Toutes ces méthodes permettent d'imprimer en haute résolution des pièces possédant une excellente finition de surface et acceptables dans des produits du commerce.

En règle générale, la SLA ne nécessite pas de matériau de support ; pour les autres méthodes, les besoins varient en fonction de la géométrie de la pièce et sont plus importants dans le cas du procédé PolyJet. Le polymère liquide employé dans les procédés SLA et DLP peut être réutilisé tant qu'il n'est pas solidifié, mais pas indéfiniment. En revanche, les déchets du procédé PolyJet ne sont pas réutilisables ni recyclables, et les imprimantes actuelles en produisent beaucoup : 43 % du matériau consommé en moyenne, sans compter le matériau de support (Faludi et al., 2015a).

Les photopolymères utilisés actuellement dans l'impression 3D se caractérisent tous par une certaine toxicité sous leur forme liquide ; ils obtiennent souvent un score d'impact sur la santé de 2 sur 4 selon le système HMIS (*Hazardous Materials Identification System*) (3D Systems, 2012), qui est comparable à celui de nombreux polyépoxydes. En règle générale, ils ne sont toutefois plus considérés comme toxiques une fois solidifiés.

Les imprimantes utilisant la technologie de photopolymérisation peuvent créer plusieurs pièces à la fois, et la durée d'impression est plus liée à la hauteur de la pièce qu'à la quantité de matériau imprimée.

Graphique 5.2. **Pièces imprimées au moyen des procédés SLA (gauche) et PolyJet (droite)**



Source : Faludi, J. et al. (2015a), « Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs. traditional machining via life-cycle assessment », <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>.

Le frittage laser consiste à agglomérer de la poudre à des endroits particuliers en la chauffant au moyen d'un rayon laser. La plupart des imprimantes emploient le frittage sélectif par laser (SLS), la fusion sélective par laser (SLM) et le frittage laser direct de métal (DMLS). Dans ces procédés, de la poudre est étalée sur un lit, puis frittée ou fondue uniquement en des endroits particuliers à l'aide d'un rayon laser pour former la première strate de la pièce. Une nouvelle couche de poudre est ensuite étalée par voie mécanique puis fondue pour imprimer la strate suivante, et ainsi de suite. D'autres procédés de fusion laser projettent la poudre par une buse en la faisant fondre ; c'est le cas notamment de la technique de dépôt direct de métal (DMD) et de la construction laser additive directe (CLAD).

Les machines utilisant la fusion laser peuvent imprimer des thermoplastiques, des métaux, de la céramique et du verre. La matière plastique la plus courante est le nylon et les métaux les plus employés sont l'acier, l'aluminium et le titane ; des alliages exotiques de métal et de céramique sont parfois utilisés pour fabriquer des pièces destinées à l'industrie aérospatiale.

La poudre métallique ou plastique non fondue peut être réutilisée pour d'autres impressions entre cinq et dix fois environ (Slotwinski et al., 2014 ; Dotchev et Yusoff, 2009), même si on s'abstient souvent de le faire pour prévenir le risque d'altération de la qualité.

Des matériaux de support sont nécessaires non pour éviter l'affaissement des pièces, mais pour empêcher leur déformation. Après avoir été retirés, ces matériaux sont généralement mis en décharge lorsqu'il s'agit de plastiques ; les métaux sont en revanche souvent recyclés comme le seraient des résidus d'usinage.

Les imprimantes à frittage laser peuvent créer plusieurs pièces à la fois, et la durée d'impression est davantage liée à la hauteur de la pièce qu'à la quantité de matériau imprimée. Avec les imprimantes à fusion par laser, les délais de préchauffage et de refroidissement peuvent être longs, et beaucoup de temps peut également être nécessaire pour retirer les pièces, d'où l'intérêt d'imprimer par lots.

Graphique 5.3. **Sculpture métallique réalisée par frittage laser**



Source : Grossman, B. (2003), « Oldest news », www.bathsheba.com/artist/news_old_0.html (consulté le 1er mai 2015).

Le tableau 5.1 propose une vue synthétique des différentes technologies d'impression 3D abordées dans ce chapitre qui donne des informations sur leur fonctionnement et leur coût.

Tableau 5.1. **Technologies d'impression 3D : avantages et inconvénients**

Procédé	Technologie	Résolution d'impression	Matériaux utilisés	Coût	Potentiel en termes de durabilité environnementale	Impression par lots
Extrusion thermoplastique	FDM, FFF d'autres technologies d'extrusion similaire	Faible à moyenne	Le plus souvent ABS, PLA, PET, etc. D'autres extrudeurs peuvent utiliser des matériaux plus exotiques	Coût faible à moyen	Consommation d'énergie faible à élevée Peu de déchets si la géométrie de la pièce ne nécessite pas de matériau de support PET aisément recyclable PLA compostable dans des installations spécialisées ABS quelque peu toxique et non recyclé	Non
Projection de liant	Liant liquide sur lit de poudre	Haute résolution Impression possible de toutes les couleurs	Souvent du plâtre ou de la céramique Autres matériaux : sciure, béton, sel, amidon, sucre, etc.	Coût moyen à élevé	Peut être très économe en énergie en cas d'impression par lots Peu de déchets Matériaux verts possibles, mais pas encore employés dans les produits de consommation	Oui

Tableau 5.1. **Technologies d'impression 3D : avantages et inconvénients** (suite)

Procédé	Technologie	Résolution d'impression	Matériaux utilisés	Coût	Potentiel en termes de durabilité environnementale	Impression par lots
Photopolymérisation	SLA, CLIP, DLP, PolyJet	Haute résolution	Polymère liquide PolyJet peut imprimer plusieurs matériaux à la fois	Coût faible à élevé	Consommation d'énergie moyenne ; plus efficace en impression par lots Polymères liquides quelque peu toxiques, mais réutilisables (sauf dans PolyJet) Consommation de matériaux de support et production de déchets faibles le plus souvent, mais PolyJet produit beaucoup de déchets Polymères solidifiés non recyclables	Oui
Frittage ou fusion par laser	SLS, SLM, DMLS, DMD, CLAD	Haute résolution	Thermoplastiques, métaux, céramique, verre Plastique courant : nylon Métaux courants : acier, aluminium, titane	Coût élevé	Consommation d'énergie élevée ; plus efficace en impression par lots Poudre non utilisée en majeure partie réutilisable Matériaux de support généralement mis en décharge si en plastique, souvent recyclés si en métal	Oui

Source : Analyse des auteurs.

Évolution de la technologie d'impression 3D à brève échéance

Depuis dix ans, l'impression 3D s'est grandement améliorée sur plusieurs plans. Les indicateurs les plus importants comprennent la qualité d'impression, la taille des objets imprimés, la durée d'impression et le choix des matériaux. Cette section décrit les arbitrages liés aux technologies qui contribuent à déterminer les effets économiques et les conséquences environnementales de la large diffusion de l'impression 3D. Ces aspects devront être pris en compte en cas d'application à plus grande échelle des technologies 3D dans les prochaines décennies.

Arbitrage entre la qualité et la durée d'impression

Aujourd'hui, l'impression 3D est largement utilisée pour le prototypage, car les impressions de haute qualité restent onéreuses. La qualité d'impression s'est toutefois améliorée, et certains types d'imprimantes permettent déjà de fabriquer des pièces de produits finis acceptables à un coût moindre que d'autres méthodes de fabrication (couronnes dentaires obtenues par SLA, par exemple) (Bammani, Birajdar et Metan, 2012). La qualité d'impression est déterminée par la résolution, la tolérance, la solidité structurelle, la régularité de la finition, la stabilité dimensionnelle et d'autres facteurs. Elle peut aussi englober des facultés particulières, comme celle d'imprimer un même objet en plusieurs couleurs ou en plusieurs matériaux. En comparant les graphiques 5.2 et 5.3 au graphique 5.1, on constate que les pièces obtenues avec les procédés SLA, PolyJet et SLS offrent généralement une plus haute résolution et des surfaces plus lisses que celles fabriquées au moyen de la méthode FDM ou celles produites de façon expérimentale en sel par projection de liant.

L'amélioration de la résolution augmente souvent le temps nécessaire à la production et donc aussi le coût et la consommation d'énergie. Avec la technologie FDM, par exemple, doubler la résolution oblige à faire parcourir deux fois plus de strates à la tête d'impression, de sorte que la durée d'impression est multipliée *grosso modo* par deux. Avec la méthode SLA, la même démarche oblige à utiliser un polymère qui doit être exposé beaucoup plus longtemps au rayon UV pour durcir, ce qui allonge également la durée d'impression. Dans les deux cas, l'allongement de la durée augmente la consommation d'énergie, puisque

l'imprimante utilise la même quantité d'électricité beaucoup plus longtemps. Cependant, il n'en est pas toujours ainsi. Une imprimante DLP dont le projecteur permet une résolution deux fois plus importante ne consomme pas forcément beaucoup plus d'énergie qu'un modèle à plus faible résolution, car ce composant n'entre que pour une faible part dans la consommation d'électricité totale de la machine.

Arbitrage entre le coût et la durée d'impression

Le principal obstacle à des impressions 3D de haute qualité et peu coûteuses à grande échelle est le temps nécessaire au processus, qui reste long même s'il commence à diminuer. À l'heure actuelle, l'impression d'une pièce creuse de 5 cm x 5 cm x 2.5 cm comme celle représentée dans les graphiques 5.1 à 5.3, dont la masse est équivalente à celle d'une coque de téléphone mobile, peut prendre des heures, alors que le procédé de moulage par injection permet de la fabriquer en quelques secondes. Le secteur de l'impression 3D s'emploie à raccourcir ces durées, mais son principal marché reste celui des prototypeurs, pour qui la rapidité est appréciable mais pas indispensable. Avec la diffusion de l'impression 3D dans le secteur manufacturier, l'accélération des impressions est devenue prioritaire pour les constructeurs d'imprimantes.

Une solution consiste tout simplement à employer des versions plus grandes des imprimantes existantes, qui permettent d'imprimer plus de pièces à la fois. Mais il existe aussi des conceptions révolutionnaires, comme l'imprimante CLIP mise au point par Carbon3D, start-up de la Silicon Valley, qui est présentée par ses créateurs comme 25 à 100 fois plus rapide que les imprimantes 3D traditionnelles et capable d'imprimer la pièce creuse évoquée ci-dessus en quelques minutes au lieu de plusieurs heures. Cette accélération découle des caractéristiques chimiques de l'imprimante, qui permettent le durcissement en continu du photopolymère liquide pendant le déplacement de la plateforme, sans qu'il soit nécessaire de marquer une pause pour chaque strate comme avec toutes les autres imprimantes 3D (Rolland et Desimone, 2016). Pour sa part, la société 3D Systems affirmait en 2014 développer une imprimante 50 fois plus rapide que les modèles d'alors (McKenna, 2014), même si cette machine n'a toujours pas été présentée au moment où ces lignes sont imprimées. Toujours est-il que la tendance au raccourcissement des durées d'impression devrait faire considérablement baisser le coût de fabrication unitaire des pièces. Cependant, on ignore pour l'instant dans quelle mesure et à quel rythme les prix diminueront pour les clients, car le modèle économique de « l'appât et de l'hameçon » est répandu dans le secteur. Par exemple, même si l'imprimante Carbon3D accélère considérablement l'impression, le prix élevé du photopolymère qu'elle utilise pourrait empêcher une baisse vraiment importante du coût unitaire de fabrication des pièces.

Taille des objets imprimés

L'impression 3D évolue à la fois vers la fabrication d'objets très grands et d'objets très petits. Parmi les premiers, il y a des objets architecturaux comme la maison Canal House produite avec l'imprimante KameMaker aux Pays-Bas (Wainwright, 2014), les panneaux en béton imprimés par la société WinSun qui ont servi à construire un immeuble d'habitation de cinq étages en Chine (Starr, 2015) et la base lunaire qu'il est envisagé de créer à l'aide de la technologie Contour Crafting dans le cadre d'un partenariat entre l'Université de Californie à Los Angeles et la NASA (Khoshnevis et al., 2012). Dans le domaine automobile, Local Motors a créé un prototype de voiture électrique imprimée en 3D, la Strati (Davis, 2014). S'agissant des objets très petits, l'impression 3D aux échelles micro- et nanométrique a surtout consisté

à produire des matériaux possédant certaines propriétés micro- et nanométriques à grande échelle (Campbell et Ivanova, 2013), mais elle a aussi donné lieu à l'impression d'objets à ces mêmes échelles. Ainsi, une abeille robot pesant à peine plus de 90 milligrammes a été fabriquée grâce aux techniques des microsystèmes hybrides (Sreetharan et al., 2012), des diodes électroluminescentes quantiques ont été produites par impression 3D (Kong et al., 2014) et des batteries lithium-ion affichant une densité énergétique quasi inégalée ont été imprimées à l'échelle millimétrique (Sun et al., 2013).

Dans les années à venir, les imprimantes 3D permettront de produire des objets à bas coût en une large variété de tailles. Pour des raisons à la fois techniques et économiques, ces avancées concerneront sans doute davantage les grands objets que les petits. L'impression 3D à petite échelle est moins intéressante économiquement, car la fabrication à l'échelle nanométrique doit être une fabrication de masse pour être utile. Les puces informatiques contiennent souvent des milliards de transistors (Meindl, 2003) et des millions de nanotubes de carbone tiennent dans un centimètre cube (Andrews et al., 1999). Les imprimantes 3D devront devenir beaucoup plus rapides pour pouvoir rivaliser économiquement dans ce domaine (Li et al., 2011). Il existe aussi des limites technologiques : les lasers employés pour l'impression 3D à petite échelle sont incapables physiquement d'atteindre la résolution d'autres méthodes de nanofabrication (Li et al., 2011). Le fait de combiner des étapes de fabrication faisant appel à des méthodes traditionnelles et à l'impression 3D peut être porteur d'améliorations économiques et environnementales dans les processus de production électronique (Miettinen et al., 2008), mais il faudra probablement des décennies avant que l'impression 3D soit en mesure de se substituer pleinement à l'industrie des semi-conducteurs pour la fabrication de puces.

Graphique 5.4. **La voiture imprimée en 3D par Local Motors**



Photo ©Local Motors, Inc.

Sources : Davis, J. (2014), « This is the world's first 3D printed electric car », www.businessinsider.com/this-is-the-worlds-first-3d-printed-electric-car-2014-12#ixzz3QB6iqz5x (consulté le 15 janvier 2015) ; Local Motors, Inc.

Choix du matériau et matériaux multiples

L'éventail des matériaux utilisables en impression 3D s'étoffe rapidement, ce qui est propice à la diffusion de cette technologie sur un plus grand nombre de marchés. Les

imprimantes 3D peuvent être utilisées entre autres avec du plastique, des métaux, de la céramique, du papier et des aliments. Aujourd'hui, il est même possible d'imprimer en 3D des cellules humaines vivantes. Les matériaux peuvent en outre se présenter sous une multitude de formes : poudre, résine, pâte, fil, etc. Il existe des imprimantes FDM de bureau bon marché capables d'imprimer du plastique souple ou rigide, du plastique dont la couleur change en fonction de la température et du plastique intégrant des fibres de bois ou des nanotubes de carbone (Krassenstein, 2014).

La plupart des constructeurs d'imprimantes 3D ont opté pour le modèle économique de l'appât et de l'hameçon en vendant relativement cher des matériaux propriétaires. Cependant, de nouveaux matériaux sont régulièrement créés et partagés par les communautés *open source* et de hackers. Il existe ainsi des communautés en ligne où les utilisateurs d'imprimantes à projection de liant partagent des recettes de poudre ou de liant à confectionner soi-même (mélange de vodka et d'amidon, par exemple, ou de sciure).

Dans les années à venir, la plus importante avancée concernant les matériaux sera peut-être la mise au point d'imprimantes 3D capables d'imprimer des pièces en plusieurs matériaux ou dans un matériau unique dont les propriétés varient entre les différentes parties. Aujourd'hui, l'impression 3D ne permet pas de produire un téléphone mobile – elle permet seulement de fabriquer des composants simples comme le boîtier en plastique, qu'il faut ensuite assembler avec les éléments électroniques. Les seuls produits complets imprimables en 3D sont des objets simples sur le plan des matériaux, tels que des jouets en plastique ou des bijoux en métal. Pour tous les autres produits, seule une partie des composants peut être fabriquée ainsi. Cependant, la possibilité d'imprimer en plusieurs matériaux ouvre la voie à la production de pièces capables de fonctionner comme des assemblages de pièces. Des chercheurs ont réussi à imprimer des atèles antidouleur, des chaises longues à absorption de bruit et d'autres produits composés de plusieurs matériaux (Oxman, 2010), et on trouve déjà dans le commerce des imprimantes capables d'imprimer 14 matériaux à la fois (Stratasys, 2015). Toutefois, il faudra sans doute encore au moins une décennie avant d'arriver à imprimer un téléphone fonctionnel, ce qui tient à la fois aux limites propres des matériaux et à celles déjà évoquées concernant la taille des objets imprimés. Des machines multimatériaux capables d'imprimer des circuits à l'intérieur de pièces en plastique ont été testées avec succès (Silverbrook, 2004) et pourraient faire sous peu leur apparition sur le marché, ce qui permettrait de remplacer des assemblages de pièces par des pièces imprimées aux industriels.

L'impression combinée de matériaux dissemblables réduit fortement les possibilités de recyclage (Dahmus et Gutowski, 2007), ce qui pose un problème de durabilité environnementale. En revanche, en faisant varier les propriétés d'un même matériau à l'intérieur d'une pièce, il est possible de produire un objet qui est recyclable. Dans le même ordre d'idées, si les matériaux imprimés sont différents mais tous compostables, comme certains bioplastiques ou composites, il n'est pas nécessaire de les séparer (même s'il faut noter que le moulage par injection permet tout aussi bien de fondre ensemble deux plastiques compostables). À l'avenir, même les circuits pourraient être compostables, puisqu'il est déjà possible de rendre biodégradables des encres conductrices à base de carbone (Kilner, 1993). Cela vaut aussi pour l'incinération, qui permet une valorisation énergétique de plastiques mélangés.

Encadré 5.1. **Consommation d'énergie et impression**

L'évolution de la consommation d'énergie des imprimantes est difficile à prévoir, dans la mesure où l'énergie est trop peu chère pour avoir une influence déterminante sur le marché. Les imprimantes FDM de bureau consomment beaucoup moins d'énergie par pièce produite que les équivalents industriels (Faludi et al., 2014), mais leur qualité n'est pas à la hauteur des exigences de la production de masse. Une exploitation plus rationnelle des imprimantes – utilisation de machines SLA, SLS, PolyJet ou à projection de liant pour imprimer plusieurs pièces à la fois, ou de machines FDM pour imprimer des pièces creuses, par exemple – permet assurément de réduire l'énergie et le temps nécessaires pour produire une pièce (Baumers et al., 2013 ; Baumers et al., 2011b). Cela étant, une baisse de la durée d'impression n'est pas forcément un gage de diminution de la consommation d'énergie. Certes, l'imprimante Carbon3D annoncée récemment devrait être en mesure de produire des pièces entre 25 et 100 fois plus vite que les autres d'après ses concepteurs (Rolland et Desimone, 2016), moyennant une consommation de poudre probablement comparable à celle des imprimantes similaires (même si les données à ce sujet n'ont pas été publiées), et réduire ainsi radicalement la consommation d'énergie par pièce produite, mais d'autres nouvelles imprimantes à grande vitesse comme le système destiné au téléphone Ara de Google pourraient raccourcir les temps d'impression au prix d'une consommation d'électricité accrue.

Diffusion dans l'industrie

L'impression 3D fera son entrée dans bien des secteurs d'activité dans les prochaines années, mais elle sera limitée par une courbe de croissance hyperbolique : en l'occurrence, il lui sera facile de conquérir les marchés caractérisés par un nombre plutôt restreint de produits à coût moyen ou élevé, mais elle ne pourra pas prendre pied sur ceux où la production est abondante et à très bas coût. Elle aura donc plus d'impact dans certains secteurs, tandis que dans d'autres, elle influencera uniquement des start-ups et des groupes de petites entreprises pendant un certain temps. L'économie de l'impression 3D aura sans doute des conséquences sociales importantes dans les pays développés comme dans les pays en développement.

Priorité aux coûts ou priorité au volume

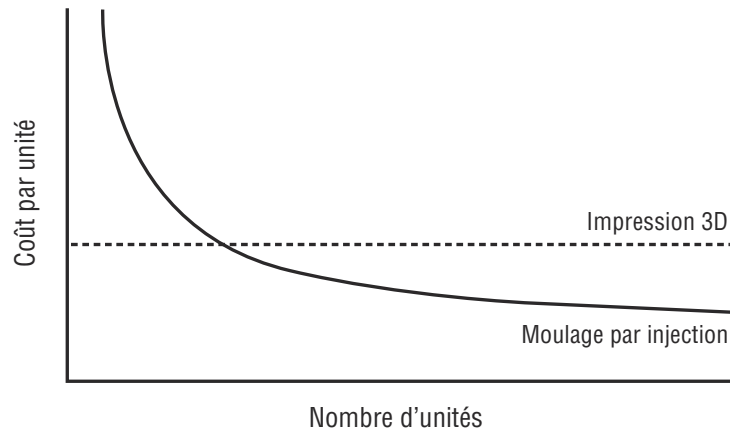
L'impression 3D coûte plus cher par unité produite que les méthodes de fabrication classiques, mais elle évite les coûts de configuration des machines entre deux lots de production différents, et c'est cet aspect qui peut faire pencher l'équation économique en sa faveur aux yeux des fabricants. Les coûts d'équipement sont très variables, mais aussi bien les machines à moulage par injection que les imprimantes 3D industrielles coûtent entre plusieurs dizaines de milliers et plusieurs centaines de milliers de dollars. En supposant que les coûts d'équipement sont amortis pour devenir *grosso modo* identiques, le passage du moulage par injection à l'impression 3D devient rentable lorsque l'augmentation du coût de production unitaire est compensée par les coûts de configuration évités, c'est-à-dire lorsque :

$$C_{3D} - C_{IM} < \frac{C}{N},$$

où N = nombre d'unités par lot, C = coût d'outillage/de configuration des machines pour la production d'un nouveau lot, C_{3D} = coût unitaire de la production de N unités par impression 3D et C_{IM} = coût unitaire de la production de N unités par moulage par injection

(Askin et Goldberg, 2007). Dans cette équation, les coûts liés à la chaîne d'approvisionnement (transport, logistique...), sur lesquels l'impression 3D permet également de réaliser des économies, peuvent être considérés comme comptabilisés dans les coûts de configuration par souci de simplification. À l'évidence, moins l'impression 3D est coûteuse, plus son marché potentiel est important, mais il s'agit d'une courbe hyperbolique et non linéaire, comme le montre le graphique 5.5.

Graphique 5.5. **Courbes des coûts généralisés de l'impression 3D et du moulage par injection**



Source : Calculs des auteurs.

Par exemple, en supposant que l'outillage et la configuration des machines de moulage par injection nécessaires pour produire la pomme en plastique représentée dans les graphiques 5.1 et 5.2 coûtent 10 000 EUR et que la fabrication par moulage par injection de chaque pièce revient à 0.50 EUR, la réalisation de cet objet par impression 3D à un prix unitaire de 5.50 EUR reste plus rentable (soit dix fois supérieur au prix unitaire) tant que la production n'atteint pas 2 000 unités. En revanche, à 100 000 unités produites, l'impression 3D reste compétitive face au moulage par injection, si son prix unitaire descend à 0.60 EUR. Et à 1 million d'unités, seul un prix unitaire de 0.51 EUR lui permet de rester rentable (soit seulement 1 centime de plus que le coût du moulage par injection).

Concrètement, dans l'industrie, les courbes des coûts se croisent à des niveaux de production plus ou moins élevés. Certains auteurs ont situé les points de croisement à quelques dizaines d'unités dans la production de pièces métalliques (White et Lynskey, 2013 ; Atzeni et Salmi, 2012) ou à quelques centaines dans celle de pièces en plastique (Bhasin et Bodla, 2014 ; Sculpteo, 2014). Conner et al. (2014) ont constaté que pour fabriquer des lots de moins de 10 000 exemplaires de certaines pièces en plastique, le frittage sélectif par laser pouvait d'ores et déjà coûter moins cher que le moulage par injection. L'impression 3D va donc poursuivre l'expansion rapide qu'elle a déjà amorcée dans le domaine de la production à petite échelle, mais elle aura beaucoup plus de mal à se faire une place dans la fabrication de masse tant que son coût n'aura pas baissé de façon spectaculaire.

D'après les estimations de Bhasin et Bodla (2014), ce coût diminuera d'environ un tiers d'ici à 2020, ce qui ne sera pas suffisant pour que le point de croisement des courbes de coûts s'approche du million d'unités. Selon les mêmes auteurs, bien que l'impression 3D puisse réduire radicalement les coûts de transport, de logistique, d'entreposage et autres

liés à la détention des produits, ceux-ci ne représentent qu'une faible proportion des coûts totaux de la plupart des produits, si bien qu'il n'en résultera pas une accélération significative de sa diffusion dans l'industrie. L'impression 3D ne remplacera donc sans doute pas le moulage par injection dans la fabrication en très grande série avant dix ou vingt ans, même si elle peut devenir la norme dans la production de pièces en petit nombre. Cet horizon pourrait être plus rapproché en cas de percées technologiques, mais pas de beaucoup étant donné l'inertie de l'industrie. En ce qui concerne l'impression sur papier, les imprimantes numériques 2D ont été commercialisées dès le début des années 80, mais il a fallu attendre le milieu de la décennie suivante pour qu'elles se généralisent, et le passage de la première utilisation à l'intégration complète dans les systèmes de production a pris cinq ans ou plus dans beaucoup d'entreprises (Parnell, 2007).

Cette évaluation prudente ne revient pas à sous-estimer la courbe de croissance de l'impression 3D ; beaucoup de secteurs produisent des pièces en quelques milliers d'exemplaires ou moins. Des secteurs de pointe comme les industries aérospatiale et de défense et les appareils médicaux produisent souvent des pièces à quelques centaines d'unités. Certaines sont d'ores et déjà fabriquées par impression 3D, car cela revient moins cher, comme indiqué dans l'introduction. L'impression 3D de produits individualisés fabriqués en grandes quantités comme certaines audioprothèses ou les couronnes dentaires coûte ainsi moins cher, dans la mesure où chaque exemplaire est différent malgré une production qui se chiffre en millions. Les prothèses médicales et les équipements sportifs de haut niveau pourraient bien devenir le prochain domaine de prédilection de l'impression en petites quantités.

D'autres secteurs restent pour l'instant à l'écart du développement de l'impression 3D, mais cela devrait changer dans les années à venir pour ceux qui fabriquent par exemple des jouets, des machines de précision, des produits optiques et différents biens de luxe. Dans les cinq à dix prochaines années, des meubles, des vêtements et des articles ménagers de créateurs pourraient être imprimés en 3D. Tous ces secteurs se caractérisent par ce que le McKinsey Global Institute (2012) appelle une « densité de valeur » et une « densité de main-d'œuvre » relativement fortes : autrement dit, leurs produits ont une valeur élevée rapportée à leur masse, et une part assez importante de leurs coûts de fabrication est imputable aux coûts de main-d'œuvre, que l'impression 3D permet de réduire ou d'éliminer. Le secteur des jouets est particulièrement susceptible d'être concerné, car son marché est très saisonnier et instable, avec régulièrement des produits qui connaissent un succès fulgurant difficilement prévisible.

L'impression 3D peut par ailleurs permettre de porter instantanément la production à un niveau élevé sans qu'il soit nécessaire au préalable de fabriquer des biens et de les conserver dans des entrepôts. Elle a en outre l'avantage d'éliminer les coûts qu'impose l'outillage de plusieurs chaînes de production au pied levé. L'évolution de la production de meubles et de vêtements est plus difficile à prévoir dans la mesure où la plupart des activités de recherche et développement consacrées aux imprimantes 3D ne sont pas tournées vers ces marchés. Dans l'industrie textile, on peut cependant citer l'exemple de la chaussure Flyknit de Nike, produite par un procédé de tricotage 3D commandé par ordinateur, qui se vend très bien (Townsend, 2012).

Priorité aux coûts ou priorité à la taille

La taille des produits restera un facteur limitatif. Il est plus rentable de fabriquer de petites pièces par impression 3D, car les principaux facteurs de coûts de cette technologie

sont la durée d'impression et la consommation de matériaux, qui sont toutes les deux liées à la taille des pièces fabriquées. Logiquement, le secteur de la joaillerie n'a donc pas tardé à s'intéresser à l'impression 3D, puisqu'il produit souvent en quantités très restreintes des articles au coût unitaire très élevé. À l'inverse, pendant encore au moins une décennie, il est peu probable que l'impression 3D contribue significativement dans la production de l'industrie automobile, qui utilise beaucoup de pièces de grandes dimensions fabriquées en grande quantité avec une marge faible ou moyenne. Cette hypothèse n'est cependant pas exclue : l'outillage automobile représente déjà quelque 18 % du marché de l'impression 3D, et des innovations comme la voiture Strati pourraient inciter le secteur à se tourner vers la production de pièces finies.

L'architecture est le domaine où le défi lié à la taille d'impression est le plus important, mais elle peut aussi constituer une opportunité en or pour l'impression 3D, puisqu'elle conçoit avant tout des produits sur mesure avec une forte intensité de main-d'œuvre. Comme indiqué plus haut, l'impression 3D y a déjà fait son entrée. Mais ces premiers efforts, quoique prometteurs, ne doivent pas faire oublier que le secteur de la construction est bien connu pour être prudent. Même s'il existait aujourd'hui des imprimantes 3D capables d'assurer indéniablement une production de meilleure qualité à un coût plus bas que les techniques de construction manuelle, il faudrait probablement encore une décennie avant que l'innovation conquière ce marché en l'absence d'incitations publiques. Et des incitations en ce sens susciteraient sans doute une opposition politique en raison des destructions d'emplois qui résulteraient d'une automatisation de la construction. À l'autre extrémité, les pièces électroniques très petites à circuits imprimés sont sans doute trop petites pour que l'impression 3D pénètre rapidement ce marché. Les circuits sophistiqués ont une densité de valeur plus élevée que les jouets ou l'habillement, mais leur fabrication restera hors de portée de l'impression 3D dans un avenir prévisible.

Encadré 5.2. Répercussions sociales dans les pays développés et en développement

Aux conséquences environnementales de l'impression 3D s'ajouteront des incidences sociales significatives. On assistera en particulier à une évolution du paysage des entreprises. L'accès aux imprimantes 3D peut être un instrument d'autonomisation pour les start-ups et les petites entreprises. Les pays développés pourraient connaître une « relocalisation » des productions, et les pays en développement, une progression de l'entrepreneuriat. Cependant, le recul de l'emploi dans l'industrie manufacturière s'en trouvera amplifié.

Dans tous les secteurs industriels, les start-ups commencent par produire des pièces en quelques milliers d'exemplaires ou dans des quantités moindres. La possibilité de produire de façon économique des pièces en petite série par impression 3D permettra à un plus grand nombre d'entreprises de se lancer avec moins de capitaux dans des activités manufacturières. Elle permettra aussi aux entreprises de toutes tailles de consacrer plus de temps à la mise au point des produits, en commençant par les fabriquer en petite série et en les améliorant ensuite à la lumière des réactions des clients avant de lancer la production à plus grande échelle. Alors que la tendance mondiale est au « morcellement de la demande », avec davantage de versions des produits et un raccourcissement de leurs cycles, cela représente une part de plus en plus importante des marchés (McKinsey Global Institute, 2012). Toutefois, cette évolution peut aussi avoir pour effet secondaire d'ouvrir la voie à davantage d'obsolescence programmée.

Encadré 5.2. Répercussions sociales dans les pays développés et en développement (suite)

L'un des inconvénients sociopolitiques de l'impression 3D est la disparition d'emplois qualifiés dans l'industrie manufacturière par l'automatisation. Ainsi, dans le cadre d'une expérience de l'Université de Californie à Berkeley (Faludi et al., 2014), la création d'un prototype à l'aide d'une fraiseuse à commande numérique hautement automatisée a pris plusieurs heures à un opérateur qualifié, mais sa production par impression 3D n'a nécessité que quelques clics de souris. L'évolution qui se dessine sera probablement semblable à la transformation du secteur de l'imprimerie dans les années 90, qui a vu beaucoup de destructions d'emplois, mais aussi l'apparition d'emplois nouveaux. Comme le note Parnell (2007), « les logiciels de mise en page ont inévitablement entraîné une déqualification des tâches, mais les qualifications d'origine, acquises et appliquées par les travailleurs au fil de nombreuses années d'évolution rapide des technologies, sont demeurées pertinentes, et l'acquisition de nouvelles compétences liée à l'informatisation a été jugée favorablement ». On ignore combien d'emplois disparaîtront ou changeront dans le cadre de la transition de la fabrication vers l'impression 3D.

La baisse des coûts de main-d'œuvre permise par l'impression 3D peut avoir pour avantage de susciter une « relocalisation » de la fabrication, c'est-à-dire le retour dans les pays à salaires élevés d'activités qui avaient été délocalisées dans des pays à bas salaires (Tavassoli, 2013). L'ampleur de ce phénomène est difficile à prédire, mais il suivra sans doute la courbe de croissance déjà évoquée : il concernera d'abord les produits à forte marge fabriqués en petite série, et ensuite les produits à plus bas coût fabriqués en quantité plus importante. Il faut cependant garder à l'esprit que l'impression 3D sert généralement à produire des pièces et non des produits entiers, et que cela ne changera qu'avec la mise au point de procédés d'impression multimatériaux beaucoup plus sophistiqués qu'aujourd'hui (ce qui prendra de nombreuses années). Les produits devront donc toujours être assemblés quelque part, ce qui pourrait limiter l'ampleur du phénomène de relocalisation. Il n'en reste pas moins que des gains importants sont possibles, puisque l'impression 3D permet de fabriquer des pièces complexes qui devaient auparavant être assemblées, d'où un besoin moindre en main-d'œuvre pour les tâches d'assemblage.

Certains ont qualifié l'impression 3D d'aubaine pour les pays en développement (Birtchnell et Hoyle, 2014), en raison des possibilités qu'elle offre de s'affranchir des chaînes d'approvisionnement et donc de régler les problèmes de distribution dans les pays aux infrastructures modestes. Cette vision optimiste fait peu de cas des répercussions économiques qu'aurait sur ces pays une relocalisation de la production vers les nations développées, mais il est vrai que ses promoteurs se sont généralement focalisés sur les régions les plus rurales où vivent les populations les plus démunies, qui ne sont pas concernées par les productions délocalisées. Ceux-ci oublient en outre que la plupart des imprimantes d'aujourd'hui permettent de fabriquer des pièces mais non des produits entiers, et surtout que des chaînes d'approvisionnement sont nécessaires pour l'entretien et la réparation des imprimantes elles-mêmes et des ordinateurs qui servent à modéliser les objets imprimés. Si un village n'a pas de chaîne d'approvisionnement pour une simple pièce en plastique, comment pourrait-il en avoir pour une carte mère d'ordinateur ? Depuis les années 70 et 80, beaucoup de projets d'électrification solaire lancés avec les meilleures intentions dans les pays en développement ont échoué en raison de l'impossibilité de réparer la moindre pièce tombée en panne (Dichter, 2003). Comme l'admettent Birtchnell et Hoyle, l'impression 3D au service du développement ne verra pas le jour avant au moins dix ans, car cela nécessite qu'elle soit tout à la fois abordable, « flexible » (réparable et modernisable), simple, adaptable en dimension et de qualité

Encadré 5.2. Répercussions sociales dans les pays développés et en développement (suite)

suffisante pour être réellement utile (Birtchnell et Hoyle, 2014). D'un point de vue démographique, la conception au service du développement est généralement tournée vers la « base de la pyramide », à savoir un très grand nombre de personnes avec très peu de moyens financiers. Comme le montre la courbe des coûts décrite plus haut, on est là aux antipodes des avantages de l'impression 3D.

Néanmoins, l'impression 3D pourrait s'avérer plutôt bénéfique pour le développement selon différents scénarios dans les grandes villes des pays pauvres. Les pays en développement ont sauté le stade de la téléphonie fixe pour passer directement à la téléphonie mobile, qui procure d'énormes avantages économiques et sociaux à des millions de personnes ; un phénomène similaire pourrait conduire à l'émergence de petits fabricants urbains. Pour les pays en développement, le principal avantage est probablement le même que pour les pays développés : permettre à des start-ups et des petites entreprises ayant peu de capitaux de se lancer dans la fabrication à petite échelle, et utiliser ensuite les revenus pour financer le développement vers une production en grande série. Au lieu de prendre la place des réseaux de fabrication et de distribution centralisés, l'impression 3D pourrait se substituer aux capital-risqueurs. Ensuite, lorsque la production atteint l'échelle des méthodes de fabrication classiques, les entrepreneurs peuvent produire des produits pour un grand nombre de personnes démunies et appuyer le développement économique à grande échelle. L'impression 3D aura en plus l'avantage d'aider les start-ups des pays en développement à contourner les obstacles liés au déficit d'infrastructures pour les chaînes d'approvisionnement jusqu'à ce que leur croissance leur permette de se payer leurs propres infrastructures. Mais comme l'imprimante 3D a elle-même besoin d'une infrastructure et d'une chaîne d'approvisionnement, elle paraît plus utile comme un tremplin que comme une finalité en soi. À l'avenir, des études devraient examiner ces scénarios par comparaison avec la fabrication rurale.

Incidences environnementales probables d'une large diffusion de l'impression 3D

Le recours à l'impression 3D à grande échelle ne provoquera pas de façon uniforme une augmentation ou une diminution des incidences environnementales des activités de fabrication. Les effets dépendront des articles fabriqués. La plupart des produits sont constitués de plusieurs pièces fabriquées selon différentes méthodes : moulage, estampage et cintrage, extrusion, soudage, etc. Ces technologies ont des incidences variées, qui dépendent dans une large mesure des pièces qu'elles servent à fabriquer. Pour prévoir avec précision les conséquences environnementales de leur remplacement par l'impression 3D, il faudrait donc comparer cette dernière à la séquence de méthodes qu'elle remplace dans la production de chacun des types de produits et matériaux concernés. C'est ce que recommandait d'ailleurs la RAM en 2009 (Bourell, Leu et Rosen, 2009), mais peu d'études ont été publiées depuis lors. Dans ce chapitre, nous comparerons l'impression 3D à seulement deux autres méthodes : l'usinage et le moulage par injection.

Le bilan des avantages de l'impression 3D par rapport à l'usinage et au moulage par injection ne se prête pas à des généralisations. Les incidences environnementales varient considérablement en fonction de plusieurs facteurs : le type d'imprimante, la géométrie des pièces fabriquées, le taux d'utilisation de la machine (temps morts et exploitation optimale du lit pour de nombreux types d'imprimantes), la configuration de l'impression

et les matériaux. Cela étant, pour fabriquer une pièce creuse en plastique ou en métal « typique », l'impression 3D a généralement un impact environnemental par pièce moindre que l'usinage, mais plus élevé que le moulage par injection dans le cadre d'une production à grande échelle. Les plus fortes incidences environnementales découlent de la consommation d'énergie et de matières, même si cela varie en fonction de l'imprimante, du choix des matériaux et du scénario d'utilisation. En outre, la technologie évolue rapidement, si bien que certains systèmes aujourd'hui au stade expérimental pourraient avoir un impact nettement moindre que d'autres méthodes de fabrication, mais cette hypothèse doit être validée par des études plus poussées.

L'impression 3D comparée à l'usinage classique

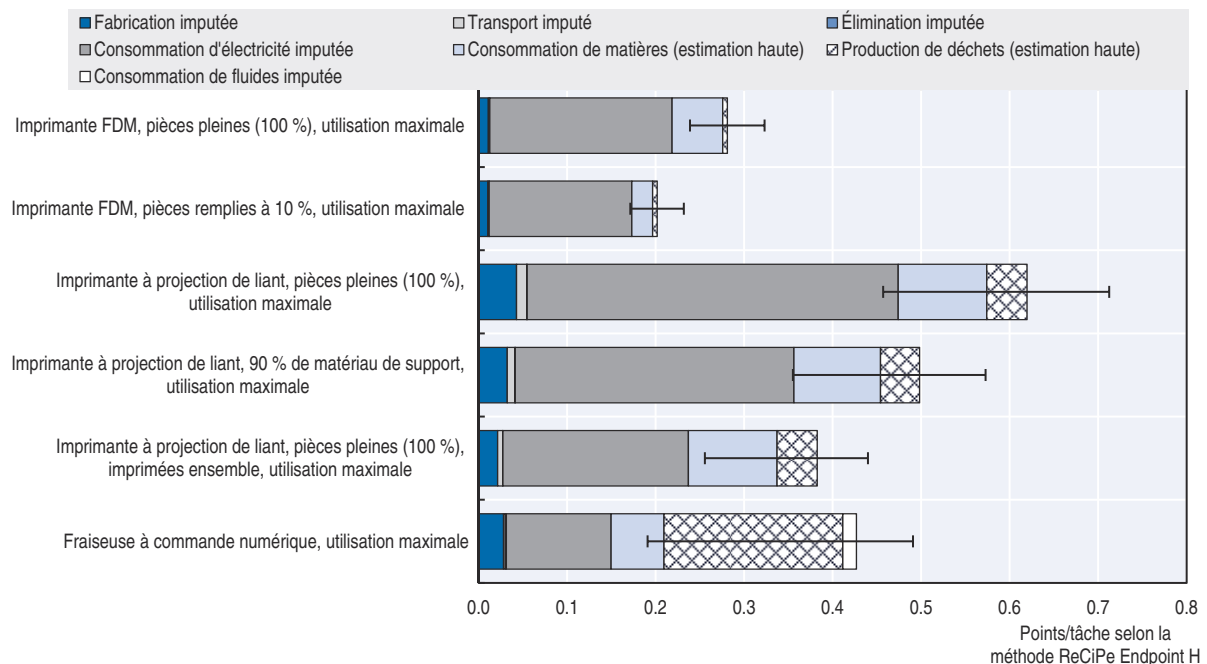
Dans les cinq à dix prochaines années, l'impression 3D supplantera probablement l'usinage dans bon nombre de ses applications (et peut-être même dans la plupart d'entre elles), mais cela ne devrait pas modifier dans des proportions importantes l'impact environnemental de l'industrie manufacturière dans le monde, car l'usinage représente une niche. L'usinage est le principal procédé mis en œuvre pour créer des prototypes ou produire en série limitée des pièces individualisées à la géométrie complexe. L'impression 3D a déjà commencé à chambouler ces marchés pour les pièces en plastique et en métal. Pour les pièces en plastique, on recourt aux technologies FDM, SLA et SLS pour produire des prototypes et des pièces en petite série ; pour les pièces en métal, elles sont imprimées notamment au moyen des procédés DMLS, SLM, DMD ou CLAD. La société Boeing a déjà abandonné l'usinage au profit de l'impression 3D pour produire plus de 20 000 exemplaires de 300 types de pièces (Davidson, 2012). Cela étant, l'usinage ne représente qu'une petite niche : d'après les statistiques du Bureau of Economic Analysis des États-Unis, les éléments issus d'usinage constitue moins de 1 % dans le chiffre d'affaires total de l'industrie manufacturière (BEA, 2014)¹. Ainsi, même si le remplacement de l'usinage par l'impression 3D se traduit par des améliorations spectaculaires sur le plan environnemental, il n'en résultera pas une baisse notable de l'impact environnemental de l'industrie manufacturière au niveau mondial.

En général, l'impression 3D a moins d'incidences environnementales par unité produite que l'usinage, mais il existe de nombreuses exceptions : ainsi, le recours à l'usinage est plus efficace pour certaines géométries de pièces, les incidences environnementales par pièce produite peuvent être très variables selon les imprimantes, et une même imprimante peut avoir des incidences très différentes en fonction de différents facteurs. À propos des pièces en plastique, deux études (Faludi et al., 2015a ; Faludi et al., 2014) ont montré que des différences dans l'utilisation d'une imprimante faisaient davantage varier les incidences que le passage de l'usinage à l'impression 3D ou vice versa. Les machines qui multiplient les temps morts ont un impact bien plus grand par pièce produite que celles qui fabriquent des pièces 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, et ce qu'il s'agisse d'imprimantes 3D ou de machines à fraiser. La première des priorités dans un souci de durabilité environnementale de l'impression 3D est donc de maximiser l'utilisation des machines. Il ressort des mêmes études que certaines imprimantes ont davantage d'incidences que d'autres par pièce produite parce qu'elles consomment plus d'énergie, produisent plus de déchets ou font appel à des matériaux plus toxiques. Enfin, les deux études montrent que la production de pièces évidées a moins de répercussions sur l'environnement que la production de pièces pleines si on recourt à l'impression 3D, mais plus si on utilise l'usinage. Ainsi, la fabrication par usinage de certaines géométries


de pièces pleines a moins d'impact que leur fabrication par impression 3D, même si cette dernière est plus respectueuse de l'environnement pour d'autres pièces.

À titre d'illustration, les graphiques 5.6 et 5.7, qui sont tirés des deux études mentionnées ci-dessus, comparent les ACV d'une fraiseuse à commande numérique et de plusieurs imprimantes 3D, fonctionnant toutes 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 pour produire des pièces. Les ACV reposent sur la méthode ReCiPe Endpoint H (Goedkoop et al., 2009), qui attribue un score d'impact environnemental global unique calculé à partir de 17 types d'incidences (changement climatique, acidification, eutrophisation, pollution particulaire, épuisement des réserves en énergies fossiles, épuisement des ressources minérales, toxicité pour l'homme, etc.). Les impacts peuvent être regroupés par étape du cycle de vie: la fabrication, le transport et l'élimination de l'imprimante ou de la fraiseuse (la consommation d'électricité au cours de la fabrication et à l'arrêt ; les matériaux contenus dans les pièces produites ; les matériaux mis au rebut (matériau du modèle ou matériau de support) ; ainsi que le fluide de coupe et le lubrifiant de la fraiseuse.

Graphique 5.6. Impact environnemental d'une fraiseuse à commande numérique et de deux imprimantes 3D exploitées sans temps mort pour fabriquer des pièces pleines



Source : Faludi, J. et al. (2015a), « Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs. traditional machining via life-cycle assessment », <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>.

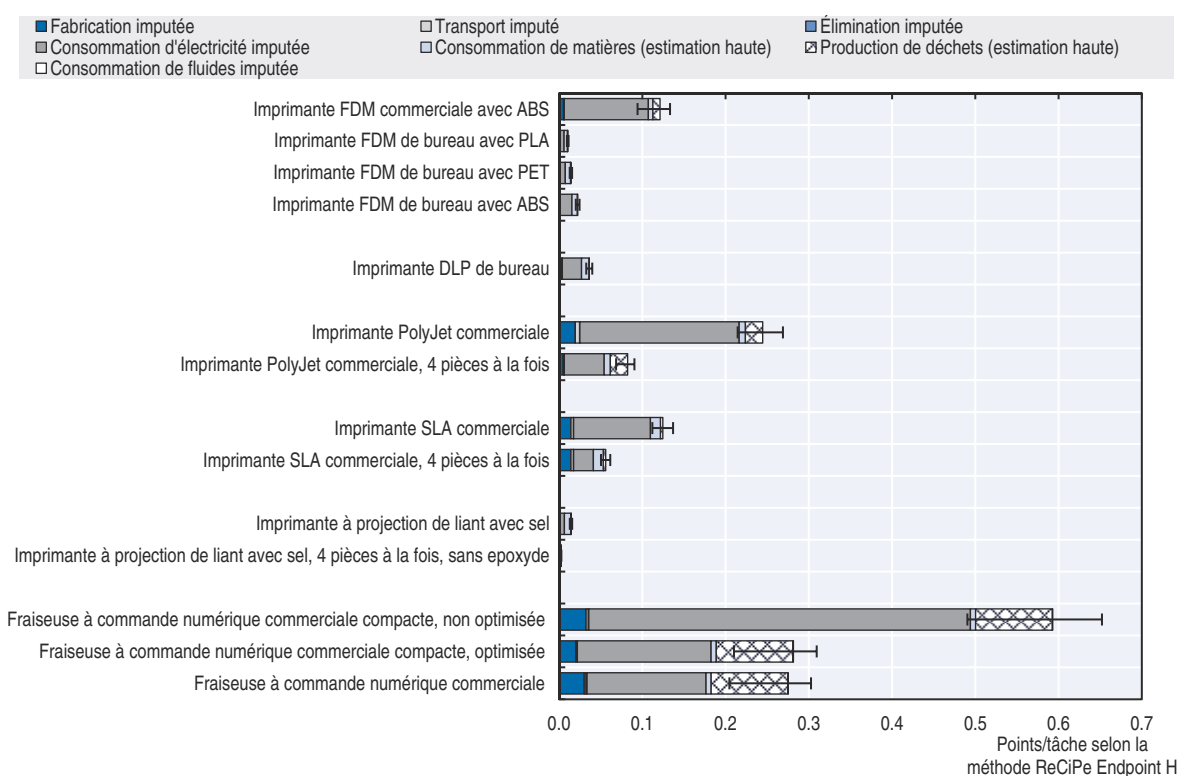
StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679830>

Le graphique 5.6 compare les incidences de la fabrication de pièces en plastique pleines au moyen de différentes machines : une fraiseuse à commande numérique, une imprimante FDM commerciale (deux scénarios différents) et une imprimante PolyJet (trois scénarios différents). Les résultats de la fraiseuse à commande numérique sont meilleurs que ceux de l'imprimante PolyJet dans deux des trois scénarios, et dans la marge d'erreur de ceux de l'imprimante FDM commerciale. Le graphique 5.7, pour sa part, compare la fabrication de pièces creuses au moyen de deux fraiseuses à commande numérique et de huit imprimantes 3D (11 scénarios). Dans ce cas de figure, les fraiseuses affichent systématiquement des

incidences environnementales plus fortes que les imprimantes 3D (même si les résultats se situent parfois dans la marge d'erreur). Le graphique 5.7 est plus représentatif des pièces en plastique qui entrent le plus souvent dans les produits de consommation, comme les boîtiers de téléphone, même si quelques catégories de produits sont en plastique plein.

Il ressort aussi des graphiques 5.6 et 5.7 que l'impact est très différent d'une imprimante et d'un scénario à l'autre. Certaines imprimantes ont des répercussions bien moindres que d'autres par pièce produite, et les incidences varient en fonction du type de pièce et de l'utilisation de la machine. Les responsables de l'action gouvernementale doivent garder à l'esprit qu'il s'agit d'un domaine complexe. Par exemple, si l'impression en sel par projection de liant affiche les plus faibles incidences de toutes les méthodes analysées, avec un impact réduit de 90 % par rapport à l'usinage, l'impression PolyJet est parfois moins respectueuse de l'environnement que l'usinage. Malheureusement, certaines des machines qui ont le moins de répercussions environnementales, comme l'imprimante FDM de bureau, sont aussi celles dont la qualité des produits laisse le plus à désirer. À l'inverse, certaines machines permettant d'obtenir la meilleure qualité d'impression sont parmi les plus dommageables pour l'environnement.

Graphique 5.7. Impact environnemental de deux fraiseuses à commande numérique et de huit imprimantes 3D exploitées sans temps mort pour fabriquer des pièces creuses



Sources : Faludi, J. et al. (2015a), « Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs. traditional machining via life-cycle assessment », <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067> ; Faludi, J et al. (2015b), « Does material choice drive sustainability of 3D printing? », <https://waset.org/Publication/does-material-choice-drive-sustainability-of-3d-printing-/10000327>.

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933679849>

Les deux graphiques ci-dessus montrent que les incidences environnementales de l'impression 3D sont largement dominées par la consommation d'énergie durant l'impression. Dans le cas des fraiseuses à commande numérique, en revanche, les déchets jouent un rôle important et parfois prépondérant dans l'impact environnemental. Ainsi, le

passage de l'usinage à l'impression réduit les répercussions de la fabrication en termes de déchets, mais pas forcément sur le plan de la consommation d'énergie. Les impacts énergétiques peuvent même l'emporter sur les gains découlant de la production moindre de déchets. Les incidences liées à la fabrication des imprimantes ou fraiseuses elles-mêmes, quel que soit le modèle, sont insignifiantes dans le cadre d'une production 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, mais il n'en va pas de même lorsqu'il y a beaucoup de temps morts dans l'utilisation des machines (cas de figure non représenté dans les graphiques, mais analysé dans les études citées) (Faludi et al., 2014 ; Faludi et al., 2015b).

Ainsi que l'ont confirmé d'autres études, la consommation d'énergie par pièce produite varie fortement entre les types d'imprimantes et les scénarios, y compris entre les imprimantes métal comme les machines SLS, DMLS, SLM, CLAD, etc. ; ces études confirment également que si l'impression 3D consomme souvent moins d'énergie par pièce que l'usinage, elle peut dans certaines conditions en consommer plus (Yoon et al., 2014 ; Serres et al., 2011 ; Morrow et al., 2007). Un taux d'utilisation élevé peut primordial pour les imprimantes métal. Comme l'ont montré Baumers et al., la consommation d'énergie lors du frittage laser dépend de la tâche, de la durée, de la géométrie et de la hauteur Z (Baumers et al., 2011a), et un fort taux d'utilisation abaisse la consommation d'énergie par pièce produite dans des proportions allant de quelques pour cent à 98 % selon le type d'imprimante (Baumers et al., 2011b).

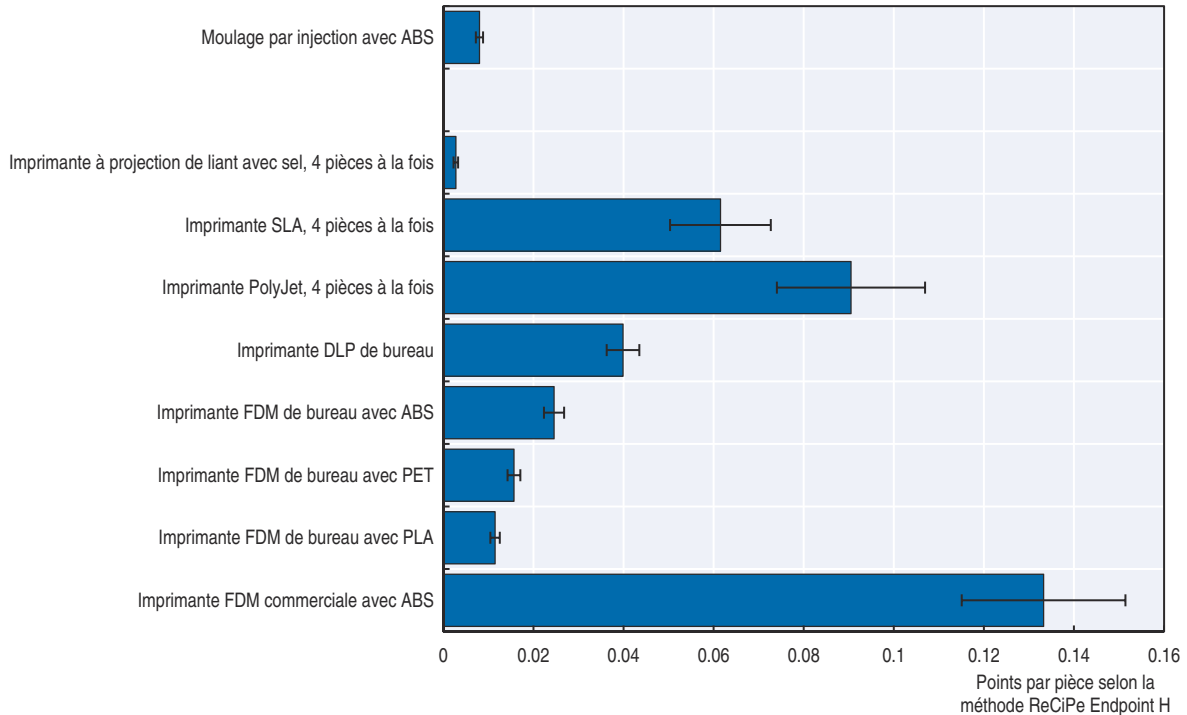
L'impression 3D comparée au moulage par injection

Le moulage par injection est la méthode la plus employée pour fabriquer les pièces en plastique des biens de consommation. Si elle devait être remplacée à grande échelle par l'impression 3D, les incidences environnementales de la fabrication pourraient s'en trouver sensiblement modifiées. À titre d'exemple, le graphique 5.8 compare l'impact sur l'environnement du moulage par injection (à partir des données d'ACV standard) à celui de différentes technologies d'impression 3D (sur la base des données empiriques des graphiques 5.6 et 5.7). Au lieu de ventiler le score des imprimantes et matériaux par type d'impact (énergie, déchets, etc.), il montre seulement l'impact global.

Dans le graphique 5.8, on voit que le moulage par injection a moins d'incidences environnementales par pièce fabriquée que toutes les technologies d'impression 3D largement employées aujourd'hui dans le cadre d'une production en grande série. Ses incidences fixes, comme celles liées à la création des outils et au délai de configuration, sont amorties sur les centaines de milliers ou millions de pièces produites. L'emploi d'une imprimante FDM de bureau avec du plastique PLA a un impact 20 % plus élevé que le moulage par injection d'ABS (même si cet écart entre presque dans les marges d'incertitude), tandis que le recours à une imprimante FDM commerciale avec de l'ABS décuple presque dix fois l'impact. Ce constat ne vaut pas pour la production en petite série, de l'ordre de quelques centaines de pièces (Telenko et Seepersad, 2012) ; à cette échelle-là, l'impression 3D peut être préférable à la fois économiquement et écologiquement. Ces résultats ne tiennent pas compte de l'augmentation de l'exposition des personnes aux particules toxiques dans les bureaux ou les habitations où sont installées les imprimantes 3D, qui ne sont pas soumis à des mesures de protection comme les milieux industriels (Stephens et al., 2013). Certaines recherches ont montré que l'utilisation d'imprimantes 3D alimentées par des panneaux solaires ou avec du PLA pouvait avoir moins d'impact que le moulage par injection d'ABS (Kreiger et Pearce, 2013), mais ces calculs ne tiennent pas forcément compte de tous les éléments, car les machines à


moulage par injection peuvent être alimentées par des panneaux solaires et employer du PLA tout aussi facilement que les imprimantes 3D, leur impact en est ainsi abaissé dans des proportions similaires.

Graphique 5.8. **Impact environnemental par pièce fabriquée du moulage par injection et de diverses imprimantes 3D exploitées sans temps mort**



Note : La ligne horizontale noire sur chaque barre représente la marge d'erreur.

Source : Calculs des auteurs.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679868>

Dans le graphique ci-dessus, la seule technologie qui a moins d'impact que le moulage par injection est la projection de liant employée avec du sel. C'est un procédé peu consommateur d'énergie qui agglomère le matériau par voie chimique plutôt que par fusion. Le sel est un matériau expérimental et les pièces qu'il permet d'obtenir ne sont pas aujourd'hui au niveau des pièces moulées par injection en termes de résolution et de finition des surfaces. Toutefois, l'impact par pièce produite est inférieur de près de 70 %. Un compromis entre cette méthode et des technologies plus conventionnelles pourrait permettre une amélioration des caractéristiques environnementales par rapport au moulage par injection.

La projection de liant est une méthode bien établie. Vu son succès commercial, de nouvelles activités de recherche et développement devraient y être consacrées pour améliorer la qualité d'impression sans altérer ses performances environnementales. Ses frais de fonctionnement sont faibles, car elle ne nécessite pas d'acheter des consommables coûteux auprès du fabricant de l'imprimante, la poudre et le liquide pouvant être préparés selon des recettes librement accessibles à partir de produits courants et peu onéreux (sel fin, maltodextrine, isopropanol, eau...). Si la préparation des ingrédients nécessite certaines compétences au niveau individuel, dans le cadre d'une production à grande échelle, les matériaux seraient bon marché et pas plus chers que les granulés plastiques utilisés dans le moulage par injection.

Incidences en termes d'émissions de gaz à effet de serre

Si l'impression 3D venait à se substituer largement au moulage par injection, cela pourrait accroître ou au contraire abaisser notablement les émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial. L'évolution serait sans doute progressive. En revanche, la contribution à l'appauvrissement des ressources de la planète varierait probablement peu, même à long terme.

L'industrie est à l'origine d'environ 29 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, les autres principales sources étant les bâtiments, les transports et l'agriculture (Ecofys, 2013). Il est difficile de trouver des statistiques sur la part de ces émissions imputable aux matières plastiques moulées par injection, mais la comparaison des données d'ACV tirées de deux études (Hendrickson et al., 1998 ; Bjorn et MacLean, 2003) tend à indiquer qu'elle pourrait être de l'ordre de 0.5 à 2 %. Une réduction de 70 % de cette fraction des émissions constituerait donc une amélioration non négligeable, mais sa multiplication par dix représenterait un grave problème. Cependant, même si elles sont amples, il y a fort à parier que les conséquences mondiales de l'abandon du moulage par injection au profit de l'impression 3D interviendront lentement. Comme on l'a vu, étant donné sa courbe des coûts, l'impression 3D remplacera le moulage par injection seulement pour les productions en petite série dans les prochaines années, et elle gagnera peu à peu du terrain avec une baisse des coûts et de l'amélioration de la qualité. En revanche, il lui sera beaucoup plus difficile de s'imposer dans la fabrication en grande série de produits à bas coût, et une telle évolution n'interviendra d'ailleurs pas avant de nombreuses années.

Concernant l'appauvrissement des ressources, le moulage par injection consomme quelque 39 millions de tonnes de plastique par an dans le monde (Thiriez et Gutowski, 2006). On ignore quelle proportion de l'extraction de matières cela représente au niveau mondial, mais on sait que les produits pétroliers entrent pour moins de 5 % de la masse de l'extraction de matières aux États-Unis (Matos, 2012) et que moins de 3 % de ces produits sont utilisés pour la fabrication de plastique (US EIA, 2014) ; par conséquent, la consommation totale de matières plastiques (moulage par injection compris) représente peut-être 0.1 % de la consommation totale de la masse de matières. Sachant que la différence de matériaux entre l'impression 3D et le moulage par injection peut être multipliée par dix, le passage à l'impression 3D n'est guère susceptible d'avoir de fortes incidences à l'échelle mondiale.

Potentiel en matière de durabilité environnementale

La généralisation de l'impression 3D peut avoir de nombreuses retombées bénéfiques sur l'environnement, mais probablement pas celles qui sont le plus souvent avancées aujourd'hui. Deux idées fausses très répandues sont que l'impression 3D est virtuellement à même d'éliminer les externalités négatives associées au transport et aux déchets, et qu'elle est susceptible de réduire les taux de recyclage du plastique. En réalité, l'impression 3D a plutôt pour conséquences d'aligner les incitations économiques sur les incidences environnementales, de permettre une production au plus juste, d'élargir la palette des matériaux utilisables et de rendre l'utilisation de certains produits plus économe en énergie. Elle peut également être plus proche des processus naturels en faisant appel à des biopolymères compostables pour apporter des solutions au problème des déchets. Enfin, elle peut aussi être bénéfique pour la société en donnant accès aux moyens de production à un plus grand nombre.

Idées fausses au sujet des avantages environnementaux de l'impression 3D

Une idée fausse très répandue veut que l'impression 3D réduise les externalités liées au transport des biens en transférant la fabrication des usines centralisées vers des usines régionales ou même les logements des consommateurs. La réalité est différente – et même si elle était conforme à cette idée, le bénéfice environnemental cumulé ne serait pas important. Cette idée est erronée parce que les imprimantes 3D d'aujourd'hui peuvent fabriquer seulement des pièces et non des produits complets, si ce n'est des produits extrêmement simples. La plupart des produits doivent toujours être assemblés dans des usines, à partir de pièces qui sont pour certaines imprimables et pour d'autres non, puis livrés aux clients. Même lorsque les produits sont fabriqués intégralement sur place par impression 3D et que des imprimantes multimatériaux permettent de fabriquer des produits entiers et pas seulement des pièces, les matières premières nécessaires au fonctionnement des imprimantes doivent être transportées. Cela étant, l'impression 3D pourrait effectivement réduire les besoins en transport des entreprises qui vendent de nombreux produits différents faits dans le même matériau. Par exemple, une concession automobile peut réduire radicalement l'impact de ces besoins si, au lieu de se faire livrer et d'entreposer 500 pièces détachées fabriquées dans le même alliage d'acier, elle peut se contenter de stocker la poudre d'alliage qui lui permet d'imprimer les pièces à la demande. Les entreprises d'ameublement pourraient réduire les coûts liés au transport de produits encombrants dont le volume est en grande partie vide en expédiant à la place du bois composite sous forme compacte.

Cependant, même en cas de forte baisse des activités de transport, l'impact est généralement faible rapporté aux incidences de la fabrication. Comme l'ont montré plusieurs études (Hanssen, 1998 ; Hunter, 2013 ; Apple, 2014), pour la plupart des produits de consommation (électronique, ameublement, pièces automobiles, articles de ménage, habillement, etc.), le transport ne représente qu'une faible proportion des incidences environnementales occasionnées sur l'ensemble du cycle de vie. Même si l'impression 3D supprimait entièrement les externalités liées au transport par l'approvisionnement en matériaux locaux à l'échelle moléculaire (Stephenson, 2003), cela n'aurait guère d'importance pour la plupart des produits. Sauf exception, les incidences environnementales engendrées par la fabrication des produits et par leur consommation d'énergie durant leur durée de vie utile sont nettement plus fortes, et ce sont donc ces aspects-là qui doivent être prioritaires pour les responsables de l'élaboration des politiques.

Une autre idée fausse souvent entendue veut que l'impression 3D soit automatiquement plus respectueuse de l'environnement parce qu'elle « supprime les déchets » au niveau du produit final comme à celui des matériaux mis en œuvre. Il existe effectivement certains types d'imprimantes 3D capables de fabriquer des pièces en ne produisant quasiment pas de déchets. Ainsi, dans le cas d'une imprimante FDM fonctionnant sans matériau de support, les déchets peuvent représenter moins d'un pour cent de la masse des pièces fabriquées. La stéréolithographie et la projection de liant peuvent également permettre une production de déchets négligeable. À l'inverse, la fabrication de pièces allongées avec des bords instables importants peut nécessiter plus de matériau de support que de matériau d'impression à proprement parler (taux de déchets supérieur à 50 %). La plupart des impressions 3D se situent entre ces deux extrêmes et nécessitent plus ou moins de matériaux de support.

Cependant, ces matériaux ne sont pas les seuls déchets ; il en existe d'autres qui varient en fonction du type d'imprimante. Dans les imprimantes PolyJet, 43 % du polymère liquide

employé aussi bien dans le matériau de support que dans le matériau d'impression est perdu ; dans le cas d'une impression qui nécessite la même quantité des deux, le taux de déchets atteint donc 65 % (soit près de deux tiers de la consommation totale de matériau). En outre, le matériau d'impression liquide des imprimantes PolyJet est plus toxique à masse égale que les plastiques généralement utilisés dans les procédés de moulage par injection, comme le PET ou l'ABS. En ce qui concerne le frittage plastique, jusqu'à 44 % du matériau mis en œuvre dans le procédé SLS peut être perdu d'après les calculs de Telenko et Seepersad (2012). S'agissant du frittage métal, Kellens et al. (2012) indiquent que la poudre non utilisée qui est perdue représente 20 % de la masse de la pièce, le reste étant réutilisé. Même certaines imprimantes FDM affichent une production de déchets excessive pour cause de mauvais choix de conception. Ainsi, l'imprimante de bureau FDM Cube de 3D Systems fonctionne avec des cartouches de filament propres au constructeur produites en surmoulant deux types de plastiques, ce qui les rend impossibles à recycler (Grenchus et al., 1998). Comme la masse des matières plastiques composant chaque cartouche est supérieure à celle du filament qu'elle renferme, le taux de déchets est automatiquement supérieur à 50 % même en cas d'efficacité parfaite du processus d'impression. Ce type de situation est toutefois rare, et certaines méthodes de fabrication produisent davantage de déchets. Ainsi, la fabrication d'une pièce creuse par usinage à partir d'un bloc de plastique engendre généralement un taux de déchets élevé, souvent supérieur à 80 %. On peut donc raisonnablement penser que l'impression 3D produit en général moins de déchets que ces méthodes. Toutefois, les pièces en plastique produites en très grandes quantités sont généralement moulées et non usinées.

Le moulage par injection est un procédé efficace : d'après les chiffres disponibles, les taux de déchets et de rebuts se situent entre 10 % (Thiriez et Gutowski, 2006) et 5 % (Olmsted et Davis, 2001), voire 1 % (Frischknecht et al., 2005). Par conséquent, si certains processus d'impression 3D produisent moins de déchets que le moulage par injection, il en existe aussi qui en produisent nettement plus. Mais même une production de déchets réduite ne serait pas toujours importante. Comme le montrent les graphiques 5.6 et 5.7, c'est la consommation d'énergie qui représente de loin le principal impact environnemental de l'impression 3D. La hausse de la consommation d'énergie par unité produite réduit à néant les avantages d'une consommation moindre de matériaux et détériore ainsi le bilan environnemental global. Les imprimantes qui ont un impact total moindre sur l'environnement sont celles qui produisent peu de déchets et qui, parallèlement, emploient des matériaux à faible impact et consomment peu d'énergie.

Alignement des incitations économiques

L'impression 3D est susceptible d'améliorer la durabilité environnementale de la fabrication, par l'alignement des incitations économiques avec les incidences environnementales. Dans la production traditionnelle, qu'il s'agisse de prototypage ou de fabrication en grande série, la complexité de la conception vaut plus que la consommation de matières ou d'énergie. Cette situation a favorisé une utilisation peu efficace des matières et de l'énergie dans la production de pièces. À l'inverse, dans les procédés d'impression 3D, les matériaux sont chers, mais la complexité de la conception ne coûte rien. Dans les prochaines années, on devrait donc assister à une complexification des pièces motivée par un souci d'économie de matériaux. Il existe déjà des logiciels qui permettent d'optimiser la géométrie des pièces pour qu'elles supportent les différentes contraintes spécifiées avec une masse réduite au minimum (Within, 2011). L'énergie coûte moins cher,

mais pour les exploitants d'imprimantes 3D, sa consommation est proportionnelle à la durée d'impression et constitue donc un facteur de coût qui les incite à réaliser des économies d'énergie par la complexification des configurations d'impression. En revanche, il n'existe pas d'incitation de ce type qui pousserait les constructeurs d'imprimantes à concevoir des modèles économes en énergie. Au moment de la rédaction de ces lignes, il n'existait pas une corrélation forte entre consommation d'énergie et durée d'impression pour tel ou tel type d'imprimantes (Yoon et al., 2014). L'incitation à économiser l'énergie est donc plus faible que l'incitation à consommer moins de matériaux.

Création des conditions d'une production sans gaspillage

L'impression 3D peut être propice à une production « au plus juste ». L'alignement des incitations économiques sur les incidences environnementales tient du fait que le coût de fabrication de la millionième pièce est le même que celui de la première. L'impression 3D se démarque ainsi du moulage par injection et d'autres méthodes de fabrication en grande série, où la millionième pièce coûte beaucoup moins cher à fabriquer que la première, bien que la consommation de matières et d'énergie soit comparable dans les deux cas. Grâce aux possibilités de production à la demande offertes par l'impression bidimensionnelle depuis une vingtaine d'années, l'emballage des produits imprimés en 3D peut lui aussi être fabriqué sur commande, ce qui contribue également à prévenir la production de déchets. C'est d'ailleurs en ce sens que l'impression 3D peut véritablement « éliminer les déchets » : en éliminant la surproduction. La constitution de stocks a un coût financier, mais comme celui-ci est généralement beaucoup moins élevé que les coûts de préparation et d'outillage des machines pour la production en grande série, de grandes quantités de pièces sont fabriquées à l'avance et entreposées pour permettre de répondre à des niveaux de demande prévus qui ne seront peut-être jamais atteints. À l'inverse, l'impression 3D supprime virtuellement les coûts de préparation et d'outillage et donne donc de l'importance aux coûts d'entreposage. Elle favorise ainsi une fabrication au plus juste et réduit l'incitation économique en faveur de la surproduction. Cet effet bénéfique est plus ou moins marqué selon les secteurs, mais dans la plupart d'entre eux, les invendus représentent peut-être 4 à 5 % en moyenne du chiffre d'affaires (Bot et Neumann, 2003). Il faut y ajouter la réduction du nombre de pièces en cours de fabrication dans les usines, qui peut être non négligeable.

Cependant, si la disparition des économies d'échelle est propice à la prévention de la surproduction, les attentes en la matière doivent être nuancées, car la facilité de fabrication offerte par l'impression 3D risque aussi d'encourager une certaine surproduction, comme on l'a vu précédemment. Ainsi, il faut s'attendre à la fois à l'impression d'un trop grand nombre de pièces et à beaucoup de ratés d'impression, qui produiront des déchets. L'impression 3D étant un domaine en expansion rapide, les exploitants repoussent souvent les limites des machines et de leur savoir-faire, d'où des ratés plus nombreux qu'avec les méthodes de fabrication établies. Aujourd'hui, les ratés d'impression peuvent être nombreux dans certaines applications (Baumers, Holweg et Rowley, 2016), mais il ne s'agira sans doute pas d'un problème significatif à long terme, car les industriels travaillent déjà activement sur des solutions dans un souci de satisfaction des consommateurs. Les années qui viennent verront des améliorations sans que les pouvoirs publics aient à intervenir.

Promotion de l'emploi de matériaux respectueux de l'environnement

L'impression 3D aura sans doute pour effet d'accroître le nombre de matériaux « durables » à la disposition des fabricants et/ou l'éventail des propriétés physiques que ces

matériaux peuvent présenter. Certaines de ces évolutions découleront des technologies d'impression 3D, d'autres de leurs caractéristiques économiques. La disponibilité de matériaux « modulables », capables de présenter des propriétés physiques différentes en fonction des paramètres d'impression, sera l'une des frontières.

Si le plastique est aussi omniprésent dans le monde actuel, c'est en grande partie parce qu'on peut lui donner quasiment n'importe quelle forme ; l'impression 3D pourrait conférer le même avantage à beaucoup d'autres matières. D'ores et déjà, elle peut être utilisée non seulement avec des matières plastiques et des métaux, mais aussi avec de la céramique, des aliments, du sel, de la sciure, de l'amidon, voire des tissus humains vivants. Même les imprimantes 3D plus classiques fonctionnant avec du plastique peuvent encourager le recours à des matériaux différents du fait de certaines caractéristiques. Ainsi, en raison de ses propriétés thermophysiques, le bioplastique PLA se prête mieux à l'impression FDM que l'ABS, et son utilisation a donc été favorisée par ce procédé. L'impression 3D peut aussi ouvrir la voie à l'utilisation d'autres métaux et matières céramiques. Par exemple, la tuyère propulsive évoquée dans l'introduction a été fabriquée par impression 3D dans un alliage de cobalt, de chrome et de céramique, c'est-à-dire dans un matériau exotique inenvisageable auparavant, car inadapté aux méthodes de fabrication antérieures (Beyer, 2014). La plus grande promesse pour l'environnement est de voir la recherche de nouveaux matériaux déboucher sur la fabrication d'objets à partir d'ingrédients disponibles en abondance, renouvelables et non toxiques, au moyen de méthodes de transformation économes en énergie.

Aujourd'hui, la plupart des matériaux employés dans l'impression 3D ne sont malheureusement pas plus respectueux de l'environnement que les autres, et certains le sont même moins. Par exemple, la production des poudres métalliques est plus énergivore que celle des lingots utilisés dans d'autres méthodes de fabrication (Granta Design, 2009). Comme on l'a déjà mentionné, les résines durcies par UV employées dans les procédés SLA, DLP et PolyJet se caractérisent par une certaine toxicité à l'état liquide (3D Systems, 2012), mais sont d'ordinaire considérées comme non toxiques une fois solidifiées. L'ABS a été classé comme relativement dangereux à produire et entre rarement dans les circuits de recyclage municipaux (Rossi et Blake, 2014), et l'impression 3D chez les particuliers ou dans les bureaux peut exposer les personnes présentes à un risque d'inhalation de particules (Stephens et al., 2013), mais il est vrai que cette matière plastique est aussi souvent utilisée dans le moulage par injection. À l'inverse, le PLA constitue une belle réussite : considéré par les industriels comme onéreux et problématique pour la fabrication de produits en grande série, ce bioplastique est devenu l'un des matériaux les plus utilisés par les amateurs d'impression FDM, car ses propriétés physiques font qu'il se prête bien au procédé, comme on le verra plus loin.

Le recours à des matériaux « verts » dans l'impression 3D peut être favorisé tout autant par des facteurs économiques que par des facteurs technologiques. Les matériaux de substitution comme le PLA sont fréquemment plus coûteux par unité que les matériaux traditionnels, en raison d'une production à plus petite échelle, mais les coûts de main-d'œuvre pèsent souvent beaucoup plus lourd que ceux des matériaux. Or, l'impression 3D peut grandement abaisser les premiers et permettre ainsi à certaines entreprises d'employer des matériaux plus onéreux tout en réduisant *in fine* les coûts de fabrication.

Un autre facteur qui crée une incitation économique à employer des matériaux verts est la disparition des économies d'échelle dans l'impression 3D. Dans la fabrication traditionnelle, la complexité coûte cher mais pas les matériaux, ce qui encourage l'utilisation

de grandes quantités d'un nombre restreint de matériaux homogènes. Avec l'impression 3D, le passage d'un matériau à un autre coûte moins cher, car il ne nécessite pas de changer d'outillage. On peut fabriquer une pièce en thermoplastique sur une imprimante et la suivante en sciure sur une autre imprimante, voire sur la même configurée différemment. Sans le vouloir, beaucoup de constructeurs d'imprimantes 3D encouragent les utilisateurs à essayer d'autres matériaux en commercialisant leurs imprimantes à des prix relativement bas mais en vendant cher les matériaux propriétaires avec lesquels elles fonctionnent. Ce modèle économique de l'appât et de l'hameçon, conjugué aux liens entre l'impression 3D et les cultures *hacker* et *maker*, incite les utilisateurs à tester leurs propres matériaux.

L'emploi de matériaux verts dans l'impression 3D se heurte à des obstacles qui sont liés à la disponibilité technique, la disponibilité commerciale, la substituabilité, la qualité d'impression et l'acceptation à l'intérieur du secteur. La disponibilité technique renvoie notamment à la compatibilité de nouveaux matériaux avec les différentes méthodes d'impression 3D. Par exemple, on ne peut pas utiliser du bois avec les procédés SLA puisque l'exposition aux UV ne produit pas sur lui l'effet voulu. La disponibilité commerciale recouvre l'échelle de production et le coût des matériaux : on sait qu'il est techniquement possible d'utiliser de la sciure et du sel, mais les distributeurs commerciaux font défaut. La substituabilité correspond quant à elle à l'adéquation entre les propriétés d'un matériau et son utilisation. Par exemple, le PLA est utilisable sur les imprimantes qui emploient de l'ABS, mais beaucoup de professionnels lui préfèrent l'ABS, qui présente un point de fusion plus élevé et d'autres caractéristiques souhaitées. C'est ainsi que le PLA est aujourd'hui utilisé surtout par les amateurs d'impression 3D. De nombreux facteurs peuvent affecter la qualité d'impression, comme l'altération de la couleur des plastiques recyclés du fait du mélange de différentes couleurs, ou le fait que les pièces fabriquées en sel par projection de liant peuvent présenter une finition de surface moins lisse que celles obtenues avec le procédé PolyJet. Même si tous ces problèmes peuvent être surmontés, l'acceptation de ces matériaux par les industriels risque de prendre des années en raison de coûts irrécupérables, d'économies d'échelle ou du conservatisme. Si l'expérimentation de matériaux et de méthodes plus respectueux de l'environnement représente à l'heure actuelle une très faible part du marché, elle pourrait être encouragée au travers des politiques publiques et du financement du développement. Le formidable essor que connaît aujourd'hui ce secteur offre une occasion de détrôner les matériaux et les méthodes d'impression bien établis.

L'apparition de matériaux « modulables » pourrait ouvrir de vastes perspectives d'écologisation en permettant à un ensemble restreint d'ingrédients de remplir les fonctions d'un grand nombre d'entre eux. Elle pourrait contribuer à éviter l'extraction de matières exotiques, simplifier le dépistage de la toxicité et peut-être aussi améliorer le recyclage et le compostage. Le caractère modulable recouvre à la fois la possibilité de moduler les propriétés d'un matériau à proprement parler et celle de moduler géométriquement une structure faite d'un matériau aux propriétés homogènes de façon à obtenir des propriétés différentes à différents endroits. Par exemple, s'agissant de la modulation géométrique, il existe aujourd'hui beaucoup de pièces composées d'un seul matériau qui comportent une « charnière flexible », c'est-à-dire un endroit où elles sont amincies pour pouvoir être pliées (Mraz, 2004). S'agissant des matériaux, le Zelfo, par exemple, matériau à base de fibres cellulosiques, permet des valeurs de densité allant de 0.5 à 1.5 g/cm³ [gramme par centimètre cube], avec un module de traction de 1 500 à 6 550 MPa [mégapascal] et une résistance à la traction de 7 à 55 MPa (Svoboda et al., 2000). Il est aussi recyclable et biodégradable.

Une illustration de l'emploi de matériaux modulables et respectueux de l'environnement dans l'impression 3D est donnée par la méthode WBDF (*water-based digital fabrication*) du Massachusetts Institute of Technology (MIT). Elle consiste à polymériser des polysaccharides compostables comme l'amidon ou la cellulose, c'est-à-dire des matières premières renouvelables, au moyen d'un système d'extrusion robotisé (Mogas-Soldevila, Duro-Royo et Oxman, 2014). Le procédé d'extrusion est chimique, si bien que le processus d'impression consomme beaucoup moins d'énergie que la fusion de plastiques. Il fait appel à l'eau et fait donc intervenir beaucoup moins de matières toxiques que les plastiques types (les trois principaux ingrédients de l'ABS sont toxiques, même si l'ABS lui-même est généralement réputé sans danger pour l'utilisateur final ; dans le même ordre d'idées, les photopolymères employés dans les méthodes SLA, PolyJet et DLP sont considérés comme toxiques tant qu'ils ne sont pas solidifiés). Dans le cadre de la méthode WBDF, le matériau est non seulement compostable, mais aussi soluble dans l'eau en quelques minutes (même si cette propriété serait sans doute modifiée dans le contexte de biens commercialisés pour garantir une compostabilité normale, mieux adaptée à de nombreuses applications). Enfin, les propriétés du matériau peuvent être « modulées » : la résistance et la rigidité peuvent être ajustées en différents endroits selon le processus d'impression. Cette modulation permet de remplacer plusieurs matériaux différents par un seul. Pour rendre les méthodes de ce type économiquement viables, des activités de recherche et développement devront être financées en vue d'améliorer la qualité d'impression et les propriétés des matériaux. Si elles parviennent à s'imposer dans l'impression 3D, les technologies correspondantes pourraient être élargies au moulage par injection et à d'autres procédés de fabrication plastique.

Possibilités de compostage et de recyclage

Si certains de ceux qui mènent des activités expérimentales espèrent que l'impression 3D encouragera le recyclage, les forces du marché poussent en grande partie dans le sens inverse. Quant au compostage, autre possibilité de traitement pour les pièces non métalliques, il présente également quelques inconvénients. Plusieurs technologies d'impression sont tributaires de polymères non recyclables, et la multiplication annoncée des imprimantes multimatériaux empêchera de recycler même des matières plastiques recyclables en les rendant impossibles à séparer les unes des autres. En revanche, le recyclage pourrait être favorisé par le fait que l'impression 3D réduira le nombre de pièces et de matériaux composant les produits ou fera appel à des matériaux plus onéreux. Des matériaux recyclés peuvent être employés dans certaines impressions 3D et le sont effectivement. En théorie, le compostage de produits fabriqués par impression 3D pourrait progresser à l'avenir, mais cela comporte également un certain nombre de risques et on ignore si cette forme de traitement serait supérieure à l'incinération dans des installations modernes.

Le recyclage dans le contexte de l'impression 3D n'échappe pas au problème classique du recyclage qu'est celui du tri. Pour ses défenseurs, l'impression 3D peut accroître les taux de recyclage, car elle permettra de passer par les circuits locaux d'impression 3D plutôt que par les systèmes municipaux centralisés, ce qui évitera des coûts de transport. Il ne s'agira toutefois pas d'une incitation suffisante, dans la mesure où les coûts de transport sont faibles (Bhasin et Bodla, 2014). Les principaux obstacles au recyclage sont liés non au transport, mais au tri et au contrôle de qualité censés garantir que les matériaux sont utilisables. Les plastiques se présentent sous des milliers de formes différentes qui se distinguent par la nature des polymères, leur qualité, leur couleur et les mélanges d'additifs incorporés pour déterminer la flexibilité, la résistance mécanique, la résistance aux UV et

d'autres propriétés. Les métaux aussi se caractérisent par des types et des qualités très variés. Les professionnels du recyclage emploient aujourd'hui des équipements de tri qui valent des centaines de milliers, voire des millions de dollars, parmi lesquels des outils faisant appel à des bains d'eau, des aimants ou des charges électrostatiques, des spectromètres servant à repérer les plastiques et les métaux, des tapis roulants, des aires d'entreposage, etc. Les équipements de ce type se caractérisent par des économies d'échelle inhérentes peu adaptées aux activités locales à petite échelle, et seules des matières ayant une valeur économique suffisante peuvent justifier un processus de tri coûteux.

Afin de surmonter le problème du tri, une source de plastique prévisible pourrait être employée pour le recyclage et l'impression 3D de bureau, comme les bouteilles en PET, mais les meilleurs candidats dans l'optique d'un tel recyclage sont aussi les matières qui sont déjà largement présentes dans les flux de déchets municipaux à recycler. Les flux de déchets prévisibles traités dans le cadre des programmes de responsabilité élargie des producteurs (REP) sont généralement constitués de matières très mélangées qui sont aujourd'hui difficiles à trier pour être réutilisées dans des activités de fabrication, qu'il s'agisse d'impression 3D ou d'autres procédés. À l'heure actuelle, la plupart des entreprises qui participent à des programmes de REP comme ceux ciblant les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) font appel à des tiers pour effectuer le recyclage des matières, car la production de matières premières de haute qualité à partir de produits récupérés est un processus spécialisé qui met en jeu des économies d'échelle (Mayers, 2007). L'impression 3D ne modifie pas ces paramètres économiques, si ce n'est qu'elle peut permettre d'utiliser des matières plus coûteuses parce que ses coûts de main-d'œuvre sont moindres.

Au niveau des particuliers, le recyclage et l'impression 3D pourraient fonctionner en circuit fermé : la fabrication d'objets en un matériau unique serait suivie, lorsque l'utilisateur s'est lassé d'eux, de leur broyage pour les retransformer en matière première, mais il faudrait pour cela que les utilisateurs se lassent de leurs objets au même rythme qu'ils en fabriquent de nouveaux et les fabriquent tous dans le même type de plastique de même couleur. Ou alors, les utilisateurs seraient obligés d'avoir leur propre petit stock de bobines plastiques différentes. Un tel scénario n'est pas réaliste à grande échelle. Il existe depuis toujours des capacités de ce type dans le domaine de l'habillement, mais s'il était courant que les particuliers recyclent les tissus des vêtements pour en faire de nouveaux vêtements il y a 100 ans, cette pratique est aujourd'hui réservée à quelques amateurs. Il est plus simple d'acheter des vêtements neufs que de les coudre chez soi, et à des prix tellement bas que l'économie réalisée grâce au recyclage des tissus ne vaut pas que l'on consacre du temps à concevoir et créer des vêtements. Comme la couture à domicile, l'impression 3D à domicile concernera un nombre restreint d'amateurs qui fabriqueront leurs pièces par plaisir, et il s'agira donc d'un marché de niche.

À ces obstacles au recyclage s'ajoute le fait que beaucoup de matériaux utilisés en impression 3D sont difficiles ou même impossibles à recycler. Les procédés d'impression qui offrent la meilleure qualité et qui sont donc les plus utilisés dans la fabrication commerciale sont aussi généralement ceux qui sont les moins capables de s'accommoder de matériaux recyclés. Toutes les imprimantes utilisant des photopolymères (SLA, PolyJet, projection de liant, DLP...) emploient des procédés chimiques non réversibles qui rendent les matériaux impossibles à recycler. Dans le cas des imprimantes métal, le recyclage est compliqué par les tolérances très faibles applicables aux matériaux utilisés comme intrants, même s'il n'est pas impossible. Quant aux poudres métalliques non consommées dans les procédés SLM, DMLS et autres, leur qualité se dégrade à chaque utilisation

(Slotwinski et al., 2014) et elles ne sont aujourd'hui pas produites à partir de métaux recyclés, car elles doivent être d'une pureté extrême (Yadav, Dirstine et Pfaffenbach, 2004). Les imprimantes FDM sont les seuls modèles largement employés qui peuvent fonctionner facilement avec des matériaux recyclés.

Exemples de recyclage et promesses

Un certain nombre de chercheurs, d'amateurs et de start-ups ont utilisé des imprimantes 3D avec des matériaux recyclés. Des appareils de bureau comme Filabot (Biggs, 2013) et Extrusionbot (Sevenson, 2014) transforment des déchets plastiques en granules puis en filaments utilisables avec des imprimantes FDM. Ces procédés peuvent même être plus économes en énergie que les filières de recyclage municipales (Kreiger et al., 2013). Selon une étude, un appareil de recyclage de bureau consomme en gros 38 mégajoules (MJ) pour produire un kilogramme de plastique ABS recyclé (Baechler DeVuono et Pearce, 2013), ce qui correspond à l'estimation basse de la consommation d'énergie des recycleurs industriels (entre 38 MJ/kg et 43 MJ/kg) (Possamai, 2007). Comme indiqué plus haut, l'impression 3D consomme généralement beaucoup plus d'énergie par pièce fabriquée que le moulage par injection, et ce n'est pas le fait de recycler des matériaux sur place en consommant peu d'énergie qui risque d'inverser le rapport. En revanche, cela pourrait changer grâce aux technologies à venir. On a vu précédemment que deux start-ups dans le domaine de l'architecture imprimaient des matériaux recyclés à l'échelle industrielle. KameranMaker utilise ainsi du plastique recyclé et a aussi éliminé d'autres matériaux de construction comme les plaques de plâtre et les membranes imperméables. Pour sa part, WinSun utilise du verre et d'autres matériaux recyclés pour produire du béton, et les imprimantes fonctionnant avec de la poudre métallique (SLM, SLS, DMLS, etc.) peuvent réutiliser la poudre non fondue dans le cadre d'applications autres qu'aérospatiales.

Les imprimantes qui agglomèrent des particules au moyen d'un adhésif (comme celle de WinSun) peuvent plutôt bien s'accommoder de différents matériaux, ce qui atténue les problèmes liés au tri. Leur inconvénient tient au fait qu'elles recyclent les matériaux pour produire des mélanges de moins bonne qualité et sont incapables d'offrir des propriétés physiques de haut niveau. Cette qualité n'en est pas moins acceptable et acceptée depuis des décennies dans de nombreux secteurs industriels, comme ceux qui fabriquent des planchers ou d'autres éléments architecturaux à partir de plastique recyclé. Pour l'heure, les données disponibles ne permettent pas de prévoir si l'impression 3D sera plus économique ou de meilleure qualité que les formes existantes de recyclage des plastiques mélangés.

En théorie, l'impression 3D peut permettre un accroissement du recyclage en réduisant le nombre de pièces composant les produits et le nombre de matières utilisées, grâce à la possibilité de fabriquer des pièces à géométrie complexe et à l'emploi de matériaux modulables. Ce n'est qu'une hypothèse, mais elle est validée par des principes généraux largement admis. Tout d'abord, l'un des principes de base de la conception de produits dans l'optique du recyclage veut qu'on limite le nombre de pièces pour réduire les coûts de main-d'œuvre au moment du démontage (Possamai, 2007). En l'occurrence, l'impression 3D permet de produire des pièces très complexes capables de remplacer chacune de nombreuses pièces simples. Un deuxième principe de base de la recyclabilité veut qu'on limite le nombre de matériaux différents pour réduire les besoins de tri (Dahmus et Gutowski, 2007 ; Possamai, 2007). Avec les procédés d'impression 3D évolués, il est possible de prévoir des variations de la géométrie qui permettent aux pièces d'être plus ou moins flexibles, résistantes, etc. en certains points sans qu'il soit nécessaire d'utiliser

plusieurs matériaux. Certaines méthodes comme la méthode WBDF permettent même des propriétés modulables des matériaux en fonction du processus d'impression. En théorie, plusieurs matériaux pourraient ainsi être remplacés par un seul dans certains cas.

Compostage ou recyclage

À long terme, le compostage pourrait être une autre façon de favoriser une économie circulaire, dans la mesure où il peut s'accommoder de matériaux mélangés impossibles à séparer. Le recyclage des pièces imprimées en 3D a peu de chances de se généraliser à l'avenir, car on a vu que les avancées technologiques entraîneront une multiplication des imprimantes capables d'imprimer plusieurs matériaux à la fois. Cette évolution est économiquement rationnelle, mais réduit à néant la recyclabilité. Les matériaux compostables peuvent faire l'objet d'un recyclage biologique, quelles que soient leurs propriétés esthétiques, physiques et électriques. L'éventail des matériaux à la disposition des créateurs et des ingénieurs ne s'en trouve pas forcément réduit, puisque les matières végétales et animales présentes dans la nature, qui sont toutes recyclables, offrent une large palette de propriétés physico-chimiques. Cela étant, les matériaux compostables présentent aussi un certain nombre de limites et de risques, de sorte que l'incinération peut constituer une solution plus intéressante. Par exemple, le fait de mélanger des plastiques biodégradables et classiques peut perturber le fonctionnement de circuits bien établis de recyclage du plastique et encourager les dépôts sauvages (de la part de consommateurs tablant sur une dégradation rapide des matières).

Certaines installations municipales permettent déjà de composter de nombreux matériaux utilisables avec des imprimantes 3D : bioplastique PLA, matériaux composites à base de fibre de bois et de bioplastique, amidon, voire des composites conducteurs biodégradables servant au câblage (Van Wijk et Van Wijk, 2015 ; McDonald, 2016 ; Ray, 2013 ; Kilner, 1993). À l'évidence, les aliments fabriqués par impression 3D sont compostables, mais ne possèdent pas des qualités structurelles suffisantes pour la plupart des applications. Comme indiqué plus haut, le matériau utilisé par le procédé WBDF du MIT possède de telles qualités tout en étant soluble dans l'eau en quelques minutes. Dans le cadre d'un projet en collaboration, l'Université de Wageningen et le designer Eric Klarenbeek ont imprimé en 3D des meubles en mycélium dotés d'une coque en PLA (Fairs, 2013). La société Ecovative commercialise depuis 2007 un matériau d'emballage comparable à base de mycélium, biodégradable en 30 jours selon les normes ASTM D6400 (Ecovative, sans date). Il n'existe pas aujourd'hui sur le marché de matériau d'impression aussi facile à composter et possédant des qualités structurelles suffisantes, mais des efforts ciblés de recherche et développement pourraient permettre d'en créer.

Certains bioplastiques compostables comme le PLA sont déjà très largement employés et produits de façon plus respectueuse de l'environnement que les matières plastiques à base de pétrole, que ce soit sur le plan de la consommation d'énergie ou sur celui de la toxicité. L'énergie grise du PLA est bien moindre que celle de la plupart des plastiques (~27 MJ/kg en 2007) (Vink, 2007) et la société Dow ambitionne de la ramener à 7 MJ/kg (Vink et al., 2003), alors qu'elle est d'environ 40 MJ/kg dans le cas de l'ABS recyclé déjà évoqué et même d'environ 100 MJ/kg dans celui de l'ABS vierge (Granta Design, 2009). Par ailleurs, il est avéré que le PLA rejette moins de fumées toxiques que l'ABS lors d'une impression selon le procédé FDM (Stephens et al., 2013). Cela étant, son compostage nécessite des installations municipales capables d'atteindre des températures élevées ; comme elles ne sont pas très répandues aujourd'hui dans le monde, le PLA n'est pas pour l'instant compostable dans la

plupart des villes. Cependant, à long terme, ce type d'installation de compostage se multipliera sans doute pour devenir aussi courant, voire plus, que les installations de recyclage, car il n'est pas sensible aux problèmes de tri et coûte donc moins cher par unité de déchets traités : environ 50 USD/tonne (Renkow et Rubin, 1998) contre 75 USD/tonne pour le recyclage (Bohm et al., 2010). Aujourd'hui déjà, les villes des États-Unis sont plus souvent dotées de services de compostage que de services de ramassage et de recyclage de l'ABS, le recyclage municipal étant optimisé pour les plastiques qui représentent les plus gros volumes, comme le PET.

Le recyclage des plastiques au niveau local dans le cadre de l'impression 3D pourrait davantage s'imposer dans les pays en développement que dans les pays développés, car les infrastructures y sont plus limitées et le rapport entre le coût de la main-d'œuvre et celui des matériaux y est différent. Dans les pays en développement, les systèmes de recyclage municipaux sont souvent défectueux et cette niche économique est donc inoccupée. Par ailleurs, les matériaux coûtent plus cher que la main-d'œuvre dans les pays développés, d'où une plus forte incitation à valoriser et trier les matières. De fait, dans certains endroits de la planète, des quartiers entiers tirent aujourd'hui leurs moyens de subsistance du tri artisanal des déchets dans les décharges (Gill, 2009). Dans ces pays, le compostage n'est pas forcément aussi avantageux économiquement par rapport au recyclage. Enfin, les consommateurs à faible revenu sont souvent moins préoccupés par la qualité des biens que par leur prix, de sorte qu'il peut être plus facile de répondre à leurs besoins par des produits fabriqués avec des imprimantes FDM de bureau qui permettent d'utiliser des plastiques recyclés. Ces tendances pourraient toutefois ne pas être suffisamment fortes pour faire pencher la balance en faveur du recyclage plutôt que du compostage, même dans les pays en développement.

Réparation de produits obsolètes

Plus que par le recyclage, c'est par la réparation des produits que l'impression 3D pourrait favoriser la réutilisation des matières. Aujourd'hui, beaucoup de produits obsolètes sont mis au rebut parce qu'un de leurs éléments tombe en panne et qu'il n'est plus possible de s'en procurer un autre pour le remplacer. Bien souvent, il s'agit d'une simple pièce en plastique ou en métal, et le recours à l'impression 3D pour la reproduire peut donc être particulièrement intéressant. Les questions de propriété intellectuelle (PI) sont le principal obstacle à une généralisation de cette pratique : elles concernent à la fois l'accès des utilisateurs à des modèles 3D imprimables et les droits afférents aux modèles imprimables disponibles. Certains sites web comme Thingiverse donnent déjà accès gratuitement à des modèles pour imprimer en 3D de nombreuses pièces détachées de lave-vaisselle, réfrigérateurs, accessoires de vélo, etc. Le statut de ces modèles 3D au regard de la loi est ambigu. On peut soutenir qu'ils n'enfreignent pas la législation sur la PI puisqu'ils sont obtenus par rétro-ingénierie, mais cette interprétation a été contestée devant les juridictions dès 2011 (Coetzee, 2011). Les entreprises concernées pourraient choisir de faire payer l'utilisation des droits de propriété intellectuelle via les sites en question, à l'image de ce qui s'est passé avec le service de partage illégal de musique Napster, dont l'évolution a débouché sur des services d'abonnement payants comme Pandora ou Spotify.

Les pouvoirs publics pourraient aisément promouvoir l'impression 3D à des fins de réparation, plusieurs entreprises étant déjà bien placées pour fournir ce type de service, y compris en rémunérant les ayants droit. Il s'agit seulement d'une question de droits et de contrats. Thingiverse pourrait ainsi faire payer les utilisateurs qui téléchargent un fichier à

imprimer chez eux et verser une redevance au fabricant d'origine. Grâce à des entreprises comme Shapeways, qui permettent de commander des impressions 3D sur internet et de se les faire livrer, les clients n'ont même plus besoin d'avoir une imprimante chez eux. On ignore si ces marchés auront une envergure suffisante pour éviter un grand nombre de mises au rebut, sachant que les réparations nécessitent non seulement des pièces, mais aussi de la main-d'œuvre souvent qualifiée. L'expérience vaut néanmoins le coup d'être tentée, puisqu'elle ne requiert pas de technologies ou d'investissements nouveaux, mais exige seulement que l'on clarifie la situation juridique pour les acteurs qui se livrent à ces activités.

Économies d'énergie en phase d'utilisation

L'impression 3D pourrait bien contribuer davantage à la durabilité environnementale en suscitant des économies d'énergie au cours de la phase d'utilisation des produits qu'en réduisant les impacts durant leur fabrication. C'est une hypothèse, car ces économies pourraient concerner seulement les industries aérospatiale et automobile et celles dont les impacts des produits au cours du cycle de vie sont dominés par la consommation d'énergie en phase d'utilisation, et dans lesquelles cette consommation est étroitement liée à la masse des matériaux composant les produits.

En permettant de fabriquer des objets plus complexes, l'impression 3D peut ouvrir la voie à la production de pièces plus légères qui contribuent à réduire la consommation de carburant dans les transports. À titre d'exemple, les pièces de réacteur fabriquées par General Electric par impression 3D évoquées plus haut ont permis un allègement qui s'est traduit par une baisse de 15 % de la consommation de carburant (Beyer, 2014). Même si la production des pièces a plus d'impact sur l'environnement qu'avec les méthodes classiques comme l'usinage ou le soudage, cela peut être largement compensé par des économies d'énergie considérables durant l'utilisation. Un tel allègement réduit également l'impact des camions et des voitures au cours de leur cycle de vie, mais pas celui d'autres catégories de produits comme l'électronique grand public et les bâtiments. D'autres possibilités de réduire la consommation d'énergie en phase d'utilisation peuvent cependant exister.

La complexité accrue permise par l'impression 3D peut aussi rendre plus efficaces la circulation des fluides et le transfert thermique dans certains systèmes. Par exemple, le moteur SuperDraco de la société SpaceX permet un meilleur rendement du combustible grâce au fait que le circuit de « refroidissement régénératif » est intégré dans les parois de la chambre de combustion, alors que les méthodes de fabrication antérieures obligeaient à le souder sur l'extérieur (Post, 2014 ; Dankhoff, 1963). Des économies d'énergie en phase d'utilisation sont aussi possibles dans d'autres secteurs, comme l'architecture. La consommation d'énergie est responsable d'environ 90 % de l'impact environnemental d'un bâtiment moyen durant sa durée de vie (Faludi, Lepech et Loisos, 2012), et les fuites d'air, en particulier au niveau des coins et des jointures, y sont pour beaucoup (Liaukus, 2014). Même si cela n'a pas encore été démontré, la fabrication de murs d'un seul tenant par impression 3D pourrait, théoriquement, contribuer à prévenir de telles fuites.

Avantages sociaux et nécessité d'impressions 3D respectueuses de l'environnement à grande échelle

En plus de ses retombées environnementales, l'impression 3D pourrait aussi se répercuter sur la dimension sociale du développement durable. L'une des conditions de la durabilité est l'autonomisation économique, et l'impression 3D offre précisément les moyens d'une telle autonomisation aux petites entreprises et à d'autres acteurs qui n'ont

guère accès au capital en réduisant radicalement les obstacles économiques à leur entrée dans les activités de fabrication. Quiconque possède un ordinateur un tant soit peu puissant et un logiciel de CAO peut créer des modèles 3D et les faire imprimer pour obtenir des pièces de haute qualité sans avoir à investir dans l'outillage d'une chaîne de production. L'impression 3D est même souvent meilleur marché que des méthodes de prototypage classiques comme l'usinage (Beyer, 2014). Une telle autonomisation des petites entreprises pourrait contribuer à réduire les inégalités de revenus dans les pays développés et aider les pays en développement à s'industrialiser.

Un recours à grande échelle à l'impression 3D au détriment du moulage par injection dans la fabrication en grande série poserait probablement un problème environnemental compte tenu des imprimantes actuelles, mais son utilisation en lieu et place de l'usinage pour la fabrication de pièces creuses serait sans doute bénéfique pour l'environnement si elle remplissait deux conditions : réduire grandement l'énergie consommée pour produire chaque pièce et réduire les incidences incorporées dans les matériaux d'impression. De nombreuses stratégies peuvent aider à atteindre ces objectifs : maximiser l'utilisation, éliminer les substances chimiques toxiques, réduire les déchets, etc. Le tableau 5.2 indique un certain nombre de stratégies applicables par type d'imprimante.

Tableau 5.2. **Stratégies d'amélioration de la durabilité de l'impression 3D par type d'imprimante**

Type d'imprimante	Stratégies de réduction des incidences liées aux matériaux	Stratégies de réduction de la consommation d'énergie lors des impressions 3D	Stratégies de réduction de la consommation d'énergie à l'arrêt
Photopolymérisation	Éliminer les substances chimiques toxiques Développer des biopolymères compostables Réduire au minimum les matériaux de support Moduler les propriétés des matériaux au travers du procédé d'impression	Imprimer plus de pièces à la fois Réduire au minimum la durée d'impression Axer la conception sur l'efficacité	Partager les imprimantes pour réduire au minimum le temps d'inactivité Mode à faible consommation d'énergie à l'arrêt
Projection de liant	Développer/améliorer les biopolymères compostables Moduler les propriétés des matériaux au travers des procédés d'impression		
Frittage ou fusion par laser (métal)	Produire des poudres à partir de métaux recyclés Améliorer les possibilités de réutilisation des poudres métalliques Réduire au minimum les matériaux de support Moduler les propriétés des matériaux au travers des procédés d'impression		
Extrusion	Développer/améliorer les biopolymères compostables Pièces creuses et réduction au minimum des matériaux de support Moduler les propriétés des matériaux au travers des procédés d'impression	Solidifier les matériaux par voie chimique au lieu de faire fondre des thermoplastiques Pièces creuses et réduction au minimum des matériaux de support Réduire au minimum la durée d'impression Axer la conception sur l'efficacité	

Source : Analyse des auteurs.

Comme le montre le tableau 5.2, la conception et le fonctionnement varient tellement entre les types d'imprimantes que toutes les stratégies ne s'appliquent pas de la même façon à chacun. La principale priorité dans l'optique de la durabilité est de réduire la consommation d'énergie par pièce fabriquée, mais les stratégies pour y parvenir peuvent varier selon le type d'imprimante. Une stratégie commune à l'ensemble des imprimantes consiste à réduire leur consommation d'énergie lorsqu'elles sont inactives. Cela peut passer par leur passage automatique en mode d'économie d'énergie à l'arrêt de la production et/ou par le partage d'un plus petit nombre d'entre elles entre un plus grand nombre d'utilisateurs. Une autre démarche universellement bénéfique est tout simplement la conception des

imprimantes dans un souci de sobriété énergétique. Comme l'électricité est relativement bon marché aujourd'hui, beaucoup d'imprimantes sont dépourvues de fonctions d'économie d'énergie aussi élémentaires que l'isolation des éléments chauffants. Enfin, la dernière stratégie pour faire baisser la consommation d'énergie valable pour toutes les imprimantes consiste à réduire la durée d'impression. Dans beaucoup d'imprimantes 3D, l'énergie consommée sert surtout à maintenir en marche les systèmes de support, alors que le surcroît d'électricité nécessaire pour l'impression à proprement parler est souvent faible (Faludi et al., 2015b). Par conséquent, il serait probablement possible d'imprimer plus de pièces en consacrant moins d'énergie à chacune si la durée d'impression était réduite, même si cela supposait le recours à un plus grand nombre de têtes d'impression, de lasers, etc.

Pour réduire l'impact des matériaux, une stratégie consiste à moduler leurs propriétés. C'est une stratégie universelle, puisque tous les types d'imprimantes 3D devraient (en théorie) le permettre à l'avenir, quoique sous différentes formes. Les stratégies indiquées dans le tableau sont pour beaucoup propres à des technologies particulières. Dans le cas des imprimantes fonctionnant par extrusion, les économies d'énergie et les économies de matériaux sont corrélées, et les deux sont favorisées par la fabrication de pièces creuses et la réduction au minimum des matériaux de support. Ce type d'imprimantes permet aussi de solidifier les plastiques par voie chimique au lieu de les fondre, avec à la clé une économie d'énergie non négligeable. Les machines fonctionnant par photopolymérisation, projection de liant et frittage laser peuvent consommer moins d'énergie par pièce fabriquée si on maximise le nombre de pièces par impression, car elles permettent d'imprimer plusieurs pièces en consommant à peine plus d'énergie qu'en imprimant une seule, indépendamment de la consommation de matériaux. En ce qui concerne l'impact des matériaux sur l'environnement, la plupart des imprimantes permettent de réduire au minimum l'utilisation de matériaux de support, mais ce n'est pas une priorité pour celles fonctionnant par projection de liant, qui n'en ont généralement pas besoin. Quant à la réduction de la toxicité, elle revêt un degré de priorité plus élevé pour les systèmes à photopolymérisation, car il existe déjà des matériaux non toxiques pour les autres types d'imprimantes. Pour ces systèmes, les biopolymères compostables peuvent être une solution, car les photopolymères sont dans tous les cas de figure impossibles à recycler. L'incinération avec valorisation énergétique est une autre solution. Le compostage est aussi aujourd'hui une possibilité pour certains matériaux employés dans la projection de liant et l'extrusion thermoplastique, même si les solutions ne sont pas encore nombreuses. Des activités de développement s'imposent en vue d'élargir l'éventail des solutions disponibles sur le marché et d'améliorer les qualités physiques des matériaux concernés, s'il est possible de les produire à un coût compétitif et de maîtriser le risque de perturbation des circuits de recyclage existants. Les métaux ne sont généralement pas compostables, et ceux qui recourent au frittage métallique devraient donc veiller à améliorer les possibilités de recyclage, qu'il s'agisse de la réutilisation des poudres ou de la production de celles-ci à partir de métaux recyclés.

Les possibilités en matière d'impression 3D peuvent être illustrées par l'exemple du dispositif de frittage solaire de Markus Kayser. Celui-ci fonctionne en gros comme la méthode SLS, mais au lieu de fritter la poudre de plastique ou de métal avec un laser, il utilise une grande lentille de Fresnel pour obtenir par frittage du verre à partir de sable grâce à la chaleur du soleil. Ses moteurs et composants électroniques sont alimentés par des panneaux solaires, et le sable employé est non toxique, abondant, disponible localement et utilisable dans l'imprimante sans faire l'objet au préalable d'une transformation énergivore. Le dispositif de frittage solaire constitue seulement un projet de démonstration et n'est sans

doute pas adapté à des applications industrielles, mais il illustre ce qu'il est possible de faire. Même sans aller aussi loin, certaines imprimantes 3D commerciales sont aujourd'hui capables d'utiliser des matières non toxiques, abondantes, renouvelables et compostables dans des processus d'impression économes en énergie, soit des conditions proches de l'idéal d'une fabrication durable. C'est le cas, par exemple, du procédé de projection de liant employé avec du sel ou de la sciure, ou de la méthode WBDF du MIT.

Réalisation des objectifs de la politique de l'environnement : priorités et mécanismes

Mécanismes

Cette section décrit les domaines dans lesquels il convient d'agir en priorité pour rendre l'impression 3D plus respectueuse de l'environnement. Certains sont mis en exergue dans le tableau 5.3, qui classe par degré de priorité les objectifs en matière de

Tableau 5.3. **Actions prioritaires pour améliorer le bilan environnemental de l'impression 3D**

Domaine	Priorité élevée	Priorité moyenne	Priorité faible
Conception des imprimantes	<p>1. Conception axée sur la réduction au minimum du temps d'inactivité (partage simplifié, configuration et nettoyage rapides) Fort impact et mise en œuvre aisée.</p> <p>2. Mode veille automatique avec faible consommation d'électricité Fort impact et mise en œuvre aisée.</p>	<p>1. Procédé d'impression économe en énergie (soudure chimique préférée à la fusion) Moyen ou fort impact, mais nécessite un investissement significatif et doit aller de pair avec des systèmes et équipements économes en énergie.</p> <p>2. Systèmes et équipements économes en énergie (isolation, moteurs, électronique) Fort impact, mais nécessite un investissement significatif.</p>	<p>Conception des logiciels et du matériel dans un souci de réduction au minimum de la consommation de matières et de la production de déchets Fort impact, mais les incitations du marché vont déjà en ce sens.</p>
Matériaux	<p>1. Photopolymères compostables et non toxiques pour les imprimantes SLA, DLP, PolyJet et CLIP Fort impact, le parc existant des imprimantes fonctionnant par photopolymérisation est important.</p> <p>2. Amélioration des propriétés physiques, de la qualité d'impression et de la compostabilité des biopolymères existants dans les procédés d'impression économes en énergie Commercialiser les matériaux existants nécessite moins d'investissements que la mise au point de nouveaux matériaux.</p>	<p>Soudure chimique (plutôt que fusion) des biopolymères compostables pour les imprimantes fonctionnant par extrusion, comme dans le procédé WBDF du MIT Fort impact, mais nécessite de remplacer ou de rééquiper les imprimantes existantes (plus cher que de remplacer simplement les produits chimiques dans les imprimantes utilisant des photopolymères).</p>	<p>1. Propriétés des matériaux modulables grâce aux procédés d'impression, pour toutes les imprimantes Impact incertain, reste expérimental. Pourrait simplifier le recyclage, le compostage et le dépistage de la toxicité, mais nécessite un investissement important.</p> <p>2. Poudres métalliques réutilisables indéfiniment produites à partir de matériaux recyclés Probablement moins d'impact que la réduction de la consommation d'énergie, et nécessite sans doute un investissement important.</p>
Fonctionnement des imprimantes	<p>1. Partage des imprimantes pour aboutir à une utilisation plus intensive d'un nombre plus restreint d'imprimantes Fort impact et mise en œuvre aisée.</p> <p>2. Exploitation optimale du lit des imprimantes fonctionnant par photopolymérisation, projection de liant et frittage laser Fort impact et mise en œuvre aisée.</p>	<p>Réduire au minimum le recours aux matériaux de support avec l'ensemble des imprimantes L'impact varie selon le type d'imprimante ; la mise en œuvre peut être peu onéreuse (amélioration des algorithmes logiciels, par exemple) ou au contraire coûteuse (amélioration du matériel).</p>	<p>1. Éviter les ratés d'impression L'impact varie selon l'application ; les forces du marché poussent déjà fortement dans ce sens.</p> <p>2. Production de pièces creuses avec les imprimantes fonctionnant par extrusion L'impact varie selon l'application ; les forces du marché poussent déjà fortement dans ce sens.</p>
Propriété intellectuelle	<p>1. Droit accordé aux tiers d'imprimer des pièces de rechange de produits (moyennant le versement de redevances raisonnables lorsqu'il y a lieu) Impact peu clair, mais la mesure nécessite seulement de légiférer et il existe des précédents dans d'autres secteurs. Aucun développement technologique nécessaire.</p>		

Source : Analyse des auteurs.

conception et de fonctionnement des imprimantes, de matériaux, de propriété intellectuelle et d'efficacité énergétique en phase d'utilisation. Au travers de ces objectifs, il s'agit de réduire la consommation d'énergie et la production de déchets, ainsi que d'opérer la transition vers des matériaux non toxiques, abondants et renouvelables qui contiennent peu d'énergie grise et ont une utilité en fin de vie.

Le secteur de l'impression 3D se trouve aujourd'hui à un tournant, si bien que des interventions publiques auraient plus d'impact maintenant que dans quelques années. Parmi les interventions possibles, il y a l'interdiction de certaines pratiques, le recours à des taxes ou subventions et la mise en place de systèmes de certification (écolabels) ou de programmes d'achat préférentiel. Les incidences du secteur de l'impression 3D pourraient aussi être atténuées par des interventions dans d'autres secteurs : étant donné que la plus importante de ces incidences est la consommation d'électricité lors de la fabrication de pièces, le passage à une production d'électricité à 100 % d'origine renouvelable (comme ont déjà entrepris de le faire certains pays) pourrait réduire l'impact de l'impression 3D de peut-être 75 %. Bien évidemment, cela améliorerait aussi le bilan environnemental d'autres méthodes de fabrication à forte consommation d'électricité. Les interventions dans le secteur de l'impression 3D devraient cibler principalement la conception des imprimantes, leurs matériaux et leur fonctionnement. Comme indiqué plus haut, les interventions destinées à encourager l'impression 3D de pièces dans des secteurs où cela peut réduire la consommation d'énergie en phase d'utilisation, comme l'industrie aérospatiale, devraient être axées sur ces secteurs-là et non sur celui de l'impression 3D, car cette dernière n'est qu'un moyen parmi d'autres de faire progresser l'efficacité énergétique. Dans les sections suivantes, nous examinons plusieurs mécanismes par lesquels les pouvoirs publics peuvent exercer une influence directe sur l'industrie de l'impression 3D.

Interdictions et taxes

L'interdiction de certaines pratiques dans le contexte particulier de l'impression 3D serait probablement improductive pour cause de double emploi avec des interdictions existantes et de difficultés de mesure des performances. Les effets dommageables sur l'environnement qui sont faciles à mesurer sont en grande partie couverts par les interdictions existantes. Par exemple, les photopolymères et d'autres produits chimiques entrant dans les impressions présentent souvent une certaine dangerosité, comme on l'a vu plus haut, mais pas plus que d'autres processus de fabrication. Il existe aujourd'hui déjà des dispositions applicables à l'ensemble des produits chimiques industriels qui en interdisent certains, comme la directive RoHS de l'Union européenne, ou fixent des limites dans ce domaine, comme le règlement européen REACH sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des substances chimiques. Si des arguments solides plaident en faveur d'un durcissement des réglementations chimiques, toute classe de produits chimiques que les législateurs souhaitent interdire dans le cadre de l'impression 3D devrait sans doute être interdite à l'échelle de l'industrie dans son ensemble.

Par ailleurs, les incidences de l'impression 3D peuvent être difficiles à mesurer concrètement au niveau des imprimantes. Même lorsque sa fabrication par impression 3D consomme beaucoup d'énergie, une pièce peut permettre de réduire l'impact du produit auquel elle est intégrée lorsque celui-ci est utilisé, et afficher ainsi *in fine* un bilan environnemental positif. Dans le domaine aérospatial et dans celui des véhicules terrestres, par exemple, l'allègement est synonyme de baisse de la consommation de carburant. Par conséquent, interdire les imprimantes dont la consommation par pièce produite dépasse un

certain seuil pourrait revenir à interdire la fabrication de pièces bénéfiques pour l'environnement. En outre, les interdictions sont plus souvent perçues par les industriels comme une menace que d'autres types de mesures publiques, telles que les systèmes de certification volontaire, et se heurtent donc à une plus forte opposition politique.

Pour les mêmes raisons, taxer des pratiques spécifiques d'impression 3D serait sans doute également improductif. La mise en place de taxes carbone peut certes être efficace pour faire baisser la consommation d'énergie dans les activités de fabrication (Larsen et Nesbakken, 1997 ; Veugelers, 2012), mais cela ne devrait pas se limiter à l'impression 3D. Il conviendrait au contraire d'appliquer de telles taxes à l'échelle de l'économie tout entière pour maximiser leur efficacité et éviter des transferts d'impacts entre secteurs d'activité. Si l'on envisage des taxes à l'échelle du secteur, la forme la plus indiquée serait une taxe carbone, puisque ce sont généralement les émissions liées à la consommation d'électricité d'origine fossile qui sont à l'origine du plus fort impact de l'impression 3D.

Subventions et investissements

Les gouvernements ont consacré des centaines de millions de dollars à la recherche sur les technologies d'impression 3D et à leur adoption. En axant ces dotations et ces investissements sur la durabilité, on pourrait susciter un mouvement de fond dans le secteur. Par exemple, le Center for Bits and Atoms du MIT a été créé en 2001 grâce à une allocation de 13 millions USD de la Fondation nationale pour la science des États-Unis. Pour sa part, l'Espagne a accordé en 2004 plus de 21 millions EUR à la société Hewlett Packard pour financer des activités de recherche et développement dans le domaine de l'impression 3D. Au Royaume-Uni, plus de 60 millions GBP de fonds publics ont été consacrés en 2013 et 2014 à des projets dans le domaine de l'impression 3D. La Chine a pour sa part entrepris d'investir 1.5 milliard CNY (245 millions USD) dans le secteur sur sept ans. Aux États-Unis, enfin, le Président Obama a annoncé que 11 organismes publics, au travers desquels les petites entreprises du pays perçoivent plus de 2.5 milliards USD par an, s'engageaient à appuyer les programmes de soutien à l'innovation de fabricant (*innovation maker*).

Dans l'ensemble, ces dotations ne sont pas centrées sur la problématique de la durabilité environnementale. Si elles l'étaient, vu les sommes considérables en jeu, elles pourraient assurément orienter l'impression 3D vers une meilleure prise en compte de l'environnement, à l'image de ce qui s'est passé pour les industries des énergies propres (Veugelers, 2012).

Les dotations ou les allègements accordés dans le contexte universitaire peuvent être particulièrement efficaces pour accroître la part de marché des imprimantes plus respectueuses de l'environnement. Les étudiants qui apprennent leur métier sur une technologie ou une marque de produits particulière privilégient souvent celle-ci au cours de leur carrière ultérieure par un phénomène de persuasion et d'engagement (Cialdini, 1993). Des entreprises du calibre de Microsoft, Autodesk et Apple ont d'ailleurs su en tirer profit. Par ailleurs, les universités ont perçu des dizaines de millions de dollars de dotations publiques destinées à l'impression 3D. Si leur versement était subordonné par l'utilisation d'imprimantes respectueuses de certains écolabels ou à l'orientation des travaux de recherche vers la durabilité environnementale, cela aurait probablement un impact important. En outre, comme les étudiants ont tendance à être sensibilisés à l'environnement, les universités seraient sans doute plus faciles à convaincre d'accepter les restrictions imposées par ces critères que les administrations nationales.

L'investissement dans les matériaux d'impression 3D respectueux de l'environnement profiterait aussi vraisemblablement à d'autres secteurs, comme ceux qui recourent au moulage par injection et à d'autres procédés pour fabriquer des objets en plastique. Le bioplastique PLA, par exemple, peut être imprimé en 3D mais aussi moulé par injection, et certains matériaux nouveaux pourraient également être utilisables dans d'autres procédés de fabrication. Dans cette optique aussi, les biopolymères compostables et matériaux modulables pourraient présenter plus d'avantages que le recyclage des matériaux, car les propriétés nécessaires des matériaux varient souvent d'une méthode de fabrication à l'autre.

Programmes d'achat préférentiel

Les politiques d'écologisation des marchés publics peuvent faire évoluer les marchés, mais elles doivent s'appuyer sur des normes et des critères crédibles. Aux États-Unis comme dans d'autres états, du fait de l'importance de la commande publique, les mesures comme celles consistant à acquérir uniquement des ordinateurs certifiés EnergyStar dans l'administration ont effectivement eu un fort impact sur les marchés. Cependant, Li et Geiser ont constaté qu'une politique d'achat préférentiel ne pouvait être efficace seule et était tributaire d'autres instruments indépendants comme les écolabels (Li et Geiser, 2005). Pour éviter tout népotisme ou soupçon de népotisme et assurer une bonne intégration avec les autres politiques, les mécanismes d'achat préférentiel dans le domaine des imprimantes 3D devraient être adossés à des mesures objectives telles que des systèmes de certification tiers (écolabels).

Programmes volontaires d'écoblabilisation

L'écoblabilisation volontaire est sans doute une condition nécessaire, mais pas suffisante de l'écologisation du secteur de l'impression 3D. La feuille de route pour la fabrication additive (RAM) de 2009 préconisait des incitations publiques en faveur du développement d'indicateurs de durabilité environnementale (Bourell, Leu et Rosen, 2009). Les certifications peuvent avoir un puissant impact sur les marchés : à titre d'exemple, plus de 278 millions de mètres carrés de bâtiments ont obtenu la certification LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) (USGBC, 2008) et plus de 100 millions de produits certifiés EnergyStar sont vendus chaque année rien qu'aux États-Unis (Banerjee et Solomon, 2003). Sur beaucoup de marchés, la durabilité environnementale passe toutefois après le coût, la qualité et l'expérience utilisateur dans l'esprit des consommateurs (Ottman, Stafford et Hartman, 2006), et l'impression 3D fait aujourd'hui partie de ces marchés. Il n'en reste pas moins que les certifications volontaires peuvent devenir de puissants instruments avec l'appui de politiques d'achat préférentiel. Aux États-Unis, tous les bâtiments neufs doivent être certifiables LEED en vertu d'une mesure adoptée par le gouvernement fédéral, ce qui a eu un impact énorme sur les tendances en matière de construction dans le pays (Nelson, 2007). Le label volontaire devient le critère de référence des politiques contraignantes (ou d'achat préférentiel).

Dans le domaine des imprimantes 3D, les écolabels volontaires devraient se fonder sur plusieurs critères et comporter plusieurs niveaux de certification, à l'instar des systèmes EPEAT (Outil d'évaluation environnementale des produits électroniques) et LEED et des labels « du berceau au berceau ». La multiplicité des critères encourage les industriels à envisager la durabilité environnementale de façon globale, au lieu de chercher seulement à atténuer un impact particulier au risque d'en amplifier d'autres. La multiplicité des niveaux de certification encourage des améliorations de la part de ceux qui sont à la traîne mais aussi de

ceux qui sont à la pointe, alors qu'en cas de niveau unique, les acteurs se contentent de l'atteindre. Les critères de certification devraient recouvrir les différentes priorités stratégiques énumérées ci-avant concernant la conception des imprimantes, les matériaux et le fonctionnement. Le dispositif pourrait par exemple encourager l'efficacité énergétique en attribuant à chaque imprimante une note en fonction de sa consommation d'énergie par gramme de matériau imprimé. Étant donné la complexité de l'impression 3D, cette notation devrait probablement être établie sur la base d'un ensemble de pièces de référence et prendre en compte plusieurs facteurs : géométrie et disposition des pièces, exploitation du lit, etc. Des certifications distinctes pourraient être mises en place pour les concepteurs et pour les exploitants d'imprimantes 3D. Les seconds déterminent surtout le pourcentage d'exploitation du lit et le rapport entre durée d'impression et durée d'inactivité, tandis que les premiers déterminent surtout quels matériaux une imprimante peut utiliser.

Les cas de figure où le fort impact environnemental de la fabrication de pièces par impression 3D est compensé par les économies d'énergie que ces pièces permettent de réaliser en phase d'utilisation seront probablement trop difficiles à prédire ou à mesurer dans le cadre d'un système de certification portant sur la conception ou le fonctionnement des imprimantes. Au lieu d'essayer de prendre en compte ces cas de figure dans un écolabel ciblant les imprimantes 3D, il conviendrait de les traiter au travers des normes environnementales applicables au produit final, telles que les normes de consommation de carburant des véhicules. Si les pouvoirs publics choisissent d'utiliser des écolabels volontaires relatifs à l'impression 3D dans leurs politiques de marchés publics, des dérogations devraient être prévues pour ces cas.

Conclusion

L'impression 3D ou « fabrication additive » pourrait révolutionner les méthodes de fabrication industrielle en se substituant aux technologies traditionnelles et en élargissant l'accès aux moyens de production de biens manufacturés. Au cours de la prochaine décennie, sa montée en puissance dans de multiples secteurs pourrait avoir des avantages sur le plan de la durabilité environnementale, mais aussi des inconvénients. Par rapport à d'autres méthodes de fabrication, le bilan des avantages et des inconvénients sera sans doute plus complexe. L'impression 3D permet déjà de réduire dans certains cas les incidences environnementales en phase de fabrication (activités particulières de prototypage ou production en petite série, notamment) et en phase d'utilisation (allègement des pièces dans le secteur aérospatial, par exemple). Cependant, sauf exception, la durabilité environnementale n'a pas constitué une priorité pour les acteurs de l'industrie de l'impression 3D, et la plupart des imprimantes courantes fonctionnant en conditions normales ont d'ailleurs un plus fort impact que le moulage par injection dans le cadre de la fabrication en grande série de pièces en plastique.

Les incidences environnementales des technologies de fabrication d'aujourd'hui sont très variables et dépendent de la nature des pièces produites. À l'avenir, il conviendrait de réaliser des études pour comparer l'impression 3D à chaque technologie de premier plan qu'elle remplace dans le contexte de chacun des types de produits et matériaux concernés. De telles études faisant pour l'instant défaut, ce chapitre a examiné deux technologies de fabrication : l'usinage et le moulage par injection. Celles-ci ont été choisies parce qu'elles correspondent aux deux extrémités du spectre qui va de la création de prototypes uniques à la production en très grande série. Même dans ces conditions très balisées, les incidences environnementales des procédés d'impression 3D sont trop variables pour permettre de

formuler des conclusions tranchées. En conditions « typiques », les évaluations sur l'ensemble du cycle de vie montrent que la production d'une pièce creuse par impression 3D a moins de répercussions environnementales que sa fabrication par usinage à partir d'un bloc de plastique ou de métal, mais a plus de répercussions que sa fabrication en grande série au moyen du procédé de moulage par injection. Cependant, les résultats varient selon le type d'imprimante, son utilisation, la disposition des pièces, leur géométrie et d'autres facteurs, de sorte que le scénario typique se vérifie rarement.

En général, les incidences environnementales de l'impression 3D sont surtout imputables à sa consommation d'énergie. Elles sont aussi liées à un degré moindre à la toxicité des matériaux d'impression et aux ressources nécessaires pour les produire. Elles sont enfin le fait des déchets produits, dont une faible part est due à la production des imprimantes elles-mêmes. Certains systèmes expérimentaux ont d'ores et déjà un impact environnemental par pièce fabriquée nettement inférieur – peut-être inférieur de 70 % dans certains cas – à celui du moulage par injection. L'industrie ne semble toutefois pas portée vers ce genre de solutions, mais paraît s'orienter vers des systèmes qui ont des incidences beaucoup plus fortes (deux ou cinq fois plus fortes, voire plus) que le moulage par injection. Les politiques publiques devraient donc encourager le recours à des technologies plus respectueuses de l'environnement.

La diffusion de l'impression 3D à de nouvelles industries dépendra de l'évolution qui sera celle de cette technologie dans l'avenir proche en ce qui concerne la durée d'impression, les coûts, la qualité et la taille des réalisations, ainsi que le choix des matériaux. Le principal facteur habilitant ou au contraire inhibiteur se trouve être la charge financière liée à l'abandon des méthodes de production de masse au profit de l'impression tridimensionnelle, qui décrit une courbe hyperbolique et non linéaire. C'est pourquoi l'impression 3D se fait rapidement une place dans les industries où les coûts sont élevés et les volumes restreints, comme le prototypage, l'équipement automobile, l'aérospatiale et la production de certains instruments médicaux ; elle gagnera en revanche plus lentement celles où les coûts et les volumes sont d'importance moyenne, et ne pourra s'imposer que dans plusieurs décennies dans les industries caractérisées par des coûts bas et des volumes importants, à supposer qu'elle y parvienne un jour. L'expansion de l'impression 3D aura aussi des conséquences économiques en dehors du secteur manufacturier. Son automatisation contribuera à réduire plus encore l'emploi dans le secteur manufacturier et le réorientera vers d'autres secteurs, mais elle aura également pour effet de démocratiser la production et d'encourager l'entrepreneuriat. Dans les pays en développement, ce ne sont sans doute pas les plus démunis en milieu rural qui bénéficieront le plus de l'impression 3D ; son principal avantage sera plutôt d'aider les entrepreneurs urbains qui n'ont guère accès au capital à se lancer dans la fabrication à petite échelle et à autofinancer ensuite leur évolution vers une production de masse à bas coût.

Comme on l'a vu, l'impression 3D permet de mettre certaines incitations économiques en phase avec les incidences environnementales en rendant onéreuse la consommation de matières et quasiment gratuite la complexité, ce qui pousse à perfectionner la conception pour réduire cette consommation et la production de déchets. Les exploitants ont en outre une incitation économique à abaisser la consommation d'énergie des machines en réduisant la durée d'impression, ce qui n'est toutefois pas le cas des concepteurs. Enfin, il y a un alignement des incitations économiques en ce sens que l'impression 3D favorise une production au plus juste en éliminant les économies d'échelle qui sont propices à la surproduction. Cela étant, comme elles permettent d'imprimer facilement des objets, les

imprimantes 3D de bureau auront aussi un peu l'effet inverse et encourageront une certaine surproduction, à l'image de l'augmentation de la consommation de papier qui avait suivi à l'époque l'arrivée des imprimantes papier dans les bureaux (mais heureusement dans des proportions bien moindres). Abstraction faite de ces incitations économiques, l'impression 3D permet d'expérimenter des matériaux et peut ainsi encourager le recours à des matériaux plus respectueux de l'environnement. Elle offre des possibilités de réduire fortement la consommation d'énergie en remplaçant les procédés de fusion par des procédés chimiques. Les incitations du marché en faveur de l'utilisation de matériaux respectueux de l'environnement et de procédés économes en énergie sont toutefois faibles, voire inexistantes.

- En premier lieu, l'impression 3D peut aligner les incitations économiques sur les incidences environnementales, encourageant l'abaissement de la consommation d'énergie et de matières par le perfectionnement de la conception. Cet alignement découle aussi en partie du fait qu'elle crée les conditions d'une production au plus juste.
- En second lieu, l'impression 3D peut rendre possibles des choix de matériaux plus conformes aux impératifs de durabilité environnementale, car :
 - ❖ elle permet de mettre en forme de nombreux matériaux avec une facilité que seules les matières plastiques autorisaient auparavant
 - ❖ elle abaisse les obstacles au remplacement d'un matériau par un autre en réduisant les économies d'échelles ; elle peut permettre d'employer des intrants chimiques en plus faible quantité tout en faisant davantage varier les propriétés des matériaux, grâce à différents procédés d'impression
 - ❖ elle réduit les coûts de main-d'œuvre et peut ainsi permettre d'employer des matériaux plus onéreux tout en abaissant le coût de production total.
- En troisième lieu, les pièces imprimées en 3D peuvent réduire l'impact de certains produits en phase d'utilisation, et afficher ainsi un bilan globalement positif sur l'ensemble de leur durée de vie même si leur fabrication a plus d'incidences sur l'environnement. Cela peut prendre deux formes :
 - ❖ l'impression de pièces de rechange pour des produits obsolètes qui autrement finiraient au rebut faute de chaînes d'approvisionnement pour les pièces détachées
 - ❖ l'allègement des véhicules ou l'amélioration par d'autres moyens du rendement énergétique d'un produit au cours de son utilisation. Les économies d'énergie ainsi réalisées peuvent l'emporter largement sur les incidences occasionnées par la fabrication, notamment dans le secteur aérospatial.

Enfin, l'impression 3D peut avoir des retombées sociales bénéfiques par la démocratisation de la production. Pour que ces avantages se concrétisent à l'échelle voulue, les politiques publiques devraient cibler des facteurs spécifiques aux différentes technologies qui sont mis en évidence dans ce chapitre.

Les avantages environnementaux de l'impression 3D ne sont pas acquis d'avance, leur réalisation doit être encouragée. Par exemple, l'impression 3D ne favorise pas intrinsèquement le recyclage des matières, et beaucoup de matériaux et de méthodes d'impression ont d'ailleurs l'effet inverse. Si certains ont mis au point des solutions expérimentales de recyclage des matières plastiques destinées aux imprimantes de bureau, il y a peu de chances qu'elles soient appliquées à grande échelle étant donné les difficultés de tri des matériaux. À long terme, les forces du marché pourraient encourager le recours à des matériaux compostables, d'autant que la tendance est aux imprimantes capables de

produire des pièces constituées de plusieurs matériaux. Il existe aujourd'hui déjà de nombreux matériaux imprimables compostables. Cela étant, la valorisation énergétique des matériaux par leur incinération peut constituer une autre solution, qui a l'avantage d'éviter certains problèmes que peut poser l'emploi de plastiques compostables.

L'impression 3D peut encourager une utilisation rationnelle des matières et de l'énergie par une production au plus juste. L'emploi de matériaux recyclables pourrait aussi constituer un objectif de l'action des pouvoirs publics. Un autre avantage environnemental très concret pourrait découler de la légalisation de l'impression de pièces détachées pour les produits existants, qui permettrait de prolonger la durée de vie des produits pour lesquels les fabricants n'en proposent plus.

Quant aux effets négatifs de l'impression 3D sur l'environnement, ils sont en grande partie liés à la consommation d'énergie, à la toxicité et au choix des matériaux. Comme le montrent des analyses d'impact sur le cycle de vie réalisées selon la méthode ReCiPe, certaines technologies permettent aujourd'hui de réduire radicalement ces incidences et de les ramener à un niveau inférieur d'environ 70 % par pièce produite à celui du moulage par injection, et ce en faisant appel à des procédés économes en énergie et à des ingrédients disponibles en abondance, non toxiques, renouvelables et compostables possédant des propriétés physiques modulables. Les premières constatations tendent à indiquer que l'effet net sur l'environnement dépend d'un certain nombre de variables : type d'imprimante, modalités d'utilisation, disposition et géométrie des pièces, etc. Cela étant dit, l'impression 3D possède un fort potentiel de durabilité environnementale.

Pour favoriser la durabilité dans le domaine de l'impression 3D, les pouvoirs publics devraient avant tout encourager l'emploi de procédés sobres en énergie et de matériaux ayant une faible empreinte environnementale et des caractéristiques de fin de vie intéressantes. De par leur conception et leur fonctionnement, les imprimantes peuvent réduire la consommation d'énergie par unité produite grâce : à l'utilisation de procédés chimiques à la place de la fusion de matériaux ; à la mise en veille automatique lors des arrêts de production ; et à l'optimisation de leur utilisation (partage d'imprimantes entre utilisateurs et, pour certains modèles, impression simultanée de plusieurs pièces). Par matériaux à faible empreinte environnementale, on entend des matériaux qui sont non toxiques, abondants et renouvelables, et qui ont une faible teneur en énergie grise et une utilité en fin de vie. Les moyens de réduire l'impact environnemental des matériaux sont notamment l'emploi de biopolymères compostables permettant des impressions de haute qualité et, comme indiqué plus haut, le remplacement des procédés de fusion par la soudure chimique. Les imprimantes peuvent aussi, de par leur conception et leur fonctionnement, limiter la production de déchets en réduisant les besoins en matériaux de support, en permettant la production de pièces creuses et en évitant les ratés d'impression. En plus de ces priorités, les pouvoirs publics devraient faire en sorte qu'il soit possible d'imprimer des pièces de rechange pour les produits obsolètes pour lesquels il n'existe pas de chaîne d'approvisionnement, en levant les obstacles liés aux droits de propriété intellectuelle.

À cette fin, ils devraient notamment cibler les subventions financières ou les investissements (dans le cadre des programmes existants ou à venir) sur la commercialisation des résultats des travaux de recherche allant dans ce sens. Ils pourraient aussi faire appel à un système de certification volontaire permettant de noter les imprimantes 3D en fonction de leur compatibilité environnementale, mesurée à l'aune de différents critères, à l'image des certifications EPEAT, « du berceau au berceau » ou LEED. Ce

système pourrait s'accompagner de programmes d'achat préférentiel au sein des administrations et d'autres grandes institutions.

L'impression 3D possède un fort potentiel en matière de durabilité environnementale. Même si deux des principaux avantages qui lui sont souvent prêtés à cet égard – élimination des déchets et élimination des besoins de transport – sont en grande partie fictifs, elle est porteuse de nombreux bienfaits potentiels qui ne demandent qu'à être concrétisés.

La généralisation de l'impression 3D telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui ne serait pas forcément toujours bénéfique pour l'environnement, mais il existe déjà des technologies qui, si elles cessaient d'être marginales pour devenir la norme dans l'industrie, pourraient contribuer à rendre la fabrication nettement plus durable. Comme le secteur connaît aujourd'hui une croissance rapide qui pourrait déterminer sa trajectoire d'évolution au cours des prochaines décennies, les mesures que prendront les pouvoirs publics maintenant pourraient avoir une influence considérable.

En l'état actuel des choses, l'impression 3D n'a pas un bilan environnemental net positif. Il faut accompagner son passage de la périphérie jusqu'au cœur de l'industrie manufacturière par des politiques rigoureuses axées sur l'environnement, tout en évitant de lui réserver un traitement particulier. Le secteur se trouve aujourd'hui à la croisée des chemins, et des initiatives judicieuses prises aujourd'hui peuvent permettre d'installer pour des décennies des technologies bénéfiques et faire de l'impression 3D un facteur clé d'un avenir plus durable.

Note

1. L'usinage n'est pas mentionné en tant que tel dans les tableaux entrées-sorties correspondants (BEA, 2014). Dans ces estimations, nous prenons en compte le poids d'une série de secteurs rattachés à l'usinage (ateliers d'usinage ; fabrication de produits tournés, de vis, d'écrous et de boulons ; fabrication de machines pour le découpage et le façonnage des métaux ; fabrication d'accessoires pour machines-outils à couper le métal, laminoirs et autres machines à travailler les métaux ; fabrication d'articles de quincaillerie ; fabrication d'autres produits métalliques) dans le chiffre d'affaires total de l'industrie manufacturière. En 2007, les activités liées à l'usinage représentaient environ 0.05 % de ce total (BEA, 2014).

Références

- 3D Systems (2012), « Material safety data sheet for Accura® ABS White (SL 7810) », manuel technique actualisé le 12 novembre 2014, www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/24511-s12-03-a-sds-ghs-english-accura-abs-white-sl-7810.pdf.
- Andrews, R. et al. (1999), « Continuous production of aligned carbon nanotubes: A step closer to commercial realization », *Chemical Physics Letters*, vol. 303, pp. 467-474, Elsevier, Amsterdam, [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2614\(99\)00282-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2614(99)00282-1).
- Apple (2014), « iPhone 6 Environmental Report », www.apple.com/environment/reports/docs/iPhone6_PER_Sept2014.pdf (consulté le 2 février 2015).
- Askin, R.G. et J.B. Goldberg (2007), *Design and Analysis of Lean Production Systems*, John Wiley & Sons, New York.
- Atzeni, E. et A. Salmi (2012), « Economics of additive manufacturing for end-usable metal parts », *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, Springer Verlag, Londres, pp. 1147-1155, <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3878-1>.
- Baechler, C., M. DeVuono et J.M. Pearce (2013), « Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock », *Rapid Prototyping Journal*, vol. 19, Emerald Group Publishing, pp. 118-125, <http://dx.doi.org/10.1108/13552541311302978>.

- Bammani, S.S, P.R. Birajdar et S.S. Metan (2012), « Dental Crown Manufacturing using Stereolithography Method », *Proceedings of International Conference on Advances in Industrial and Production Engineering*, pp. 7-10, <http://searchdl.org/index.php/conference/downloadPDF/555>.
- Banerjee, A. et B.D. Solomon (2003), « Eco-labeling for energy efficiency and sustainability: A meta-evaluation of US programs », *Energy Policy*, vol. 31, Elsevier, Amsterdam, pp. 109-123, [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00012-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00012-5).
- Baumers, M. et al. (2013), « Transparency Built-in », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 17, John Wiley & Sons, New York, pp. 418-431, <http://dx.doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00512.x>.
- Baumers, M. et al. (2011a), « Sustainability of additive manufacturing: Measuring the energy consumption of the laser sintering process », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, vol. 225, n° 12, pp. 2228-2239, Institution of Mechanical Engineers, <http://dx.doi.org/10.1177/0954405411406044>.
- Baumers, M. et al. (2011b), « Energy inputs to additive manufacturing: Does capacity utilization matter? », *Proceedings of the 2011 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 30-40.
- Baumers, M., M. Holweg et J. Rowley (2016), « The economics of 3D printing: A total cost perspective », rapport de projet, Université de Nottingham.
- BEA (Bureau of Economic Analysis) (2014), « Use of commodities by industry valued at producers' prices, 2007 », *Input-Output Accounts Data*, (base de données), Bureau of Economic Analysis, www.bea.gov/industry/io_annual.htm.
- Beyer, C. (2014), « Strategic Implications of Current Trends in Additive Manufacturing », *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 136, The American Society of Mechanical Engineers, <http://dx.doi.org/10.1115/1.4028599>.
- Bhasin, V. et M.R. Bodla (2014), « Impact of 3D printing on global supply chains by 2020 », thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
- Biggs, J. (2013), « The upcycling Filabot turns regular plastic scrap into 3D printer filament », *TechCrunch*, <http://social.techcrunch.com/2013/01/13/the-upcycling-filabot-turns-regular-plastic-scrap-into-3d-printer-filament/> (consulté le 29 janvier 2015).
- Birtchnell, T. et W. Hoyle (2014), *3D Printing for Development in the Global South: The 3D4D Challenge*, Palgrave Macmillan, Londres, <http://dx.doi.org/10.1057/9781137365668>.
- Bjorn, A. et H. MacLean (2003), « A comparison of US and Canadian industry environmental performance using EIO-LCA models », communication présentée à la conférence InLCA/LCM, Seattle, 27 septembre, <http://documentslide.com/documents/a-comparison-of-us-and-canadian-industry-environmental-performance-using-eio-lca.html>.
- Bohm, R.A. et al. (2010), « The costs of municipal waste and recycling programs », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, Elsevier, Amsterdam, pp. 864-871, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.005>.
- Bot, B.L. et C.-S. Neumann (2003), « Growing pains for logistics outsourcers », *McKinsey Quarterly*, vol. 2, McKinsey & Company, pp. 68-77.
- Bourell, D.L., M.C. Leu et D.W. Rosen (2009), « Roadmap for additive manufacturing: Identifying the future of freeform processing », compte rendu du 2009 Roadmap for Additive Manufacturing Workshop, The University of Texas at Austin, <http://wohlersassociates.com/roadmap2009A.pdf>.
- Campbell, T.A. et O.S. Ivanova (2013), « 3D printing of multifunctional nanocomposites », *Nano Today*, vol. 8, Elsevier, Amsterdam, pp. 119-120, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nantod.2012.12.002>.
- Cialdini, R.B. (1993), *Influence: The Psychology of Persuasion*, revised edition, HarperCollins, New York.
- Coetzee, G. (2011), « Thingiverse receives first DMCA takedown », <http://hackaday.com/2011/02/20/thingiverse-receives-first-dmca-takedown/> (consulté le 1 février 2015).
- Cohen, D., M. Sargeant et K. Somers (2014), « 3-D printing takes shape », *McKinsey Quarterly*, vol. 1, McKinsey & Company, pp. 1-6.
- Conner, B.P. et al. (2014), « Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services », *Additive Manufacturing*, édition inaugurale, vol. 1-4, Elsevier, Amsterdam, pp. 64-76, <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.005>.
- Dahmus, J.B. et T.G. Gutowski (2007), « What gets recycled: An information theory based model for product recycling », *Environmental Science & Technology*, ACS Publications, vol. 41, pp. 7543-7550, <http://dx.doi.org/10.1021/es062254b>.

- Dankhoff, W.F. (1963), « The M-1 Rocket Engine Project », NASA technical memorandum X-50854, NASA, Washington, DC.
- Davidson, P. (2012), « 3-D printing could remake US manufacturing », *USA Today*, 10 juillet, <http://usatoday30.usatoday.com/money/industries/manufacturing/story/2012-07-10/digitalmanufacturing/56135298/1>.
- Davis, J. (2014), « This is the world's first 3D printed electric car », *Business Insider*, www.businessinsider.com/this-is-the-worlds-first-3d-printed-electric-car-2014-12#ixzz3QB6iqz5x (consulté le 15 janvier 2015).
- Dichter, T.W. (2003), *Despite Good Intentions: Why Development Assistance to the Third World Has Failed*, University of Massachusetts Press, Amherst.
- Dotchev, K. et W. Yusoff (2009), « Recycling of polyamide 12 based powders in the laser sintering process », *Rapid Prototyping Journal*, vol. 15, Emerald Group Publishing Limited, pp. 192-203, <http://dx.doi.org/10.1108/13552540910960299>.
- Ecofys (2013), « World GHG emissions flow chart 2010 », www.ecofys.com/files/files/asn-ecofys-2013-world-ghg-emissions-flow-chart-2010.pdf (consulté le 10 mars 2014).
- Ecovative (N.D.), « Mushroom Packaging », www.ecovativedesign.com/mushroom-packaging (consulté le 22 octobre 2016).
- Fairs, M. (2013), « Mycelium Chair by Eric Klarenbeek is 3D-printed with living fungus », www.dezeen.com/2013/10/20/mycelium-chair-by-eric-klarenbeek-is-3d-printed-with-living-fungus/ (consulté le 20 février 2017).
- Faludi, J. et al. (2015a), « Comparing environmental impacts of additive manufacturing vs. traditional machining via life-cycle assessment », *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, Emerald Group Publishing Limited, pp. 14-33, <http://dx.doi.org/10.1108/RPJ-07-2013-0067>.
- Faludi, J. et al. (2015b), « Does material choice drive sustainability of 3D printing? », *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, vol. 9, n° 2, World Academy of Science, Engineering and Technology, pp. 216-223.
- Faludi, J. et al. (2014), « Sustainability of 3D printing vs. machining: Do machine type & size matter? », *Proceedings of the 2014 EcoBalance Conference*, Tsukuba, www.researchgate.net/publication/271080648_Sustainability_of_3D_Printing_vs_Machining_Do_Machine_Type_Size_Matter.
- Faludi, J., M.D. Lepech et G. Loisos (2012), « Using life cycle assessment methods to guide architectural decision-making for sustainable prefabricated modular buildings », *Journal of Green Building*, vol. 7, College Publishing, pp. 151-170, <http://dx.doi.org/10.3992/jgb.7.3.151>.
- Freedman, D.H. (2011), « Layer by layer », *MIT Technology Review*, 19 décembre, www.technologyreview.com/s/426391/layer-by-layer/.
- Frischknecht, R. et al. (2005), « The ecoinvent database: Overview and methodological framework », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 10, Springer, Heidelberg, pp. 3-9, <http://dx.doi.org/10.1065/lca2004.10.181.1>.
- Gill, K. (2009), *Of Poverty and Plastic: Scavenging and Scrap Trading Entrepreneurs in India's Urban Informal Economy*, Oxford University Press, <http://dx.doi.org/10.1093/acprof:oso/9780198060864.001.0001>.
- Goedkoop, M.J. et al. (2009), « ReCiPe 2008, a life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation », *Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu*, La Haye, www.lcia-recipe.net.
- Granta Design (2009), « Granta CES EduPack », www.grantadesign.com/education/datasheets/ABS.htm (consulté le 19 janvier 2015).
- Grenchus, E. et al. (1998), « Linking demanufacturing operations with product DFE initiatives », *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, pp. 270-274, <http://dx.doi.org/10.1109/ISEE.1998.675070>.
- Grossman, B. (2003), « Oldest News », www.bathsheba.com/artist/news_old_0.html (consulté le 1 mai 2015).
- Hanssen, O.J. (1998), « Environmental impacts of product systems in a life cycle perspective: A survey of five product types based on life cycle assessments studies », *Journal of Cleaner Production*, vol. 6, Elsevier, Amsterdam, pp. 299-311, [http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526\(98\)00031-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00031-6).
- Hendrickson, C. et al. (1998), « Economic input-output models for environmental life-cycle assessment », *Environmental Science & Technology*, vol. 32, American Chemical Society, pp. 184A-191A, <http://dx.doi.org/10.1021/es983471i>.

- Hornick, J. et D. Rol (2013), « Many 3D printing patents are expiring soon: Here's a round up & overview of them », <http://3dprintingindustry.com/2013/12/29/many-3d-printing-patents-expiring-soon-heres-round-overview/> (consulté le 4 février 2015).
- Hunter, P. (2013), « Transparency, Product Disclosures, and Reducing Embodied Carbon and Energy », communication présentée à la conférence Buildex 2013, Vancouver.
- Kellens, K. et al. (2011), « Energy and resource efficiency of SLS/SLM processes », *Proceedings of the 2011 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1-16.
- Khoshnevis, B. et al. (2012), « Contour crafting simulation plan for lunar settlement infrastructure buildup », *Earth and Space 2012: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, pp. 1458-1467, <http://dx.doi.org/10.1061/9780784412190.155>.
- Kilner, G.E. (1993), « Biodegradable and recyclable electrostatically shielded packaging for electronic devices and media », Brevet US 5177660, délivré le 5 janvier 1993.
- Kong, Y.L. et al. (2014), « 3D printed quantum dot light-emitting diodes », *Nano Letters*, vol. 14, ACS Publications, pp. 7017-7023, <http://dx.doi.org/10.1021/nl5033292>.
- Krassenstein, E. (2014), « Filabot launches incredible new 3D printing filaments – Graphite infused ABS, carbon nano tube & more », <http://3dprint.com/13724/filabot-new-filaments-graphite/> (consulté le 29 janvier 2015).
- Kreiger, M. et al. (2013), « Distributed recycling of post-consumer plastic waste in rural areas », *MRS Proceedings*, vol. 1492, Cambridge University Press, pp. 91-96.
- Kreiger, M. et J.M Pearce (2013), « Environmental life cycle analysis of distributed three-dimensional printing and conventional manufacturing of polymer products », *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 1, ACS Publications, pp. 1511-1519, <http://dx.doi.org/10.1021/sc400093k>.
- Larsen, B.M. et R. Nesbakken (1997), « Norwegian emissions of CO₂ 1987-1994: A study of some effects of the CO₂ tax », *Environmental and Resource Economics*, vol. 9, pp. 275-290, <http://dx.doi.org/10.1023/A:1026464129609>.
- Liaukus, C. (2014), « Energy efficiency measures to incorporate into remodeling projects », National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, www.nrel.gov/docs/fy15osti/63154.pdf.
- Li, L. et al. (2011), « Laser nano-manufacturing – State of the art and challenges », *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 735-755, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.005>.
- Li, L. et K. Geiser (2005), « Environmentally responsible public procurement (ERPP) and its implications for integrated product policy (IPP) », *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, pp. 705-715, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.01.007>.
- Matos, G.R. (2012), « Use of Raw Materials in the United States From 1900 Through 2010 », US Geological Survey, <https://pubs.usgs.gov/fs/2012/3140/pdf/fs2012-3140.pdf>.
- Mayers, C.K. (2007), « Strategic, financial, and design implications of extended producer responsibility », *Europe: A Producer Case Study, Journal of Industrial Ecology*, vol. 11, pp. 113-131, <http://dx.doi.org/10.1162/jiec.2007.1228>.
- McDonald, S. (2016), « 3D printing: A future collapse-compliant means of production », *Proceedings of the Second Workshop on Computing within Limits*, ACM, p. 4.
- McKenna, B. (2014), « 3D systems plans 50X speed increase for Google's Project Ara », www.fool.com/investing/general/2014/06/13/3d-systems-plans-50x-speed-increase-for-googles-pr.aspx (consulté le 1 octobre 2015).
- McKinsey Global Institute (2012), « Manufacturing the Future: The Next Era of Global Growth and Innovation », www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-future-of-manufacturing.
- Meindl, J.D. (2003), « Beyond Moore's Law: The interconnect era », *Computing in Science & Engineering* vol. 5, pp. 20-24, <http://dx.doi.org/10.1109/MCISE.2003.1166548>.
- Microsoft (2016), « Getting started guide – Microsoft Standard Driver for 3D Printers », <https://msdn.microsoft.com/en-us/windows/hardware/drivers/3dprint/microsoft-standard-driver-for-3d-printers->.
- Miettinen, J. et al. (2008), « Inkjet printed System-in-Package design and manufacturing », *Microelectronics Journal*, vol. 39, pp. 1740-1750, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mejo.2008.02.014>.
- Mogas-Soldevila, L., J. Duro-Royo et N. Oxman (2014), « Water-based robotic fabrication: Large-scale additive manufacturing of functionally graded hydrogel composites via multichamber extrusion », *3D Printing and Additive Manufacturing*, vol. 1, pp. 141-151, <http://dx.doi.org/10.1089/3dp.2014.0014>.

- Molitch-Hou, M. (2015), « Hershey & 3D Systems Unveil New Cutting-Edge Chocolate 3D Printer at CES », <https://3dprintingindustry.com/news/hershey-3d-systems-unveil-new-cutting-edge-chocolate-3d-printer-ces-39279/> (consulté le 8 avril 2015).
- Morrow, W.R. et al. (2007), « Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing », *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, pp. 932-943, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.030>.
- Mraz, S. (2004), « Care and feeding of living hinges », <http://machinedesign.com/fasteners/care-and-feeding-living-hinges> (consulté le 1 mai 2015).
- Nelson, A. (2007), « The greening of US investment real estate-market fundamentals, prospects and opportunities », RREEF Research, San Francisco.
- Olmsted, B.A. et M. Davis (2001), *Practical Injection Molding*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Ottman, J.A., E.R. Stafford et C.L. Hartman (2006), « Avoiding green marketing myopia: Ways to improve consumer appeal for environmentally preferable products », *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 48, pp. 22-36, <http://dx.doi.org/10.3200/ENVT.48.5.22-36>.
- Oxman, N. (2010), « Structuring materiality: Design fabrication of heterogeneous materials », *Architectural Design*, vol. 80, pp. 78-85, <http://dx.doi.org/10.1002/ad.1110>.
- Parnell, M.P. (2007), « From Gutenberg to Gates: A study of socio-technical change in the Edinburgh printing industry », thèse de doctorat, Edinburgh Napier University.
- Possamai, O. (2007), « A model of evaluation of design for disassembly », *Product: Management & Development*, vol. 5, pp. 133-139.
- Post, H. (2014), « SpaceX completes qualification testing of SuperDraco Thruster », SpaceX, www.spacex.com/press/2014/05/27/spacex-completes-qualification-testing-superdraco-thruster (consulté le 1 mai 2015).
- Ray, S.S. (2013), *Environmentally Friendly Polymer Nanocomposites: Types, Processing and Properties*, Elsevier, Amsterdam.
- Renkow, M. et A.R. Rubin (1998), « Does municipal solid waste composting make economic sense? », *Journal of Environmental Management*, vol. 53, p. 339-347, <http://dx.doi.org/10.1006/jema.1998.0214>.
- Rolland, J.P. et J.M. Desimone (2016), « Acceleration of Stereolithography », Brevet US US20160046072A1, délivré le 18 février 2016.
- Rossi, M. et A. Blake (2014), « The Plastics Scorecard: Evaluating the chemical footprint of plastics », Clean Production Action, Somerville, www.bizngo.org/sustainable-materials/plastics-scorecard.
- Sculpteo (2014), « A Sculpteo guide to cost efficiency through short series manufacturing », www.sculpteo.com/static/0.30.056/download/ebooks/Sculpteo%20Guide%20to%20Manufacturing.pdf.
- Serres, N. et al. (2011), « Environmental comparison of MESO-CLAD® process and conventional machining implementing life cycle assessment », *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, pp. 1117-1124, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.010>.
- Sevenson, B. (2014), « ExtrusionBot launches their EB2 3D printer filament extruder model – Extrudes at 6.5 feet/min », <http://3dprint.com/22505/extrusionbot-2-3d-print/> (consulté le 29 janvier 2015).
- Silverbrook, K. (2004), « 3-D product printing system incorporating an electrical connection printhead », Brevet US 7220115, délivré le 9 janvier 2004.
- Slotwinski, J.A. et al. (2014), « Characterization of metal powders used for additive manufacturing », *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 119, pp. 460-493, <http://dx.doi.org/10.6028/jres.119.018>.
- Sreetharan, P.S. et al. (2012), « Monolithic fabrication of millimeter-scale machines », *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 22, n° 5, IOP Publishing, <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0960-1317/22/5/055027>.
- Starr, M. (2015), « World's first 3D-printed apartment building constructed in China », CNet, www.cnet.com/news/worlds-first-3d-printed-apartment-building-constructed-in-china/ (consulté le 28 janvier 2015).
- Stephens, B. et al. (2013), « Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers », *Atmospheric Environment*, vol. 79, pp. 334-339, Elsevier, Amsterdam, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.050>.
- Stephenson, N. (2003), *The Diamond Age*, Spectra, New York.

- Stratasys (2015), « Objet1000 Plus Datasheet », http://global72.stratasys.com/~media/Main/Files/Machine_Spec_Sheets/PSS_PJ_Obj1000Plus.pdf#_ga=1.79659220.1120333980.1490027223.
- Sun, K. et al. (2013), « 3D printing of interdigitated li-ion microbattery architectures », *Advanced Materials*, vol. 25, pp. 4539-4543, <http://doi:10.1002/adma.201301036>.
- Svoboda, M.A. et al. (2000), « Zelfo – An engineering material fully based on renewable resources », *Molecular crystals and liquid crystals science and technology. Section A. Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 353, pp. 47-58, <http://dx.doi.org/10.1080/10587250008025647>.
- Tavassoli, S. (2013), « Manufacturing renaissance: Return of manufacturing to western countries », in *Green Design, Materials and Manufacturing Processes*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Telenko, C. et C.C. Seepersad (2012), « A comparison of the energy efficiency of selective laser sintering and injection molding of nylon parts », *Rapid Prototyping Journal*, vol. 18, n° 6, pp. 472-481, <http://doi:10.1108/13552541211272018>.
- Thiriez, A. et T. Gutowski (2006), « An environmental analysis of injection molding », *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on IEEE*, pp. 195-200.
- Townsend, M. (2012), « Nike sock-like Flyknit transforming shoes on share surge », Bloomberg Business, www.bloomberg.com/news/articles/2012-03-07/nike-sock-like-flyknit-transforming-shoes-as-shares-rise-retail (consulté le 20 janvier 2015).
- Ultimaker (2016), « Cura 3D printing slicing software |Ultimaker », <https://ultimaker.com/en/products/cura-software> (consulté le 22 octobre 2016).
- US EIA (2014), « How much oil is used to make plastic? », US Energy Information Administration, Washington, DC, www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=34&t=6 (consulté le 28 janvier 2015).
- USGBC (United States Green Building Council) (2008), « Green building by the numbers », *Green Building*, vol. 202, pp. 828-7422.
- Van Wijk, A.J.M. et I. Van Wijk (2015), *3D Printing with biomaterials: Towards a sustainable and circular economy*, IOS Press, Amsterdam, <http://doi:10.3233/978-1-61499-486-2-i>.
- Veugelers, R. (2012), « Which policy instruments to induce clean innovating? », *Research Policy*, vol. 41, n° 10, pp. 1770-1778, <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2012.06.012>.
- Vink, E.T.H. (2007), « The eco-profiles for current and near-future NatureWorks® polylactide (PLA) production », *Industrial Biotechnology*, vol. 3, pp. 58-81, <http://doi:10.1089/ind.2007.3.058>.
- Vink, E.T.H. et al. (2003), « Applications of life cycle assessment to NatureWorks™ polylactide (PLA) production », *Polymer Degradation and Stability*, vol. 80, pp. 403-419, [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00372-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00372-5).
- Wainwright, O. (2014), « Work begins on the world's first 3D-printed house », 28 mars, www.theguardian.com/artanddesign/architecture-design-blog/2014/mar/28/work-begins-on-the-worlds-first-3d-printed-house (consulté le 28 janvier 2015).
- White, G. et D. Lynskey (2013), « Economic analysis of additive manufacturing for final products: An industrial approach », Université de Pittsburgh.
- Within (2011), « Case Study: Liquid Lattice », page Internet, Withinlab.com, Within Technologies Ltd., <http://withinlab.com/case-studies/index7.php> (consulté le 1 mai 2015).
- Wohlers, T. (2014), *Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry*, Wohlers Associates, Fort Collins, CO.
- Yadav, T., R. Dirstine et K. Pfaffenbach (2004), « High purity fine metal powders and methods to produce such powder », Brevet US 6786950 B2, délivré le 7 septembre 2004.
- Yoon, H.-S. et al. (2014), « A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study », *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 1, pp. 261-279, <http://doi:10.1007/s40684-014-0033-0>.

PARTIE I

Chapitre 6

Révolutionner la conception et le fonctionnement des produits grâce à l'innovation dans les matériaux

par

David L. McDowell

Regents' Professor et titulaire de la chaire de transformation des métaux
Carter N. Paden, Jr., et directeur exécutif de l'Institute for Materials,
au Georgia Institute of Technology

Accélérer la découverte de matériaux nouveaux et le développement de matériaux afin d'améliorer la conception de produits et faciliter la personnalisation de masse à l'aide des technologies émergentes comme l'impression 3D. Cela est désormais possible grâce aux avancées réalisées sur plusieurs fronts, avec l'amélioration des instruments scientifiques, l'alliance de l'informatique à hautes performances avec des modèles prédictifs de la structure et des propriétés des matériaux, ou encore l'analyse de données. Jusqu'à présent, il fallait compter 15 à 20 ans entre la découverte d'un matériau en laboratoire et son utilisation dans la fabrication de produits. En cette nouvelle ère du numérique, les méthodes systématiques employées pour accélérer les processus de découverte et de développement des matériaux n'en sont qu'à leurs débuts. À terme, on devrait disposer de l'écosystème nécessaire pour croiser les nouveaux matériaux avec les technologies de fabrication numérique de façon à conférer de nouvelles fonctionnalités aux produits. Ce chapitre passe en revue un certain nombre d'initiatives engagées, de lacunes à combler et l'intervention des politiques publiques dans ce cadre.

Introduction

De tout temps, découvrir des matériaux et faire en sorte qu'ils répondent aux exigences du marché a été un exercice laborieux, itératif et intuitif, guidé par une certaine idée des nouveaux produits ou des améliorations dont les consommateurs auraient besoin. Par convention, cet exercice consiste à : i) définir un concept de matériau nouveau ou amélioré ; ii) obtenir le matériau voulu en laboratoire par expérimentation suivant la « méthode d'Edison » ; iii) mesurer les propriétés recherchées ; et iv) répéter, améliorer et affiner. Malheureusement, ainsi qu'il ressort de l'initiative pour le génome des matériaux (MGI, Materials Genome Initiative) menée aux États-Unis, cette façon de procéder signifie généralement qu'il faut attendre 15 à 20 ans avant d'obtenir des applications commercialement viables et au moins 20 ans de plus leur acceptabilité sociale (Kalil et Wadia, 2011 ; Holdren, 2014).

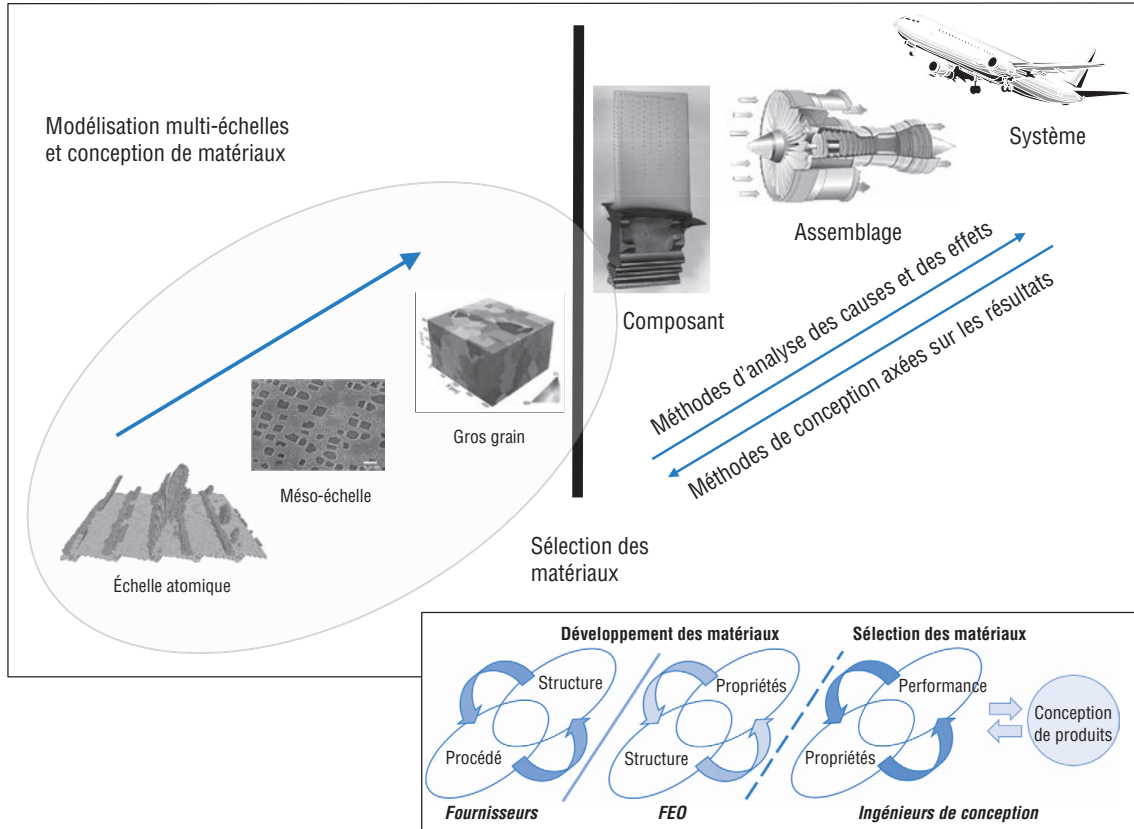
Au cours de la prochaine révolution de la production, les ingénieurs concevront conjointement les produits et leurs matériaux de fabrication (McDowell, 2007 ; Teresko, 2008). Le graphique 6.1 montre les différents niveaux hiérarchiques de la structure des matériaux (de l'atome au composant) et les réponses qui y sont associées sont traités comme un sous-système. Pour ce qui est de l'organisation, ce même graphique distingue (en bas à droite), outre la séparation traditionnelle entre l'élaboration des matériaux et la certification de leurs propriétés au stade du développement, la sélection des matériaux qui intervient lors de la conception du produit, considéré ici comme un système. Dans le système traditionnel, les matériaux sont mis au point au niveau de la chaîne d'approvisionnement de manière à présenter les propriétés prescrites par les concepteurs des systèmes en collaboration avec les fabricants d'équipement d'origine (FEO) et ce sont généralement les concepteurs qui sélectionnent les matériaux les plus aptes à entrer dans la fabrication des produits. Dans le nouveau monde des matériaux sur mesure, le lien entre chaîne d'approvisionnement en matériaux et OEM/concepteurs va se resserrer jusqu'à ce que la structure hiérarchique des matériaux sera personnalisée aux produits à laquelle ils sont destinés (graphique 6.1).

Selon toute vraisemblance, au XXI^e siècle, le croisement des données massives, avec l'infrastructure et les technologies existantes transformera les moyens de communication, de transport et de commercer employés quotidiennement. Des produits, voire des branches d'activité, pourront voir le jour et se développer. Accélérer la découverte et le développement des matériaux n'implique pas seulement d'anticiper la demande des consommateurs, de la développer et de proposer des produits améliorés et compétitifs. Les nouveaux matériaux sont aussi porteurs de solutions pour de nombreux défis majeurs.

Les économies qui mènent des activités de développement et d'intégration technologiques en vue de relier la mise au point des matériaux à la fabrication des produits peuvent en tirer profit à condition d'instaurer durablement une culture propice à la répartition des processus de découverte, de conception et de développement des matériaux. Une telle culture est compatible avec un écosystème d'innovation dans les matériaux robuste au sein duquel les fournisseurs de matériaux, les FEO, les organismes gouvernementaux et les

laboratoires évoluent aux côtés des prestataires de services et des universités, qui apportent le soutien technique nécessaire et forment les travailleurs de demain.

Graphique 6.1. Conception simultanée et développement ascendant des matériaux pour satisfaire les systèmes en amont et les exigences du produit (fabrication et performance incluses)



Source : Adapté de McDowell, D.L. et al. (2010), *Integrated Design of Multiscale, Multifunctional Materials and Products*.

Ce chapitre traite en premier lieu des promesses offertes par les nouveaux matériaux à l'ère numérique, des tendances favorables à l'accélération de leur développement et de la nécessité de disposer d'un écosystème d'innovation idoine pour allier matériaux numériques et fabrication industrielle. Avant de conclure par l'examen de nouveaux défis pour les politiques publiques et la manière dont ils s'inscrivent dans les problématiques de longue date. Les mesures à prendre pour concrétiser les promesses offertes par l'accélération des découvertes, du développement et de l'élaboration des matériaux fondée sur le numérique seront discutées. Ces mesures sont les suivantes :

- Construire une culture favorisant un écosystème d'innovation des matériaux.
- Intégrer une chaîne d'approvisionnement numérique pour les matériaux.
- Favoriser la cybercollaboration et les agents du web pour répartir les processus des matériaux et de fabrication.
- Former la main-d'œuvre de demain.
- Définir la marche à suivre et mettre en place le financement de l'infrastructure propre à l'innovation dans les matériaux.

Les promesses des matériaux nouveaux et améliorés

Le début de l'ère de l'information, l'efficacité et la productivité sur le lieu de travail connaissent un formidable essor. Ces dernières décennies, l'automatisation a pris une importance considérable dans la production en masse, parallèlement au progrès de la conception numérique industrielle qui, en intégrant une réflexion sur les produits et procédés dès son premier stade, a connu une réduction des délais de mise sur le marché. Dans cette nouvelle ère de la fabrication numérique, il est possible d'étudier la géométrie dans l'espace et de les tolérances des pièces complexes et des assemblages avant la fabrication réellement physique, les informations sont transmises dans des fichiers de conception assistée par ordinateur (CAO) destinés à la production. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que les produits sont fabriqués à partir de matière dont la forme, la structure et les propriétés constituent depuis longtemps une grande source d'incertitude qui limite l'horizon possible de la fabrication numérique. D'importantes questions persistent autour de la base sur laquelle repose la connaissance prédictive des propriétés et caractéristiques des matériaux existants, telles que l'usinabilité, le conditionnement de surface, l'interaction entre le processus de fabrication et la structure du matériau, la déformation et les tolérances, les contraintes résiduelles et la qualité de l'assemblage des matériaux constitutifs. Les nouvelles technologies de fabrication, comme la fabrication additive et l'impression 3D, ont accru l'importance de ces questions et la nécessité de solidariser le développement des matériaux et la fabrication. À cela s'ajoute que les progrès de la fabrication numérique ne sont pas tributaires des catalogues et inventaires des matériaux standard et immédiatement disponibles. En effet, tout donne à penser qu'il sera possible de développer et de mettre en œuvre rapidement des matériaux nouveaux ou améliorés susceptibles d'être incorporés dans les flux de fabrication numérique et de conférer aux produits une fonctionnalité inédite et supérieure.

Si la découverte et le développement des matériaux s'accélèrent, c'est grâce aux progrès réalisés sur plusieurs fronts. Les avancées obtenues dans l'instrumentation scientifique – comme la sonde atomique tomographique, la microscopie électronique de transmission à très haute résolution (HRTEM) et le synchrotron à rayons x – permettent aux scientifiques et ingénieurs d'étudier les matériaux à une échelle plus fine et à un niveau de détail jamais atteint auparavant. L'évolution des méthodes et outils de simulation informatique est elle aussi déterminante. Encore faut-il intégrer ces avancées. Ces dix dernières années, la science des données et les grandes capacités de calculs ont servi à étudier des corrélations complexes de données et à évaluer rapidement les matériaux candidats. Cette pratique est en plein essor. La convergence des expériences très précises sur de gros volumes, de la simulation informatique, de la science des données et de l'informatique est en train de révolutionner les méthodes de fabrication qui peuvent tirer parti de la possibilité d'adapter les matériaux aux besoins du client. L'une des percées ainsi réalisées est l'impression 3D.

Cependant, les méthodes systématiques de découverte et de développement des matériaux commencent seulement à « prendre la vague » de la nouvelle ère numérique. Jusqu'à présent, il fallait compter 15 à 20 ans entre la découverte d'un matériau en laboratoire et sa mise en œuvre dans des produits. Cela tient notamment à l'importance de l'empirisme dans le développement des matériaux, qui s'inscrit largement dans une démarche déconnectée de la conception systémique et de la fabrication. Par ailleurs, l'usage veut que les mécanismes d'incitation en faveur de la productivité de la recherche universitaire privilégient les avancées en cascade de la recherche fondamentale plutôt que la transposition des découvertes en applications. Le développement et la certification des matériaux constituent des étapes essentielles de la « vallée de la mort » que les nouveaux

matériaux doivent traverser pour sortir du laboratoire de recherche et entrer dans la composition de produits (Apelian, 2004). La progression récente de l'aptitude à créer et à manipuler les matériaux augmentera considérablement les possibilités de produire des biens et des services à la demande. La moindre modification de la composition ou de la structure d'un matériau peut considérablement modifier ses réactions ou lui conférer des fonctions entièrement nouvelles. On voit déjà apparaître des matériaux aux propriétés inédites, comme le métal étirable ou les matériaux ultralégers d'une densité comparable à celle de l'air. Les alliages exotiques, les matériaux composites ultralégers et ultrarésistants, les matériaux à mémoire de forme, capables de se régénérer tout seuls, de changer de forme ou de s'auto-assembler de manière organisée et les matériaux qui réagissent à la lumière et au bruit font désormais partie du paysage (The Economist, 2015). La manipulation des microstructures rend possible la mise au point de matériaux dont les propriétés varient au gré des besoins selon l'endroit où ils se trouvent dans la pièce ou le composant considéré.

L'ère des tâtonnements dans la découverte et le développement des matériaux touche à sa fin

Comme le montre le découpage de l'histoire en « âge de la pierre », « âge du bronze » et « âge du fer », les progrès de la civilisation ont toujours été étroitement liés à ses avancées dans les matériaux. À l'époque moderne, les « âges » se chevauchent et s'entremêlent. La révolution industrielle (l'« âge des machines »), marquée par l'apparition d'un large éventail de nouveaux matériaux au service de la productivité et de l'utilité, a rapidement laissé la place à l'« âge du silicium », qui a ouvert la voie à l'informatique omniprésente. Plus de la moitié des grandes percées technologiques du XX^e siècle¹ découlent d'une façon ou d'une autre des progrès réalisés sur les matériaux. C'est le cas de l'automobile, du fuselage et turbines à gaz des aéronefs, de la microélectronique, de l'aérospatiale, de l'imagerie et autres technologies médicales, des appareils électroménagers, des laser et de fibres optiques, de l'énergie nucléaire et des matériaux légers à hautes performances. Parallèlement à son intégration dans des biens de consommation comme les téléphones mobiles, les ordinateurs, les appareils, les équipements sportifs et les voitures, chaque génération de nouvelle technologie de matériaux se banalise avec la baisse des coûts de développement et l'intensification de la concurrence entre fournisseurs. En revanche, les technologies de rupture se font plus rares et rythment l'équilibre des marchés en offrant des opportunités d'un changement rapide des préférences des consommateurs, ainsi qu'une concurrence pour la viabilité économique, voire de diversification de la production nécessaire à la survie des marchés qui seraient immobiles autrement. Les matériaux nouveaux et améliorés stimulent les marchés en remettant en question la position concurrentielle des produits existants.

Le XX^e siècle aura été l'âge d'or de l'invention et des nouvelles technologies. Le XXI^e siècle verra le progrès technologique poursuivre sur sa lancée. Alors que les scientifiques débattent de la question de savoir combien de temps encore la loi de Moore² s'appliquera à la puissance de calcul fondée sur le silicium³, l'ère numérique a déjà bien avancé. Elle se caractérise par la connectivité mondiale, par la possibilité d'accéder sur demande à une vaste panoplie d'informations et de ressources numériques et par la capacité de stocker des flux numériques qui suivent toutes les étapes de la conception technique et du développement, de la fabrication et de la commercialisation. Paradoxalement, de par la nature de la connectivité mondiale, ces tendances sont plus subtiles, omniprésentes et se répandent plus rapidement qu'il y a 20 ans. Selon toute vraisemblance, au XXI^e siècle, le croisement des données massives, de l'infrastructure et des technologies existantes

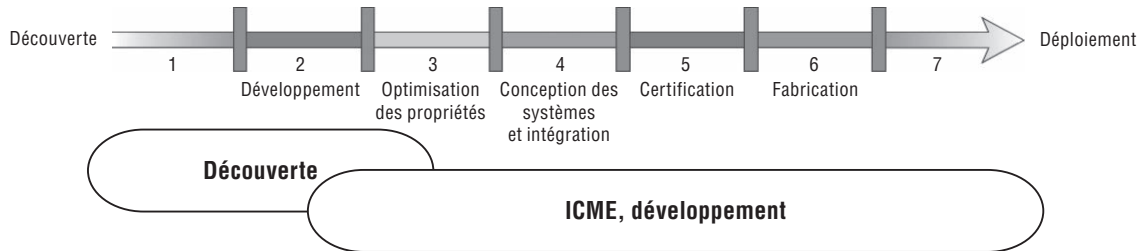
transformera les moyens de communication, de transport et de commercer employés quotidiennement. Des produits, voire des branches d'activité, pourront voir le jour et s'étendre. Accélérer la découverte et le développement des matériaux n'implique pas seulement d'anticiper la demande des consommateurs, de la développer et de proposer des produits améliorés et compétitifs. Les nouveaux matériaux sont aussi porteurs de solutions face aux nombreux défis majeurs que la National Academy of Engineering des États-Unis a mis en avant dans une étude de 2009⁴ et dont le règlement se trouve fondamentalement limité par des considérations liées aux matériaux, tel que l'obtention de l'énergie de fusion, la production de l'énergie solaire économique, la séquestration du dioxyde de carbone, gérer le cycle de l'azote, accéder à de l'eau propre, réhabiliter l'infrastructure urbaine et concevoir les outils de découverte scientifique. L'inventaire envisageable des nouveaux modes de transport et de communication interpersonnelle est infini. Par exemple, les matériaux adaptatifs peuvent s'adapter à l'environnement et faire preuve de flexibilité à la demande en changeant de forme et de fonction. Les solutions mobiles et individuelles de conversion et de stockage de l'énergie permettent de travailler partout. Il est possible qu'à terme, les matériaux nouveaux et améliorés permettront de remplacer des organes malades ou endommagés, d'obtenir des sources durables d'alimentation et d'eau, de produire des biens de consommation non toxiques et recyclables, de développer l'informatique moléculaire, etc. Les synergies entre ces technologies se développeront de manière plus subtile et moins intrusive à mesure que les interfaces homme-machine deviendront plus intuitives.

Dans les années 80, le groupe de recherche sur l'acier (SRG, Steel Research Group) de l'Université Northwestern fut l'un des premiers, à concevoir et développer un matériau doté de propriétés ciblées (Olson, 1997 ; Apelian, 2004). Il s'est inspiré des modèles quantitatifs de relations structure-propriétés de la métallurgie physique pour passer de la découverte empirique de nouveaux types d'acier ou d'aciers améliorés à la conception intentionnelle. Grâce à l'évolution de la puissance de calcul, au cours des décennies suivantes, , ainsi que des méthodes et outils employés en science des matériaux, en physique et en chimie, il est désormais possible de modéliser et de simuler non seulement la structure, mais aussi les propriétés d'un matériau pour décider de la manière éventuelle de l'incorporer dans des produits. Des propriétés comme la conductivité thermique, la résistance, la rigidité, la ténacité et la résistance à la corrosion peuvent être intégrées de manière intentionnelle dans de nouveaux matériaux et ce, rapidement, avec le concours de la théorie des matériaux et du calcul informatique. Depuis une dizaine d'années, l'intégration de la modélisation et de la simulation par ordinateur dans la conception et le développement des matériaux fait l'objet d'une attention considérable et occupe une place centrale dans l'initiative engagée aux États-Unis en faveur de l'ingénierie des matériaux par modélisation intégrée, sous l'appellation ICME (*Integrated Computational Materials Engineering*) (Pollock et Allison, 2008). L'objectif de cette approche est d'accélérer le développement des matériaux innovants ou améliorés ainsi que la mise en œuvre des matériaux connus dans des produits nouveaux, de mettre au point des technologies fondées sur les nouveaux matériaux et de trouver des moyens de perfectionner les produits et procédés existants. Par exemple, l'étude ICME de 2008 revient sur le projet de bloc-moteur en fonte d'aluminium de Ford Motor Company (Pollock et Allison, 2008). Particulièrement appréciée par les industriels, l'ingénierie des matériaux par modélisation intégrée ancre plus profondément la modélisation prédictive de la science et l'ingénierie des matériaux dans les processus de conception et de développement.

L'une des prémisses de l'initiative pour le génome des matériaux (MGI) susmentionnée est qu'il est possible d'accélérer la mise en œuvre des matériaux nouveaux et améliorés en

favorisant l'exécution simultanée des phases du développement et du déploiement des matériaux indiquées dans le graphique 6.2 (adapté de Holdren [2014]), lesquelles sont traditionnellement séquentielles et progressives. En d'autres termes, en anticipant, dès le stade du développement et de l'optimisation des propriétés en laboratoire, les exigences de certification et de fabrication auxquelles les matériaux devront satisfaire en aval, peut-être ramener le délai de mise en œuvre des matériaux nouveaux et améliorés à 7 ou 10 ans, voire moins, contre 15 à 20 ans auparavant. Il est également possible de réduire les itérations coûteuses et chronophages des étapes 2 à 6 du graphique 6.2. À l'étape 4, il conviendrait de réfléchir aux filières de fabrication à emprunter et à la forme que revêtiront les produits dans la phase de déploiement.

Graphique 6.2. **Ordonnancement classique des étapes séparant la découverte des matériaux de leur mise en œuvre (de gauche à droite)**



Source : Adapté de Holdren, J.P. (2014), « Materials genome initiative strategic plan », https://mgi.nist.gov/sites/default/files/factsheet/mgi_strategic_plan_-_dec_2014.pdf.

L'Initiative pour le génome des matériaux part du principe qu'il est nécessaire de resserrer les liens entre l'expérimentation, le calcul, l'exploitation des données numériques et la science des données tant pour découvrir de nouveaux matériaux à un rythme accéléré que pour renforcer la simultanéité des étapes de l'aval. Traditionnellement accidentelle, la découverte de matériaux est de plus en plus orientée par la sélection combinatoire et peut prendre en considération l'intégration et la certification en aval. La MGI s'intéresse à la découverte de nouveaux matériaux et au développement à un stage précoce tandis que l'ICME s'intéresse directement à l'accélération des liens entre le développement des matériaux par une certification des propriétés et un déploiement produit. De plus en plus, de nouveaux matériaux sont spécialement mis au point pour des applications et produits précis⁵, alors que la pratique antérieure consistait à créer une gamme de matériaux disponibles, répertoriés dans un catalogue. Tout cela concourt à la fusion du développement des matériaux avec la fabrication et requiert des données numériques à toutes les phases.

D'importantes tendances qui caractérisent actuellement la recherche et développement (R-D) en matériaux contribuent à accélérer l'exécution coordonnée des processus de développement des matériaux et de fabrication dans l'ère numérique :

- **La démocratisation de la mécanique quantique** : la mécanique quantique n'est plus le pré carré des physiciens et des chimistes comme il y a 30 ans : les ingénieurs s'en sont emparés à leur tour, dans leur formation et sur le terrain, pour y puiser une panoplie d'outils d'aide à la conception et au développement de matériaux dans des disciplines aussi diverses que la mécanique, l'aéronautique, le génie civil ou les sciences industrielles. La rencontre de l'informatique appliquée à la science des matériaux, de la micromécanique multi-échelles des matériaux et de l'informatique omniprésente montre combien l'informatique est utile à la découverte et au développement des matériaux.

- **La reconnaissance qu'il existe une hiérarchie dans la structure des matériaux**, qui va de l'atome (sous-nanomètre) aux molécules en passant par les interfaces séparant les différents états de la matière, et que cette hiérarchie joue un rôle de premier plan dans la définition sur mesure des propriétés requises pour obtenir le comportement souhaité.
- **La faculté de jouer au jeu « et si »** afin d'étudier le comportement potentiel des matériaux nouveaux et améliorés à l'aide de la modélisation et simulation prédictives.
- **Les progrès réalisés dans la caractérisation à haute résolution des matériaux et dans la mesure *in situ***, conjointement avec la représentation numérique des niveaux hiérarchiques de la structure des matériaux, qui fait partie des renseignements à relier à la fabrication numérique, au même titre que les informations classiques de géométrie dans l'espace et les tolérances.
- **L'intérêt de l'industrie pour la science des matériaux, la chimie et la physique**, ce qui permet de prendre en compte les effets complexes de l'environnement, des procédés de fabrication et des conditions de fonctionnement.
- **La consignation numérique des flux qui permet de retracer la manière dont les matériaux sont synthétisés ou traités**, les méthodes employées pour mesurer leur structure et leurs propriétés ainsi que l'utilisation qui en est faite dans des produits manufacturés précis, autrement dit la généalogie du matériau, sa signature traçable. Tout cela se combine avec une architecture de l'information (théorie de l'information, bases et référentiels de données, interfaces numériques et cybercollaboration répartie).
- **L'apparition d'une théorie et de méthodes formelles d'aide à la décision dans le développement des matériaux** (considérant l'utilité ou la valeur de l'information pour l'aide à la décision en matière de conception, la programmation des objectifs, l'économie de l'information et les méthodes de gestion de l'incertitude) allié aux flux numériques.

C'est probablement au point de rencontre des données massives et des matériaux que réside le plus fort potentiel de transformations propices à la poursuite de plusieurs des autres grandes tendances. Par exemple, la révolution des données massives a gagné la prévision météorologique, les projections du changement climatique et la cybersécurité (chapitre 2). L'industrie des matériaux numériques n'y a pas échappé, quoique son impact soit souvent minimisé, en particulier en ce qui concerne la diversité et le volume des données sur les matériaux (Melody, 2014). Modéliser par ordinateur les dynamiques du comportement de tous les atomes présents dans un cube de métal cristallin de 1 mm d'arête (ce qui représente environ 15 fois l'épaisseur d'un cheveu humain) présente une difficulté comparable à d'autres applications des données massives. En général, la structure d'un matériau transformé ou en service subit dans le temps des modifications plutôt non linéaires et dynamiques. Pour mieux comprendre et prévoir ses applications, il est indispensable d'utiliser des modèles et représentations à l'échelle « gros grain ». Cette particularité des données massives est peut-être restée dans l'ombre du fait que les spécialistes des matériaux ont toujours privilégié les éléments de description plus restrictifs, comme les « propriétés » mesurées, alors qu'il est désormais courant d'obtenir des téraoctets d'information en réalisant des expériences *in situ* à haute résolution temporelle et spatiale. Quand bien même les inventaires de propriétés feraient encore l'affaire pour les matériaux depuis longtemps en circulation, ce n'est pas le cas pour les matériaux qui attendent d'être développés. La représentation numérique ascendante (à partir de l'échelle atomique) de la structure des matériaux fournit une pléthore d'informations utiles pour les phases ultérieures de fabrication et de déploiement. Et il ne s'agit là que de la partie immergée de

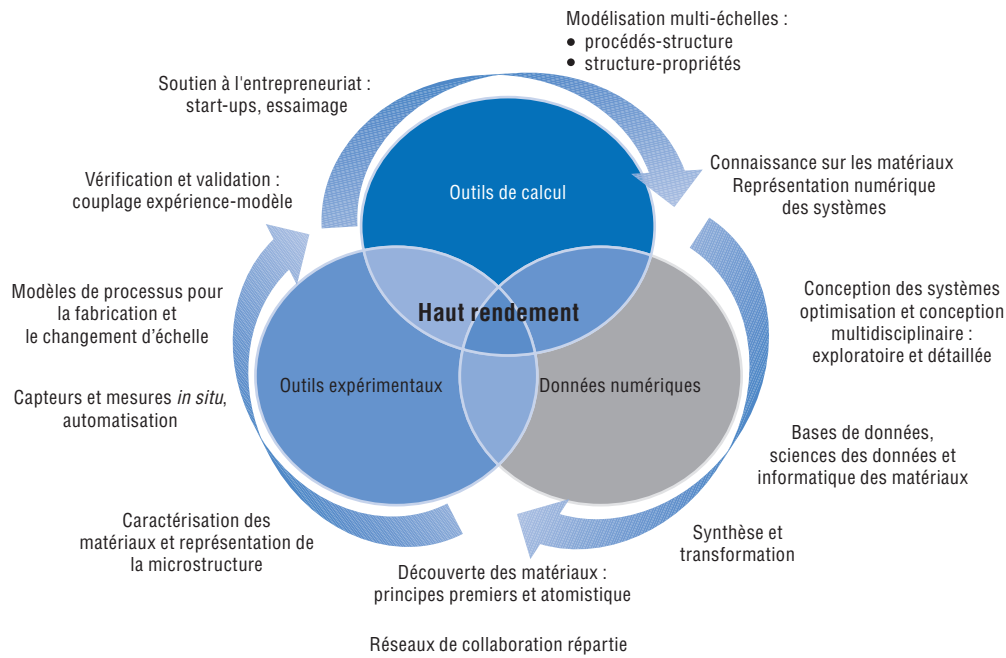
l'iceberg. Voilà pourquoi il est nécessaire de considérer le développement des matériaux sous un angle beaucoup plus large. Tel est précisément l'objet de la section suivante.

L'écosystème de l'innovation dans les matériaux

Il ne fait aucun doute qu'au XXI^e siècle, nous irons plus avant dans l'ère numérique en franchissant le seuil de l'internet des objets pour entrer dans l'âge de l'informatique omniprésente, des capteurs et des réseaux grâce aux données massives. La convergence des progrès réalisés dans plusieurs disciplines – science des données et informatique, science des matériaux, modélisation multi-échelles et multiphysique, représentation numérique de la structure des matériaux et des métadonnées associées, mesure *in situ*, diagnostic industriel et de procédés en ligne, automatisation et commande, mesure et gestion de l'incertitude, ou encore conception intégrée des systèmes – offre la perspective de « boucler la boucle » entre la mise au point des matériaux, la fabrication et le développement de produits nouveaux et améliorés (McDowell, 2007). La notion d'écosystèmes de fabrication⁶ a pris une ampleur considérable⁷, de même que la réflexion sur les écosystèmes industriels⁸. Pourtant, le rôle central et moteur de la découverte et du développement des matériaux se trouve largement exclu de leur champ. Voilà pourquoi l'innovation des matériaux a besoin d'un écosystème d'un nouveau genre, qui modifie la place des FEO dans la chaîne d'approvisionnement en matériaux ainsi que le caractère de la recherche universitaire moderne et sa relation avec l'industrie et les pouvoirs publics. Cet écosystème devrait resserrer le lien entre la découverte des matériaux, leur développement et la fabrication des produits. Pour en libérer le potentiel, il est indispensable de pouvoir représenter la structure hiérarchique des matériaux (y compris leur composition chimique) à plusieurs niveaux sous une forme numérique, conjointement avec les données tirées des résultats de simulations, d'expériences et d'autres sources d'information et métadonnées connexes (importants renseignements complémentaires sur les données), de manière à disposer d'une base objective de communication. Ce sont ces données qui circulent dans l'écosystème. L'Institute for Materials⁹ de Georgia Tech (Georgia Institute of Technology) prône une vision de l'écosystème d'innovation des matériaux fondée sur la notion de « banc d'essai », telle qu'illustrée par le graphique 6.3 (McDowell et Kalidindi, 2016). Le diagramme de Venn intérieur correspond au croisement des expériences, de l'informatique et des données numériques, selon le plan stratégique de la MGI (Holdren, 2014). Il constitue le cœur d'un réseau multidisciplinaire, réparti et collaboratif, alliant développement des matériaux et fabrication. L'accélération du développement des matériaux passe par l'application de méthodes à haut rendement, ce qui suppose l'existence d'une infrastructure de l'information numérique assurant la connectivité. Il s'agit là du point central à partir duquel on commence à s'écarter de la conception classique du développement des matériaux. En puisant dans les solides fondations de la découverte, de la synthèse et du traitement des matériaux, de leur caractérisation et de la représentation de leur microstructure, cet écosystème rassemble des éléments des domaines suivants : science des données sur les matériaux et informatique ; optimisation de la conception de systèmes pluridisciplinaires ; matériaux cognitifs ; données et métadonnées sur les matériaux numériques ; modélisation multi-échelles ; capteurs et automatisation ; modèles de procédés unitaires pour la fabrication ; mesures *in situ* et changement d'échelle industrielle ; et principes de la mesure de l'incertitude, de la vérification et de la validation. Les entrepreneurs se réunissent en réseaux pour concevoir et exploiter des flux types permettant aux matériaux de passer de l'étape de l'invention à celle de l'application. Enfin, une plateforme de cybercollaboration est essentielle pour coordonner les activités des différents experts et

acteurs de cette infrastructure numérique, comme indiqué sur le graphique 6.3. La recherche fondamentale universitaire peut adopter le paradigme de « l'utilisation comme source d'inspiration » (Stokes, 1997), qui vise à relier les progrès des matériaux obtenus en aval aux grandes technologies de transition et aux nouvelles technologies de matériaux de rupture, comme les batteries nanostructurées de stockage d'énergie, les matériaux ultrarésistants et les matériaux de séparation (Pearce, 2013).

Graphique 6.3. Éléments constitutifs de l'écosystème d'innovation des matériaux, infrastructure cyberphysique au cœur de l'Initiative américaine sur le génome des matériaux (MGI) axée sur l'alliance entre informatique, expérimentation et données numériques



Source : Adapté de McDowell, D.L. et S.R. Kalidindi (2016), « The materials innovation ecosystem: A key enabler for the materials genome initiative ».

Les nouveaux matériaux renferment un potentiel de rupture

On s'expose généralement à un plus grand potentiel de rupture en développant de nouveaux matériaux qu'en améliorant ceux existants. Les nouveaux matériaux sont porteurs d'innovation. Ainsi, il y a plusieurs dizaines d'années, l'arthroplastie de la hanche a été révolutionnée par la technique de fixation fondée sur la croissance osseuse dans des structures en matériaux poreux, en remplacement du ciment¹⁰. La Commission européenne rapporte que¹¹, « d'après les estimations, 70 % des innovations de produit font intervenir des matériaux dotés de propriétés nouvelles ou améliorées ».

L'histoire a retenu l'exemple du caoutchouc vulcanisé¹². Le procédé inventé au XIX^e siècle consiste à améliorer la durabilité du caoutchouc naturel ou synthétique par addition de soufre ou d'autres produits modifiant la réticulation des chaînes de polymères. Une kyrielle de produits de transformation des polymères a ensuite été mise au point, entraînant des avancées considérables dans les pneus automobiles, le matériel orthopédique, les matériaux composites et bien d'autres applications. Dans le contexte de la prochaine révolution de la production, l'un des buts de la découverte et du développement de matériaux

est de remplacer l'approche empirique par une stratégie plus systématique, assistée par ordinateur. Comme on le voit sur le graphique 6.2, la découverte précède le développement.

Voici deux exemples de méthodes scientifiques plus systématiques appliquées à la découverte des matériaux. Le *Materials Project*¹³ a pour mission « d'accélérer la découverte de nouveaux matériaux technologiques à l'aide d'outils avancés de conception innovante et d'informatique scientifique ». Parmi ces outils figurent les stratégies logicielles et computationnelles novatrices, ainsi que les méthodes de sélection de nouveaux matériaux destinés à des applications précises. En combinant science des matériaux évolutifs et grappes de calcul intensif, le *Materials Project* avait prédit l'utilisation de plusieurs matériaux dans la fabrication de batteries, lesquels matériaux ont été élaborés et testés en laboratoire. De la même façon, il avait également mis en évidence les nouveaux oxydes transparents et conducteurs ainsi que les matériaux thermoélectriques. De son côté, en alliant les méthodes d'ingénierie des matériaux par modélisation intégrée (ICME) à sa technologie *Materials by Design*, la société QuesTek Innovations LLC¹⁴ est parvenue, en peu de temps, à mettre au point de nouveaux alliages, revêtements et autres matériaux à hautes performances. Il s'agissait en l'occurrence de coupler des connaissances et des outils de conception physique et numérique avec les techniques de caractérisation avancée afin de réduire au minimum le coût et la durée des expériences et obtenir rapidement un petit nombre de prototypes itératifs correspondant à différentes échelles. Parmi les matériaux conçus de la sorte, on peut citer les aciers Ferrium, qui sont commercialisés, ainsi que les alliages à base d'aluminium, de titane, de nickel, de molybdène, de tungstène, de niobium, de cuivre, de cobalt et autres matériaux en cours de développement. Ces aciers à base de fer sont actuellement évalués et employés dans un large éventail d'applications contraignantes et primordiales pour la sécurité, notamment dans les secteurs de l'aérospatiale et des hydrocarbures.

De l'importance des matériaux améliorés

En utilisant la simulation pour mettre au point des matériaux, les entreprises peuvent économiser du temps et de l'argent puisque les itérations moins nombreuses éliminent les tâches répétitives. Les stratégies d'ICME fondées sur la simulation pour éclairer la prise de décisions liées au développement des matériaux permettent d'obtenir de meilleurs produits, par exemple des structures hiérarchiques plus résistantes et nettement plus complexes. En intégrant efficacement la modélisation et la science des données dans l'aide à la décision liée au développement de produits, on pourrait aussi réduire le temps écoulé entre la découverte d'un matériau et son utilisation à des fins commerciales. Dans le passé, ce délai pouvait atteindre, voire dépasser 20 ans (Holdren, 2014). Aux États-Unis, le programme AIM (*Accelerated Insertion of Materials*), conduit par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) de 2000 à 2003 (McDowell et Olson, 2008 ; McDowell et Backman, 2010), a eu un impact considérable. Il s'agissait de mettre au point et d'intégrer une suite de procédés et de modèles des-microstructure-propriétés dans l'analyse de l'incertitude appliquée aux disques de turbine à gaz et optimisés grâce à un superalliage de nickel. Le programme AIM a démontré la possibilité de réaliser d'immenses gains de temps. Dans le cas d'un moteur aérospatial, l'optimisation simultanée des processus de conception et de fabrication a permis d'aboutir à un disque de rotor plus léger de 21 % et plus résistant de 19 % par rapport à d'autres modèles, tout en réduisant de moitié la durée habituelle du cycle de développement (Holdren, 2014). La chaîne d'approvisionnement en matériaux pourrait s'en trouver transformée. Les grandes entreprises vont de plus en plus rivaliser dans la mise au point de nouveaux matériaux. En effet, l'application d'un procédé de fabrication breveté à

des matériaux également brevetés offre la garantie de se démarquer durablement de la concurrence (The Economist, 2015). En d'autres termes, innover dans les matériaux au niveau des FEO et des chaînes d'approvisionnement permet de garder une longueur d'avance dans la course au développement de nouveaux produits. Les systèmes de gestion des connaissances qui en résultent sont algorithmiques par nature, mais aussi fortement imprégnés d'une culture, ce qui les rend difficiles à reproduire. Par ailleurs, les entreprises peuvent reconnaître les technologies de rupture à venir tout en améliorant les matériaux existants à l'intérieur de leur écosystème d'innovation.

Matériaux et fabrication numériques

On entend par « fabrication numérique » l'utilisation d'un système informatisé intégré qui regroupe la visualisation tridimensionnelle (3D), la simulation, l'analytique et divers outils de collaboration pour définir simultanément les produits et le procédé de fabrication¹⁵. D'après un article de McKinsey and Company paru en août 2015¹⁶, « les chefs de file de l'industrie et du monde universitaire s'accordent à dire que les technologies de fabrication numérique vont transformer chacun des maillons de la chaîne de valeur industrielle de la R-D au SAV en passant par l'approvisionnement, les opérations d'usine, le marketing et la vente ». On y apprend plus loin que le secteur manufacturier génère plus de données que n'importe quel autre secteur industriel mais qu'une grande partie reste inexploitée, que « la transformation numérique du secteur manufacturier mondial, qui pèse plus de 10 000 milliards USD, durera au moins dix ans » et que « Boeing a conçu ses deux derniers modèles de fuselage, destinés aux 777 et 787, sur la base du tout virtuel, réduisant ainsi de plus de la moitié le délai de mise sur le marché ». Airbus s'emploie activement à développer des matériaux composites et autres matériaux avancés pour les utiliser dans la conception et la construction d'aéronefs ainsi qu'à mettre au point des technologies de nature à accroître la part des matériaux composites dans ses appareils¹⁷. Ces efforts sont menés parallèlement au développement des matériaux, généralement considéré comme faisant partie intégrante de la chaîne d'approvisionnement industrielle, quelque peu à l'écart des ensembles de données exploités dans la fabrication numérique. Le concept de « jumeau numérique »¹⁸ a été imaginé pour désigner une représentation numérique virtuelle d'un système physique – à l'instar du modèle tridimensionnel d'un objet ou de la réunion des composants de sous-ensembles ou d'ensembles – et susceptible de faire figurer la forme et la fonction d'objets physiques dans des calculs numériques. Le jumeau numérique permet notamment d'utiliser le retour des capteurs du système réel pour observer et contrôler la réponse de la représentation virtuelle. L'idée est que, comme dans le cas des jeux vidéo en réalité augmentée, le jumeau numérique incarne fidèlement tous les éléments physiques voulus de la réponse du système, des interactions complexes et même la détérioration ou les dysfonctionnements. En d'autres termes, le jumeau numérique peut servir à créer, construire et tester des équipements ou des pièces manufacturées dans un milieu virtuel¹⁹.

D'après Glaessgen et Stargel (2012), les moyens habituels ne permettront pas de faire face au déluge d'informations que fourniront les capteurs installés sur les futurs véhicules de la NASA et de l'US Air Force. Les approches de gestion de la flotte traditionnelle sont trop limitées et engendrent une incertitude trop grande, compte tenu des décalages temporels et du contenu limité de l'information qu'impliquent les schémas classiques d'inspection matérielle. Le concept de jumeau numérique qui lie le système embarqué de gestion de l'état du véhicule, son registre d'entretien et les données disponibles sur la flotte (données

historiques incluses) simulera l'espérance de vie restante du vrai « jumeau ». Il a même été proposé d'y recourir pour surveiller l'état d'une flotte d'aéronefs militaires et assurer sa maintenance²⁰.

Pour que le jumeau numérique soit le plus réaliste possible, il doit tenir compte de la structure et du comportement des matériaux, sans oublier naturellement l'incertitude des modèles de comportement et de dégradation en service. Une simulation ou les corrélations de données doit être incorporé au jumeau numérique. Par anticipation de la certification en aval des applications (graphique 6.2), on peut concevoir, voire modifier les matériaux en se fondant sur la réaction du jumeau numérique ainsi qu'en comparant son comportement avec celui des systèmes sur le terrain. La perspective s'ouvre ainsi d'améliorer en permanence la qualité de la flotte, par exemple en couplant la mise au point de matériaux nouveaux et améliorés avec des composantes essentielles. L'ICME (Pollock et Allison, 2008) fait appel aux méthodes computationnelles et à la science des données pour étayer le développement de matériaux destinés à des applications produits. La représentation numérique des microstructures aléatoires et le calcul prédictif des relations structure-propriétés d'un éventail de microstructures réalistes sont les principales composantes technologiques de cette approche. Elle suppose d'intégrer avec les processus de fabrication, les fichiers numériques de CAO contenant les informations de nature géométrique et autres sur les matériaux utilisés dans les composants manufacturés, ainsi que des renseignements utiles concernant l'inspection, le contrôle de procédé et le contrôle-qualité.

Le concept de jumeau numérique se prête particulièrement bien à la fabrication additive de pièces d'usinage, de réparation et de remplacement, ainsi qu'au prototypage. La fabrication additive permet de créer de nouvelles formes physiques et, par conséquent, des produits nouveaux ou améliorés. Elle permet aussi de faire varier dans l'espace les propriétés de la matière constitutive d'une pièce de manière à en optimiser le comportement compte tenu de l'ensemble d'exigences spécifié pour le système (chapitre 5).

Défis à relever pour que, demain, l'innovation s'accélère dans les matériaux

Comme indiqué en introduction au présent chapitre, de nombreux défis doivent être relevés pour que soit possible le développement et la fabrication de matériaux numériques. Tel est l'objet de la suite du chapitre, qui se conclura par une liste de défis majeurs pour les politiques publiques.

Construire une culture de l'innovation des matériaux et son écosystème

Les économies qui sauront le mieux tirer parti de cette nouvelle conception intégrée des processus de développement de matériaux et de fabrication de produits fondés sur le numérique sont celles qui sont le plus à même de développer et d'enrichir la culture de l'innovation. Les conditions indispensables à réunir à cet égard sont : disposer d'une robuste chaîne d'approvisionnement en matériaux, une bonne répartition des prestataires de services et pouvoir suivre les données numériques et les flux de travail. Cette évolution culturelle émanera probablement des universités, qui formeront les nouveaux travailleurs, et des FEO, qui concrétiseront l'innovation en matériau, mettront à profit l'investissement public et pèseront sur l'élaboration des politiques.

L'écosystème d'innovation des matériaux représenté sur le graphique 6.3 est centré sur l'humain ainsi que sur l'infrastructure cyberphysique d'aide à la décision en matière de découverte et de développement des matériaux. Loin de les remplacer, il enracine les meilleures pratiques. Pour que cet écosystème atteigne sa plénitude, les parties prenantes et

les experts doivent être répartis et collaborer à toutes les phases périphériques indiquées sur le graphique 6.3. Il est trop vaste pour s'articuler autour d'un seul domaine, comme les matériaux ou la fabrication. Son étendue mettra à rude épreuve les universités, puisqu'il débordé du périmètre des facultés, voire des établissements d'enseignement post-secondaire (*colleges*). Les petites et moyennes entreprises peuvent s'interroger sur la manière de classer leurs investissements par ordre de priorité, compte tenu des moyens limités, ou de consacrer leurs propres ressources à la collaboration avec autrui. De leur côté, les grandes entreprises et les secteurs industriels pourraient souhaiter se doter de leur écosystème maison, proche de celui présenté sur le graphique 6.3 en taille et en portée.

Les « données numériques » sont fondamentales pour représenter la structure des matériaux, pour insérer leur développement dans la fabrication, mais aussi pour suivre l'évolution des collaborations et les communications relatives à la découverte et à la mise au point d'un matériau donné, en d'autres termes les flux types de l'information numérique et des décisions. Le processus dans son intégralité se prête plutôt bien à la discipline moderne qu'est la science des données. La mise en place d'un écosystème de l'innovation dans les matériaux ouvrira un nouveau champ des possibles pour les prestataires capables d'assurer des services spécialisés à la demande (fourniture de données, analyses scientifiques des données, synthèse et traitement des matériaux, tests de propriétés et de caractérisation, mesure de l'incertitude, modélisation et simulation et autres outils de soutien), ce qui pourrait déboucher sur une redéfinition du rôle des chaînes d'approvisionnement en matériaux et des chaînes logistiques manufacturières. Cet écosystème doit se développer de manière systémique et organique, à la faveur de l'enseignement, de la formation et de la définition des meilleures pratiques. Le futur écosystème de l'innovation dans les matériaux reposera sur une infrastructure de l'information numérique. Sa mise en place ne pourra donc pas se faire sans le concours des communautés qui ont commencé à se former dans l'industrie et la science des données et c'est pourquoi les emplois du type « spécialiste des données sur les matériaux » sont appelées à devenir monnaie courante. Outre les méthodes à haut rendement, il faudrait insister autant sur l'importance de la connectivité des experts disséminés au sein de l'écosystème que sur des technologies précises. Enfin, dans cet écosystème, il est indispensable de mesurer et de gérer l'incertitude liée aux données et aux modèles pour étayer la prise de décisions concernant le développement des matériaux et les investissements à réaliser afin que la fabrication change d'échelle.

S'il importe d'intégrer plus efficacement les matériaux nouveaux et améliorés dans le développement et la fabrication des produits, il faudrait aussi mener à bien les tâches ci-après, dont la liste n'est pas exhaustive.

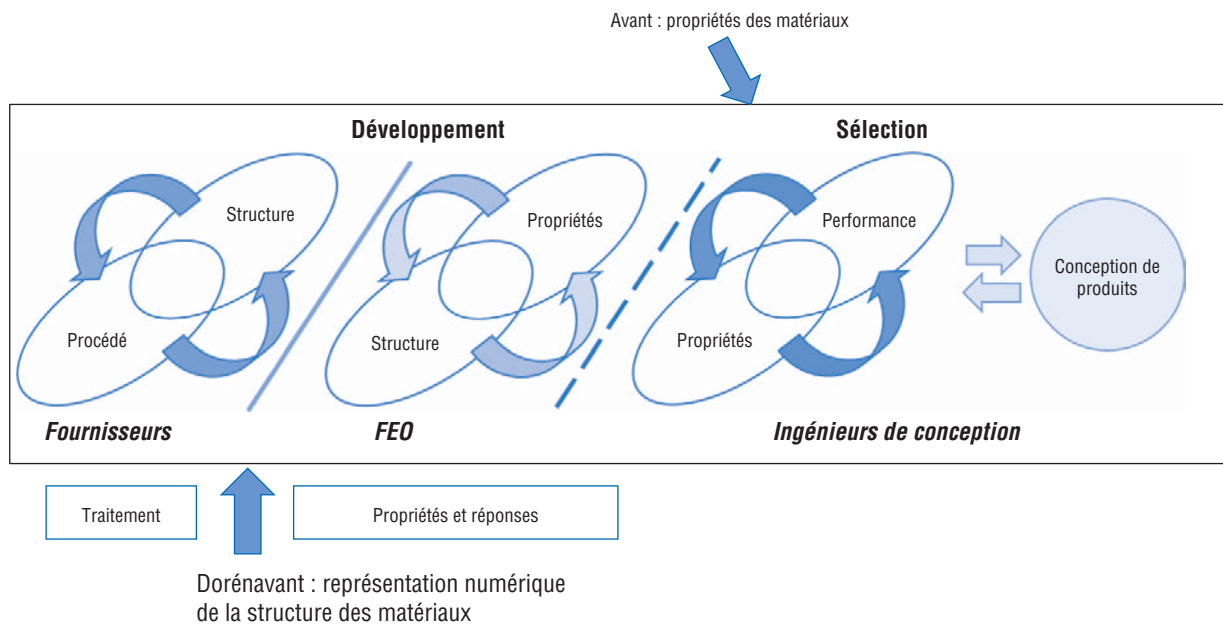
- Privilégier les initiatives de R-D dans les organismes gouvernementaux.
- Favoriser les mélanges d'expérience et modèles informatisés pour contribuer aux décisions concernant le développement de matériaux nouveaux et améliorés, en tenant compte du retour sur investissement. Les méthodes empiriques de développement des matériaux, fondées sur des protocoles expérimentaux chronophages, ont un coût élevé. La question est de savoir comment raccourcir au maximum ces protocoles en étayant de manière fiable la prise de décisions liées au développement des matériaux à l'aide des informations obtenues par modélisation et simulation, et par des corrélations complexes de données.
- Accorder la priorité aux mécanismes et aux phénomènes de la science des matériaux pour modéliser toute conception et de développement de matériau.

- Réaliser des études de faisabilité pour établir le retour sur investissement probable des nouveaux systèmes matériels considérés.

Intégrer une chaîne d'approvisionnement numérique pour les matériaux

Le graphique 6.4 montre comment, la représentation numérique de la structure des matériaux utilisée pour la conception et du développement des produits, fera évoluer le rôle de la chaîne d'approvisionnement en matériaux par rapport à la pratique établie (partie inférieure droite du graphique 6.1). Dès lors que l'on privilégie la représentation numérique de la structure hiérarchique des matériaux (ligne pleine inclinée, à gauche sur le graphique 6.4), plutôt que les propriétés traditionnelles (line en pointillé inclinée, à droite), les fournisseurs de matériaux sont tenus de conserver et de transmettre des informations numériques sur la structure. La relation traditionnelle chaîne d'approvisionnement-FEO-production est perturbée et transformée, mais satisfait aux mesures de la structure et aux exigences de propriétés spécifiées par les FEO. Plus précisément, l'information numérique relative à la structure des matériaux, mais aussi les renseignements connexes sur les relations structure-propriétés seront transmis aux outils de conception et de fabrication virtuelles employés par l'FEO et d'autres clients. Cela comprend les métadonnées relatives aux mesures des propriétés, les modèles de simulation et/ou d'analytique et tout l'historique de la transformation du matériau, à savoir comment le matériau est fabriqué. Par ailleurs, une grande partie des tâches d'ingénierie des matériaux par modélisation sera transférée dans la chaîne d'approvisionnement, où les prestataires de services liés aux matériaux numériques devront satisfaire de nouvelles exigences. A l'intérieur d'un tel écosystème, l'adaptation des matériaux en fonction des exigences de performance des produits peut être traitée sur une base contractuelle (ce qui est difficile à l'heure actuelle), les nouvelles PME spécialisées vont se multiplier à la jonction entre l'approvisionnement en matériaux et les

Graphique 6.4. **Changement de paradigme dans le développement des matériaux : remplacement de la sélection par la représentation numérique de la structure**



Source : Adapté de McDowell, D.L. (2012), « Materials genome initiative : Implications for university education and research », www.brown.edu/conference/mgi-town-meeting/sites/brown.edu.conference/mgi-town-meeting/files/uploads/McDowell_presentation%20%5bRead-Only%5d%20%5bCompatibility%20Mode%5d.pdf.

FEO. La société QuesTek LLC, évoquée plus haut, en est un bon exemple. Les entreprises spécialisées dans la science des données peuvent fournir des services et analyses utiles pour mettre en évidence les nouveaux matériaux ou les améliorations potentiellement réalisables grâce au rapprochement des matériaux et de la fabrication. Il sera nécessaire de forger des consortiums public-privé et d'investir dans la valorisation de la main-d'œuvre de demain pour développer la culture associée à ce nouveau paradigme.

Cybercollaboration et approche des agents du web au service des processus des matériaux et de fabrication

Couplé à l'écosystème de fabrication d'un secteur industriel donné, l'écosystème d'innovation des matériaux représenté sur le graphique 6.3 est par essence réparti. La concurrence qui s'exerce à l'intérieur de la chaîne d'approvisionnement de l'écosystème, tant pour les matériaux que pour les services (par exemple, données, analyse des données, expériences et calculs), peut concourir à accélérer les processus tout en réduisant les coûts.

L'information numérique jouant un rôle central dans l'innovation des matériaux, le partage des données numériques est une question fondamentale. Des incitations sont indispensables pour encourager les échanges d'information mutuellement bénéfiques (McDowell, 2013). Dans l'ère des matériaux numériques, les revues spécialisées dans l'innovation à l'interface de ces matériaux et de la fabrication, comme *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*²¹, continueront de proliférer, alors que les titres plus anciens chercheront un créneau à occuper. Aux États-Unis, l'Institut national des normes et de la technologie (NIST)²² est pionnier dans la tenue d'un registre de matériaux et des données ouvertes dans le cadre de la MGI. Les activités connexes d'archivage des données sont réparties entre les différents organismes gouvernementaux qui siègent au sous-comité de la MGI (SMGI)²³.

De toute évidence, il est difficile d'imaginer qu'une entreprise puisse à elle seule ériger un édifice si étendu, qui combinerait les informations de la recherche pré-concurrentielle et les capacités des meilleurs prestataires de services avec des bases de données et d'applications protégés par la propriété intellectuelle. Dans un avenir lointain, les acteurs des matériaux et de la fabrication participeront depuis les quatre coins du globe à l'infrastructure cyberphysique de l'innovation des matériaux. Encore au stade embryonnaire, cette infrastructure se compose actuellement de technologies sous-développées : i) synthèse/traitement, caractérisation et mesure des propriétés des matériaux à haut rendement ; et ii) infrastructure de l'information (McDowell et al., 2014). Les plateformes et prestataires de services répartis peuvent concourir à la réalisation d'un grand nombre des objectifs susmentionnés en participant à l'infrastructure de l'information sur les matériaux à travers différents services (par exemple, modélisation des matériaux basée sur la mécanique quantique, méthode des éléments finis, méthodes de découverte et de développement à haut rendement et applications modernes de la science des données). Entre autres exemples de plateformes et de prestataires de services, on peut citer : le *Materials Project*, déjà évoqué, du Laboratoire national Lawrence Berkeley (LBNL) ; la base de connaissance ouverte sur les modèles d'interaction interatomique *OpenKIM (Open Knowledgebase of Interatomic Models)* de l'Université du Minnesota²⁴, plus précisément dédiée aux potentiels interatomiques ; le Centre de conception hiérarchique des matériaux (*Center for Hierarchical Materials Design, CHiMaD*)²⁵, chapeauté par le NIST en collaboration avec l'Université Northwestern, le Laboratoire national d'Argonne et l'Université de Chicago ; et le Centre PRISMS du Département de la défense des États-Unis (US DOE), hébergé par

l'Université du Michigan²⁶. Les registres de matériaux et référentiels de modèles recensés aux États-Unis sont notamment ceux du NIST²⁷, Citrine Informatics²⁸, NanoHub²⁹ et Materials Data Facility du National Data Service³⁰. Il en existe aussi en Europe (par exemple, le référentiel NoMaD [Novel Materials Discovery]³¹) et en Asie (notamment au Japon, à l'Institut national pour la science des matériaux [NIMS]³²). Dans l'ensemble, ces plateformes ne pratiquent pas la cybercollaboration répartie.

Telle qu'elle est envisagée, l'infrastructure de l'information sur les matériaux comportera des éléments d'un genre inédit qui n'existaient pas auparavant et qui créeront des marchés de niche susceptibles pour la plupart de s'intégrer dans l'architecture cybercollaborative :

- registres et référentiels numériques de données sur les matériaux
- services et applications de données web et en nuage, qui ajoutent de la valeur ajoutée en aidant à interpréter les données utiles à la découverte et au développement de matériaux
- agents du web et vendeurs de services d'appui à la modélisation et à la simulation
- attribution et certification des « niveaux de maturité » des données ainsi que des outils de modélisation et de simulation
- vendeurs de services combinant matériaux et procédés industriels unitaires (par exemple, utilisation de modèles informatiques ou de corrélations avancées dans l'usinage ou la transformation d'articles métalliques).

Cette infrastructure de l'information pourra être répartie et exploitée de manière très large, moyennant des attributs « prêts à l'emploi » généralisés.

Former la main-d'œuvre de demain

L'innovation des matériaux est déjà enseignée à l'université, par exemple dans le cadre du master en science et simulation des matériaux de l'Université de la Ruhr à Bochum³³ ; des formations en ICME de l'Université d'État du Mississippi³⁴, du diplôme de master mention Conception de l'Université Northwestern³⁵ et du programme FLAMEL (*From Learning, Analytics, and Materials to Entrepreneurship and Leadership*) de la Georgia Tech (NSF IGERT)³⁶. Elle fait également l'objet de programmes dispensés dans des « écoles d'été », notamment à l'université A&M du Texas (*IIMEC Summer School on Computational Materials Science Across Scales*)³⁷, à l'Université du Michigan (*Summer School on Integrated Computational Materials Education*)³⁸, au Laboratoire national Lawrence Livermore (LLNL) (*Computational Chemistry and Materials Science Summer Institute*)³⁹ et à l'Université de Floride, dont le Cyber-infrastructure for the Atomistic Materials Science Center organise un atelier d'été⁴⁰.

Il conviendrait d'élaborer et de proposer des programmes d'enseignement transversaux ainsi que des formations courtes en ingénierie et en sciences abordant les sujets suivants : informatique appliquée à la science des matériaux, méthodes expérimentales à haut rendement, caractérisation et mesure des propriétés des matériaux avancés, méthodes inverses et métamodélisation, mesure de l'incertitude, vérification et validation, science des données et fabrication systémique. Outre des impératifs économiques, quantifier l'incertitude dans les relations procédés-structure et structure-propriétés des matériaux implique une grande profondeur scientifique. En abordant la mesure et la gestion de l'incertitude conjointement avec l'ingénierie systémique, il est possible de donner un formidable coup d'accélérateur aux activités d'innovation des matériaux, ainsi que la Société des minerais, des métaux et des matériaux (TMS) l'a

récemment souligné dans une étude⁴¹. Pour contribuer à former la main-d'œuvre de demain, l'Institute for Materials de Georgia Tech propose sur Coursera⁴² deux cours en ligne gratuits qui expriment un point de vue favorable à l'égard de la MGI : le premier s'intitule « Sciences des données sur les matériaux et Informatique »⁴³ et le second « Introduction au développement des matériaux à haut rendement »⁴⁴.

Encadré 6.1. **Conditions à remplir pour la main d'œuvre de demain**

Le nouvel écosystème de l'innovation des matériaux aura besoin d'une main d'œuvre spécialisée dotée d'une palette de compétences nouvelle et élargie. D'où la nécessité de repenser et d'étoffer les programmes universitaires et les outils pédagogiques afin d'y intégrer les différents éléments de l'infrastructure d'innovation des matériaux présentés dans le graphique 6.3. Cette refonte doit aller au-delà de l'enseignement classique pour jeter des passerelles entre les disciplines universitaires de l'ingénierie et de la science qui soutiennent intrinsèquement l'ensemble. Par exemple, les programmes universitaires sont très lacunaires en ce qui concerne la mesure de l'incertitude et les protocoles d'aide à la décision dans le développement des matériaux. Cela tient au fait que, pour découvrir et mettre au point des matériaux, les spécialistes privilégient la méthode scientifique ascendante, qui est loin des considérations de la conception technique des produits-systèmes. Le traitement de l'incertitude relève généralement de la conception systémique, de la science des données et de l'optimisation en présence d'incertitude.

Les défis des données incitent à élaborer des mécanismes afin de rassembler tous les éléments nécessaires de l'analyse de données, d'expériences et de calculs ainsi qu'à attirer l'attention des travailleurs de demain sur l'accélération de la découverte et du développement des matériaux. Le Challenge sur les données de la science et de l'ingénierie des matériaux, que le laboratoire de recherche de l'US Air Force a parrainé de 2015 à 2016 en partenariat avec le NIST et la Fondation nationale pour la science des États-Unis⁴⁵ est un bon exemple.

Définir la marche à suivre et le financement de l'infrastructure propice à l'innovation dans les matériaux

Il ressort de la MGI des États-Unis que l'infrastructure de l'innovation dans les matériaux a pour clé de voûte la superposition de l'expérimentation, de la modélisation et simulation informatiques et des données (référéncées, archivées, analysées). Elle correspond au centre de l'écosystème d'innovation des matériaux illustré sur le graphique 6.3. Toutefois, dans la plupart des pays développés, les investissements destinés à l'infrastructure de recherche en matériaux ont essentiellement concerné jusqu'ici les installations pour la synthèse et la caractérisation des matériaux haut de gamme, et moins les méthodes à haut rendement et le traitement des matériaux. La science des données et l'informatique appliquées aux matériaux n'en sont qu'à leurs débuts. Que ce soit en Amérique du Nord, en Europe ou en Asie, peu d'universités proposent dans ce domaine des programmes d'enseignement aboutis. Au-delà de l'information numérique, l'infrastructure de l'innovation dans les matériaux doit, sur le plan matériel, permettre : i) de synthétiser et de transformer les matériaux avec un haut rendement, ii) de définir leurs caractéristiques, iii) de mesurer leurs propriétés ; ainsi que iv) d'effectuer des calculs à hautes performances et de stocker des données.

Des entreprises appartenant au classement « Fortune 500 », comme IBM⁴⁶, mais aussi des PME comme Wildcat Discovery Technologies, Inc.⁴⁷ ont commencé à investir dans la

mise en place d'une infrastructure intégrée de l'innovation des matériaux alliant l'expérimentation et le calcul à la science des données au service de la découverte de matériaux. L'investissement est lent en matière de l'infrastructure nécessaire pour produire des biens manufacturés dans divers secteurs, comme les transports, l'énergie et la sûreté. Ce constat vaut tout particulièrement pour les installations partagées. En effet, il se pose la question de savoir comment investir dans ces nouveaux types d'infrastructure transversale, nécessaires pour accélérer la découverte et le développement des matériaux, tels que les instruments à haut rendement de caractérisation des matériaux, de mesure des propriétés et de synthèse ou traitement des matériaux. À l'instar de l'infrastructure scientifique haut de gamme de la recherche en matériaux, à laquelle appartiennent le synchrotron à rayons x et la diffraction neutronique, ces capacités devraient être dispersées à l'échelle régionale, nationale, voire internationale. Les entreprises ont généralement tendance à investir dans un secteur, voire un matériau précis. Il est possible que l'investissement privé ne facilite pas l'expansion d'une infrastructure de l'innovation qui réponde aux besoins communs de sélection pré-concurrentielle et d'évaluation augmentée des solutions matériaux.

L'écosystème d'innovation des matériaux qui sous-tend les ambitions de la MGI et de l'ICME a plus d'un point en commun avec l'Initiative nationale en faveur des nanotechnologies (NNI)⁴⁸. Ainsi, la NNI a été engagée à la fin des années 1990 pour développer la recherche en nanotechnologie aux quatre coins des États-Unis, tout comme la MGI a été conçue de façon que l'infrastructure propice à l'innovation dans les matériaux se retrouve dispersée, l'objectif étant d'accélérer le rythme des découvertes, du développement et de la mise en œuvre des matériaux nouveaux et améliorés et, partant, de diminuer les délais et les coûts. Les deux initiatives diffèrent en revanche du fait que la NNI met l'accent sur les outils et les stratégies à haut rendement. La MGI vise à « boucler la boucle » entre expériences, modélisation et simulation informatiques, science des données et informatique et, ce faisant, à faciliter la prise en compte des impératifs de la certification, de la manufacturabilité et de l'exploitation à long terme des systèmes de matériaux. Aux États-Unis, une grande partie de cette infrastructure existe déjà ou est en cours de mise en place, mais faute d'accessibilité, les classes de matériau n'y sont pas reliées de manière organisée. De même, il n'existe pas de mécanisme bien défini pour mettre en évidence les lacunes et les priorités du financement interinstitutions à l'échelle de tout l'écosystème d'innovation des matériaux. Les efforts déployés jusqu'ici ont le plus souvent été localisés, dans certains établissements universitaires, laboratoires de recherche publics ou des branches d'activité. Dans l'ensemble, les parties prenantes concernées de près ou de loin sont peu au fait de l'existence de ces capacités réparties ou de la manière dont elles s'articulent avec les différents éléments de l'infrastructure d'innovation des matériaux.

On trouve des enseignements et points de vue très importants dans le compte rendu de l'atelier *Building an Integrated MGI Accelerator Network*, organisé à Georgia Tech les 5 et 6 juin 2014 (McDowell et al., 2014). S'y étaient rassemblés 150 maîtres à penser et parties prenantes du monde universitaire, de l'industrie et des administrations des États-Unis pour étudier les moyens d'étendre l'infrastructure expérimentale, computationnelle et informationnelle sur les matériaux et d'y faciliter l'établissement de réseaux de collaboration en vue de concrétiser au mieux les buts de la MGI. Co-organisé par Georgia Tech, l'Université de Wisconsin-Madison et l'Université du Michigan sous les auspices du *Materials Accelerator Network*⁴⁹, cet événement a enclenché un dialogue national sur les priorités des acteurs de la MGI et sur la voie à suivre. En plénière d'ouverture, plusieurs interventions ont décrit la stratégie des autorités à l'égard de la MGI et les points de vue de l'industrie et du monde universitaire sur l'accélération des phases de découverte, de développement et de

déploiement des matériaux. Les débats se sont poursuivis dans le cadre de séances en sous-groupes de manière à couvrir un large éventail de questions : les matériaux employés en électronique organique et inorganique, les matériaux structuraux, les matériaux destinés au stockage et à la conversion d'énergie, les biomatériaux et les matériaux biofonctionnels ainsi que les interfaces de catalyse et de séparation. Trois thèmes en particulier ont été abordés : les questions fondamentales à régler et les déficits technologiques à combler ; l'infrastructure requise pour l'intégration de la MGI ; et la stratégie à adopter pour tisser un réseau propice à l'accélération de l'innovation dans les matériaux.

Encadré 6.2. **Questions fondamentales à régler et déficits technologiques à combler pour accélérer la découverte et le développement de matériaux**

Le compte rendu de l'atelier *Building an Integrated MGI Accelerator Network* (McDowell et al., 2014) permet de dresser la liste ci-après des questions fondamentales à résoudre et des déficits technologiques à combler pour atteindre les objectifs de la MGI dans tous les domaines d'application considérés :

- **Bâtir une infrastructure de l'information sur les matériaux**, en particulier mettre l'environnement web au service de la cybercollaboration et de la science des données.
- **Poursuivre des stratégies à haut rendement de sélection et de développement** qui tiennent compte des capacités et contraintes associées aux différents types de procédé de synthèse et de traitement disponibles, notamment des outils de modélisation rapide servant à calculer la probabilité de satisfaction aux exigences.
- **Former la main-d'œuvre de demain**, dans l'optique de regrouper l'expérimentation, le calcul et les sciences des données.
- **Acquérir une compréhension approfondie des relations entre la structure des matériaux et leurs propriétés/performance à différentes échelles.**
- **Se doter de méthodes de diagnostic avancé**, en particulier *in situ*/en exploitation.
- **Prendre en considération**, dès les premiers stades de la découverte et du développement, la **stabilité des matériaux à long terme** en conditions de fonctionnement, de stabilité environnementale, de dégradation et tout au long de la durée de performance.
- **Exécuter des simulations prédictives des états métastables et des trajectoires hors équilibre** dans les conditions dans lesquelles il est prévu de les utiliser afin de conduire une évaluation paramétrique des matériaux candidats. Un matériau est dit métastable quand on peut l'employer utilement à un état d'énergie supérieur à son état fondamental. Nombre de matériaux employés en génie des matériaux sont métastables.
- **Développer la science de la mesure ainsi que la modélisation et la simulation des procédés de synthèse et de traitement.**
- **Définir les principes du contrôle cinétique et thermodynamique dans les relations procédé-structure.** Il s'agit de savoir comment contrôler de manière fiable la structure aux différentes échelles (de nano à macro) tout au long du processus, y compris aux échelles supérieures.

Pour combler les lacunes indiquées dans l'encadré 6.2, outre celles liées à l'éducation et à la formation, il est nécessaire de disposer de nouveaux types de stratégies en science des données ainsi que d'une infrastructure répartie. Les recommandations prioritaires recensées à l'occasion de cet atelier (McDowell et al., 2014) sont les suivantes :

- Mettre l'accent sur l'éducation et la formation des futurs travailleurs de la MGI.

- Compiler une base de connaissance sur les efforts déployés aux États-Unis dans le cadre de la MGI.
- Relier les infrastructures physique et numérique pour l'ensemble des classes de matériau et des domaines d'application.
- Constituer des groupes de travail et des réseaux à l'intérieur et entre les domaines de matériaux.
- Définir les problèmes communs d'ingénierie fondamentale concernant chaque domaine d'application des matériaux afin d'obtenir la collaboration et la mise en réseau des parties prenantes de la MGI.
- Mettre en place une infrastructure plus robuste pour l'innovation des matériaux.

Conclusions

À la confluence des progrès de la modélisation prédictive, de la science des données et des méthodes de sélection à haut rendement, il se crée des possibilités non négligeables de réduire sensiblement les délais nécessaires pour transposer les matériaux nouveaux et améliorés dans la génération suivante de produits. Les technologies émergentes comme l'impression 3D à la demande présagent l'essor de la personnalisation/individualisation de masse et du déploiement rapide des nouveaux matériaux. Un autre moyen d'accélérer le rythme des découvertes et du développement des matériaux pour accroître la compétitivité des produits en aval consiste à fusionner les stratégies traditionnellement empiriques et fondées sur l'expérimentation avec celles de la simulation informatique et de la science des données. Il est par ailleurs essentiel de disposer de nouveaux types d'installations partagées à haut rendement pour, dans un délai très court, élaborer des matériaux, mesurer leur structure et propriétés et sélectionner ceux à mettre en œuvre à l'échelle industrielle. Le développement accéléré des matériaux, conjugué aux avancées sans précédent des méthodes de recherche combinatoire, peut donc révolutionner les caractéristiques et le fonctionnement des nouveaux produits.

L'analyse des incitations en faveur du développement de matériaux destinés à répondre aux nombreux défis du XXI^e siècle s'articule en grande partie autour de la viabilité économique, de la durabilité et de l'existence établie des retombées sociétales. Il importe que les pouvoirs publics élaborent les stratégies et politiques nécessaires pour concevoir ces incitations. En outre, la « démocratisation » des produits personnalisés, promise par les technologies omniprésentes, comme l'impression 3D ou encore l'incorporation de capteurs et autres moyens de communication dans les matériaux au service de l'internet des objets (Burrus, 2014), a un retentissement planétaire comparable à la profonde influence des smartphones et des médias sociaux.

Compte tenu de l'avantage concurrentiel élevé que chaque matériau nouveau ou amélioré peut conférer à un produit pour une durée limitée, il va sans dire que les problèmes de données et de propriété intellectuelle (PI) revêtent une importance fondamentale. Lorsqu'il s'agit de réaliser une grande innovation de produit à l'aide de matériaux nouveaux et améliorés, le laps de temps disponible pour gagner des parts de marché est très court après la sortie du produit et ne cesse de raccourcir à mesure que diminue le délai imparti pour mettre en œuvre des matériaux nouveaux hautement concurrentiels. Plusieurs questions liées à la propriété intellectuelle se posent. Par exemple, qui est propriétaire des données ? de l'infrastructure ? des informations ou capacités de valeur ajoutée ? Comment différencier le développement sous licence libre du développement propriétaire dans les

contrats ? Sachant que les matériaux constituent souvent l'élément central des capacités nouvelles et améliorées des produits, le système international de brevets est-il suffisant, sous sa forme actuelle, pour protéger l'avantage concurrentiel ? Théoriquement, dans un écosystème optimal, les fournisseurs auront une plus grande mainmise sur la propriété intellectuelle car ils seront chargés de conserver la trace des flux numériques du développement des matériaux. Quel est le régime applicable en matière de propriété intellectuelle et comment est-il défini ? Quel degré de collaboration pré-concurrentielle est souhaitable pour rivaliser sur le marché des nouveaux produits ? Est-il possible de partager les coûts de développement ? Quels sont les modèles de meilleures pratiques en matière de développement pré-concurrentiel de technologies partagées et d'infrastructure cyberphysique ? Comment les entreprises peuvent-elles distinguer développement en aval et applications ? Aussi difficile soit-il de répondre à ces questions, sur un marché concurrentiel, l'infrastructure d'innovation des matériaux s'insérera inexorablement dans le monde numérique de plus en plus interconnecté. De toute évidence, aucune entreprise ou organisation ne peut « détenir » l'intégralité de la palette des technologies associées à un tel écosystème collaboratif. Ce ne serait d'ailleurs pas souhaitable vu le bénéfice que l'économie mondiale de plus en plus interdépendante peut en tirer en apportant des biens et services à cet écosystème. Les FEO peuvent s'employer à maximiser leur profit dans le développement de produits et à réduire les délais de mise sur le marché. Cependant, le risque existe qu'à terme, l'avantage concurrentiel dépende essentiellement de la cadence de commercialisation et non plus seulement de la valeur intrinsèques des produits, en l'absence d'avancées radicales dans la fonctionnalité et/ou la création de marchés. D'où la nécessité de recourir à un modèle d'investissement public-privé, en particulier pour mettre en place l'infrastructure cyberphysique et former la main-d'œuvre de demain.

Des mesures réglementaires éclairées permettraient sans doute d'enrichir cet écosystème, en mettant l'accent sur la nécessité de faire en sorte que le plus grand nombre ait librement accès à l'infrastructure cyberphysique tout en maintenant les dispositifs appropriés pour protéger l'information et les flux spécifiques aux produits. Les organisations professionnelles déploient actuellement d'importants efforts pour mettre en place une infrastructure d'information précoce sur les matériaux et les normes connexes en matière de données^{50, 51} (Robinson et McMahon, 2016). Une coordination est nécessaire à l'échelle de l'ensemble de l'infrastructure d'innovation dans les matériaux, que ce soit au niveau national ou international. Compte tenu de la nécessité de mobiliser des investissements et des capacités d'Europe, d'Amérique du Nord et d'Asie pour fédérer les infrastructures cyberphysiques, la coordination internationale est de rigueur, car il serait trop coûteux et inutile de reproduire des ressources accessibles par des services web assortis d'une aide aux utilisateurs. Enfin, il faut des politiques avisées en raison de la nécessité de faire évoluer la culture du partage des données et, en particulier, de faciliter une culture de la cybercollaboration, en amont de la phase concurrentielle. Il s'agit là d'un bon exemple de situation dans laquelle les structures et réglementations en place peuvent se révéler insuffisantes du fait qu'elles ont été conçues pour les besoins d'une autre époque.

La conception et le développement des matériaux fondés sur le numérique soulèvent également des questions totalement nouvelles pour les pouvoirs publics. Certaines sont d'ordre stratégique et peuvent même rejaillir sur la sûreté et la stabilité. Par exemple, le remplacement des terres rares dans les aimants et les matériels électroniques est décidé au regard du niveau de stabilité de l'approvisionnement en matériaux et du contexte géopolitique connexe. L'évolution de la situation dans ces domaines pourra motiver la quête

de nouveaux matériaux. En outre, l'émergence de risques de cybersécurité inédits n'est pas à exclure puisqu'il est concevable qu'à moyen terme, une source de données de CAO de matériaux par simulation informatique soit la cible d'un piratage informatique ou d'une autre forme de manipulation. Ainsi, des politiques judicieusement conçues sont nécessaires pour faciliter l'ouverture des données et la science ouverte (notamment afin de partager les résultats de simulations de structures de matériaux ou bien des données d'expérience en contrepartie de l'accès à des outils de modélisation) (McDowell, 2013). Il devient urgent de définir, à court et moyen termes, les principes sur la base desquels les différentes parties prenantes devraient négocier les droits de propriété intellectuelle au sein du nouvel écosystème de l'innovation dans les matériaux. En effet, il faudra très probablement inventer de nouveaux types de contrats applicables selon que le code source est libre et les données partagées ou que la conception et le développement ont un caractère fermé et exclusif. Obtenir des avancées dans le domaine des nouveaux matériaux suppose en outre une collaboration étroite entre l'industrie, le monde universitaire, les organismes de financement de la recherche et les laboratoires publics. Il importe également de favoriser l'interdisciplinarité dans la recherche et l'enseignement, compte tenu de la nature pluridisciplinaire de la recherche en matériaux (indépendamment de la science et de l'ingénierie des matériaux, qui sont concernées de plein droit, y participent aussi la physique, la chimie, le génie chimique, le génie biologique, les mathématiques appliquées, l'informatique et le génie mécanique, entre autres disciplines).

Outre l'évolution des programmes universitaires, la remise à plat des relations entre fournisseurs de matériaux et FEO dans l'industrie, les questions liées à l'information protégée et aux autorisations d'exploitation, etc., un certain nombre de facteurs technologiques sont susceptibles d'entraver l'amélioration et l'utilisation des méthodes fondées sur le numérique. Quand ils existent, les modèles sont bien souvent trop rudimentaires pour aider à sélectionner les caractéristiques et filières de développement appropriées, et ce qu'ils étudient les relations entre les procédés et la structure ou bien les microrelations structure-propriétés. Il convient en particulier de coordonner les référentiels de modèles afin que leur mise à disposition rapide contribue à optimiser la conception. Un facteur de complication rarement abordé est la mesure de l'incertitude liée aux paramètres et à la structure des modèles employés pour consolider la conception de matériaux (McDowell et al., 2010). Il est plus efficace que ce soient les auteurs des modèles, et non leurs utilisateurs en aval, qui en mesurent l'incertitude pendant la phase de construction et d'étalonnage ou encore au moment de la définition des paramètres. Mesurer l'incertitude liée aux modèles et aux données doit être une obligation imposée par les organismes de financement et dans les procédures d'examen des projets de R-D. Les spécialistes des matériaux devront s'intéresser de plus près à cette question, ce qui suppose d'y consacrer de nouveaux cursus et d'y accorder une plus grande place dans les programmes universitaires. Il est urgent d'établir les méthodes et politiques régissant la diffusion des modèles auprès des prestataires de services, ou « agents du web » (McDowell et al., 2010), mais aussi de définir les « niveaux de maturité » de ces services en ce qui concerne la provenance, le degré de validation ainsi que le soutien à l'utilisation et au maintien en puissance, en procédant de la même façon que dans le cas bien connu de l'échelle de maturité technologique du Département de la Défense des États-Unis (US DoD)⁵².

La réflexion engagée entre les organismes de recherche, les entreprises, les laboratoires publics de recherche, les organismes de normalisation et les organisations professionnelles œuvrant à la mise au point de matériaux nouveaux et améliorés a principalement porté sur

la compatibilité des formats de données. Il convient à présent de recentrer le débat sur la manière d'exploiter ces données dans l'aide à la décision sur la découverte et la mise au point des matériaux, et de traiter en parallèle nombre des questions susmentionnées. Il existe une très grande diversité de formats de données et de protocoles, sans compter que les plateformes numériques et la structure des données évoluent très rapidement. Il est à cet égard important de pouvoir accéder aux ressources informatiques et infonuagiques à hautes performances, ce que les partenariats public-privé pré-concurrentiels et les politiques publiques peuvent faciliter. Ces questions font l'objet de différents travaux, notamment aux États-Unis, à travers l'ICME, ou en Europe, par l'intermédiaire du groupe d'experts d'ingénierie des matériaux par modélisation (ICMEg)⁵³. Par ailleurs, l'infrastructure cyberphysique associée aux méthodes à haut rendement qui permettent d'élaborer rapidement de nouveaux matériaux et d'en mesurer la stabilité, le comportement et l'adéquation avec des produits est très précieuse pour une diversité d'acteurs, qui devraient donc pouvoir y accéder.

Comme examiné dans le présent chapitre, des initiatives de grande envergure ont été engagées en Amérique du Nord (MGI, ICME), en Europe (ICMEg, Horizon 2020)⁵⁴ et en Asie en vue d'édifier de manière systématique la base scientifique et l'infrastructure requises pour innover plus rapidement dans les matériaux et jeter des passerelles avec la fabrication (méthodes et outils, données sur les matériaux, installations partagées et formation de la main-d'œuvre de demain). Bien qu'inexorables, les progrès sont actuellement freinés par le manque de coordination au niveau de la planification et de l'investissement. Les politiques et règlements doivent être mis en adéquation avec la nouvelle donne du développement des matériaux, qui fait désormais la part belle aux données numériques ainsi qu'à la coordination et à la collaboration dans l'aide à la décision en matière de conception et de développement de matériaux. Les décisions prises à l'échelle nationale et internationale peuvent fortement peser sur l'évolution de l'écosystème de l'innovation dans les matériaux, élargir les réserves potentielles de collaborateurs et encourager l'adoption de stratégies d'investissement plus efficaces. Les principales mesures à prendre peuvent être résumées comme suit :

- Consacrer l'investissement de R-D aux registres de matériaux pré-concurrentiels, au calcul intensif et à l'infrastructure expérimentale à haut rendement. Cela est nécessaire pour développer et cultiver l'écosystème de l'innovation dans les matériaux.
- Donner des moyens d'action à la chaîne d'approvisionnement en prenant les dispositions requises pour que la représentation numérique de la structure des matériaux fasse partie des spécifications à prendre en considération au même titre que les ensembles de propriétés.
- Favoriser et récompenser la cybercollaboration entre les différents acteurs du développement de matériaux, issus de l'industrie, des administrations et du monde universitaire.
- Promouvoir l'accessibilité des données numériques en tant que produit de la recherche financée par des fonds publics.
- Mettre en place les dispositifs voulus pour inciter les exécutants de la R-D à partager les données sur les matériaux et à leur conférer une valeur ajoutée à travers des activités de conservation, d'analyse et de gestion, et ce notamment en donnant accès aux corrélations avancées et aux méthodes de mesure de l'incertitude les plus en pointe.
- Traiter les questions de propriété intellectuelle qui font obstacle au partage et à l'analytique des données et sont susceptibles de peser sur le développement ou l'avantage

concurrentiel des produits. Il convient à cette fin de favoriser la mise en place d'une vaste infrastructure collective pré-concurrentielle capable d'accélérer la mise en œuvre des matériaux.

- Mettre en place des dispositifs de nature à inciter les universités à adopter des programmes et autres plateformes d'enseignement ou de formation pluridisciplinaires (ingénierie, sciences, informatique et gestion) qui soutiennent et enrichissent l'écosystème de l'innovation dans les matériaux.
- Définir la marche à suivre pour développer l'infrastructure permettant d'innover dans les matériaux et pour fixer les priorités en matière d'investissement à l'échelle régionale, nationale et internationale.
- Favoriser la création et le développement de PME spécialisées dans différents domaines (services liés aux données sur les matériaux, sélection à haut rendement, informatique et conception de matériaux, fourniture de matériaux à la demande) pour accompagner l'accélération de la découverte et du développement des matériaux destinés au secteur manufacturier.
- Élaborer les réglementations et protocoles de certification régissant le rôle des prestataires de services informatiques ou infonuagiques dans la découverte et le développement des matériaux ainsi que dans le changement d'échelle de fabrication.
- Insister sur la nécessité d'élaborer des matériaux et produits durables.

Notes

1. www.greatachievements.org/.
2. www.dailygalaxy.com/my_weblog/2012/05/is-the-age-of-silicon-coming-to-an-end-physicist-michio-kaku-says-yes.html.
3. www.kavlifoundation.org/science-spotlights/next-life-silicon#.V1XRBL7daFc.
4. www.engineeringchallenges.org/.
5. 9to5mac.com/2015/04/02/apple-watch-second-gen-concept/.
6. <http://dupress.com/articles/industry-4-0-manufacturing-ecosystems-exploring-world-connected-enterprises/>.
7. <https://ipc.mit.edu/sites/default/files/images/Report.pdf>.
8. www.industryweek.com/growth-strategies/manufacturers-agenda-building-robust-industrial-ecosystem.
9. www.materials.gatech.edu.
10. www.healio.com/orthopedics/hip/news/print/orthopedics-today/%7Bdc797a56-ce34-4c75-9172-ef38ad3c1c1f%7D/porous-ingrowth-fixation-revolutionized-hip-replacement.
11. http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/promotional-material_en.html.
12. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Vulcanisation>.
13. <https://materialsproject.org/>.
14. www.questek.com/about-us.html.
15. www.plm.automation.siemens.com/en_us/plm/digital-manufacturing.shtml.
16. www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/digital-manufacturing-the-revolution-will-be-virtualized.
17. www.airbus.com/innovation/proven-concepts/in-design/innovative-materials/.
18. https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_Twins.
19. <http://gelookahead.economist.com/digital-twin/>.
20. www.wpafb.af.mil/News/Article-Display/Article/819170/sustainment-plan-for-aging-fleet-critical.

21. www.tms.org/pubs/journals/immi/home.aspx.
22. <https://mgi.nist.gov/>.
23. www.mgi.gov/subcommittee-materials-genome-initiative-smgi.
24. <https://openkim.org/about/>.
25. <http://chimad.northwestern.edu/>.
26. <http://prisms.engin.umich.edu/#/prisms>.
27. <https://mgi.nist.gov/materials-resource-registry>.
28. www.citrine.io/.
29. <https://nanohub.org/>.
30. www.materialsdatafacility.org.
31. <http://nomad-repository.eu/>.
32. www.nims.go.jp/eng/infrastructure/data_information/database.html.
33. www.icams.de/content/master-course-mss.
34. https://icme.hpc.msstate.edu/mediawiki/index.php/Mississippi_State_University.
35. www.mccormick.northwestern.edu/materials-science/documents/graduate/icme-brochure.pdf.
36. www.flamel.gatech.edu.
37. <http://engineering.tamu.edu/news/2015/08/03/texas-am-hosts-fourth-iimec-summer-school-on-computational-materials-science-across-scales>.
38. <http://icmed.engin.umich.edu>.
39. <https://pls.llnl.gov/careers/internship-programs/computational-chemistry-and-materials-science-summer-institute>.
40. <http://cams.mse.ufl.edu>.
41. www.tms.org/multiscalestudy/.
42. www.coursera.org/.
43. www.coursera.org/learn/material-informatics.
44. www.coursera.org/learn/high-throughput.
45. www.challenge.gov/challenge/materials-science-and-engineering-data-challenge/.
46. <http://ceramics.org/ceramic-tech-today/ibms-watson-unchained-for-materials-discovery>.
47. www.wildcatdiscovery.com/company/about-us/.
48. www.nano.gov/.
49. <http://acceleratornetwork.org/>.
50. www.asminternational.org/web/cmdnetwork.
51. www.icmeg.euproject.info/.
52. https://fr.wikipedia.org/wiki/Technology_readiness_level.
53. <http://immijournal.springeropen.com/articles/10.1186/2193-9772-3-2>.
54. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>.

Références

- Apelian, D. (2004), *Accelerating Technology Transition: Bridging the Valley of Death for Materials and Processes in Defense Systems*, rapport du National Research Council, The National Academies Press, Washington, DC.
- Burrus, D. (2014), « The Internet of Things is Far Bigger than Anyone Realized », *Wired*, www.wired.com/insights/2014/11/the-internet-of-things-bigger/.

- Glaessgen, E. et D. Stargel (2012), « The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles », 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Honolulu, <http://dx.doi.org/10.2514/6.2012-1818>.
- Holdren, J.P. (2014), « Materials Genome Initiative strategic plan », Conseil national de la science et de la technologie, Comité des technologies, Sous-comité de l'Initiative pour le génome des matériaux, Bureau exécutif du président des États-Unis, Conseil national pour la science et la technologie, https://mgi.nist.gov/sites/default/files/factsheet/mgi_strategic_plan_-_dec_2014.pdf.
- Kalil, T. et C. Wadia (2011), « Materials Genome Initiative: A renaissance of American manufacturing », blog des archives de la Maison Blanche, 24 juin, <https://obamawhitehouse.archives.gov/blog/2011/06/24/materials-genome-initiative-renaissance-american-manufacturing>.
- McDowell, D.L. (2013), « Incentivize sharing », commentaire sur le partage des données en science des matériaux, *Nature*, vol. 503, n° 7477, pp. 463-464, www.nature.com/news/technology-sharing-data-in-materials-science-1.14224.
- McDowell, D.L. (2012), « Materials Genome Initiative: Implications for university education and research », Materials Genome Town Hall Meeting, Université Brown, Providence, 28 mars, www.brown.edu/conference/mgi-town-meeting/sites/brown.edu.conference/mgi-town-meeting/files/uploads/McDowell_presentation%20%5bRead-Only%5d%20%5bCompatibility%20Mode%5d.pdf.
- McDowell, D.L. (2007), « Simulation-assisted materials design for the concurrent design of materials and products », *JOM*, vol. 59, n° 9, pp. 21-25.
- McDowell, D.L. et D. Backman (2010), « Simulation-assisted design and accelerated insertion of materials », S. Ghosh et D. Dimiduk (dir. pub.), *Computational Methods for Microstructure-Property Relationships*, Springer, Heidelberg.
- McDowell, D.L. et al. (2014), « Workshop report: Building an integrated Materials Genome Initiative Accelerator Network », atelier organisé les 5 et 6 juin à Atlanta, <http://acceleratornetwork.org/wp-uploads/2014/09/MAN-MGI-REPORT-2015.pdf>.
- McDowell, D.L. et al. (2010), *Integrated Design of Multiscale, Multifunctional Materials and Products*, 1^e éd., Butterworth-Heinemann, Burlington et Oxford.
- McDowell, D.L. et S.R. Kalidindi (2016), « The materials innovation ecosystem: A key enabler for the Materials Genome Initiative », *MRS Bulletin*, vol. 41, pp. 326-335.
- McDowell, D.L. et G.B. Olson (2008), « Concurrent design of hierarchical materials and structures », *Scientific Modeling and Simulation (CMNS)*, vol. 15, n° 1, pp. 207-240.
- Mellody, M. (2014), « Big Data in Materials Research and Development: Summary of a Workshop », Defense Materials Manufacturing and Infrastructure Standing Committee, National Materials and Manufacturing Board, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council, National Academies Press, Washington, DC.
- Olson, G.B. (1997), « Computational design of hierarchically structured materials », *Science*, vol. 277, n° 5330, pp. 1237-1242.
- Pearce, J. (dir. pub.) (2013), « Disruptive materials », *Oak Ridge National Laboratory Review*, vol. 46, n° 1, www.ornl.gov/content/ornl-review-v46n1.
- Pollock, T.M. et J. Allison (dir. pub.) (2008), *Integrated Computational Materials Engineering: A Transformational Discipline for Improved Competitiveness and National Security*, The National Academies Press, Washington, DC.
- Robinson, L. et K. McMahon (2016), « TMS launches materials data infrastructure study », *JOM*, vol. 68, n° 8.
- Stokes, D.E. (1997), « Pasteur's Quadrant – Basic Science and Technological Innovation », *Brookings Institution Press*, Washington, DC, p. 196.
- Teresko, J. (2008), « Designing the next materials revolution », *IndustryWeek*, 8 octobre, www.industryweek.com/none/designing-next-materials-revolution.
- The Economist (2015), « Material difference », *Technology Quarterly*, *The Economist*, 12 mai, www.economist.com/technology-quarterly/2015-12-05/new-materials-for-manufacturing.

PARTIE II

Thèmes transversaux

PARTIE II

Chapitre 7

La prochaine révolution de la production et les institutions de diffusion des technologies

par

Philip Shapira et Jan Youtie

Manchester Institute of Innovation Research, Alliance Manchester Business School,
Université de Manchester School of Public Policy, Georgia Institute of Technology
Enterprise Innovation Institute, Georgia Institute of Technology

Les institutions chargées de diffuser les technologies facilitent la transmission et l'utilisation des nouvelles connaissances et méthodes pouvant aider les entreprises à adopter de nouvelles technologies de fabrication. Elles permettent également aux entreprises d'atteindre leurs objectifs, qu'il s'agisse de l'amélioration de la rentabilité de la production ou du développement des produits, de la planification stratégique et de la formation. Le présent chapitre s'intéresse aux institutions de diffusion technologique à vocation publique, ainsi qu'aux raisons de leur existence, à leur organisation et aux services qu'elles dispensent. Des études de cas décrivant des approches diverses y sont présentées – notamment les services extérieurs dédiés, les services aux entreprises axés sur la technologie, les centres de technologie appliquée, l'échange d'informations et les mesures d'incitation agissant sur la demande –, ainsi que des pratiques efficaces et un aperçu des activités. L'une des principales suggestions formulées à l'intention des pouvoirs publics souligne la nécessité de prendre davantage conscience que l'avènement généralisé de la prochaine révolution de la production passe par des institutions de diffusion technologique solides, associées à des mesures-cadres complémentaires. Les institutions chargées de diffuser les technologies doivent être encouragées à partager et améliorer leurs pratiques, à établir des partenariats collaboratifs et à répondre à des objectifs de durabilité et de responsabilité. Une attention particulière est requise pour aider les petites et moyennes entreprises (PME) et pallier les insuffisances de l'action publique en matière de diffusion des technologies.

Introduction

Les institutions chargées de diffuser les technologies joueront un rôle essentiel dans le développement de l'utilisation des technologies de production de nouvelle génération. Si ces institutions et les mécanismes connexes sont déficients, et que les entreprises et les systèmes industriels tardent à assimiler et mettre en œuvre efficacement les nouvelles technologies et les nouvelles stratégies, la prochaine révolution de la production pourrait alors ne pas advenir. Cela dit, ces institutions ont aussi besoin de changer et d'innover pour mener à bien cette diffusion de façon efficace et responsable. Le présent chapitre examine la nature et le rôle des institutions chargées de diffuser les technologies, et s'intéresse à la question de savoir comment elles évoluent, et devront peut-être évoluer, pour à la fois accompagner et influencer le développement des technologies de production de nouvelle génération.

Dans les dix ans à venir, les modes de production et d'utilisation des biens manufacturés et des services sont appelés à connaître de profondes transformations (Kagermann, Wahlster et Helbig, 2013 ; Foresight, 2013 ; Buffington, 2016). Les facteurs technologiques de cette « nouvelle révolution de la production » sont notamment les progrès fulgurants réalisés dans le domaine de l'information et des communications (par exemple les données massives, l'informatique en nuage et l'internet des objets), l'essor de la fabrication additive (l'impression en 3D) et numérique, ainsi que l'émergence de bio- et de nanomatériaux offrant de nouvelles fonctionnalités (OCDE, 2016). Des changements devraient également intervenir en parallèle au regard des modèles économiques du secteur manufacturier, avec une évolution vers plus d'ouverture, de flexibilité, de personnalisation, de participation de l'utilisateur, d'interaction ainsi qu'une plus grande attention aux services à valeur ajoutée et à la durabilité. En parallèle, l'organisation, le personnel et la géographie de la production manufacturière devraient évoluer (OCDE, 2010a ; Chesbrough, Vanhaverbeke et West, 2014 ; Wu et al., 2015 ; Prendeville et al., 2016). S'agissant des économies avancées, on espère que la prochaine révolution de la production pourra redynamiser les anciennes régions industrielles et rendre l'industrie nationale plus compétitive en favorisant l'installation d'usines « intelligentes » dotées de l'agilité, de l'efficacité et de l'intelligence nécessaires pour accroître la productivité et éviter le recours à la délocalisation (Alessi et Gummer, 2014 ; Brennan et al., 2015 ; NAE 2015 ; The White House, 2016). En ce qui concerne les économies émergentes, les progrès dans le domaine des technologies et des méthodes de fabrication offrent la possibilité d'avoir des activités de production plus durables et à plus forte valeur ajoutée (Birtchnell et Hoyle, 2014 ; Rauch, Dallasega et Matt, 2016).

Au cours des dernières décennies, les profondes transformations technologiques que l'on prédisait dans l'industrie ne se sont pas toujours réalisées (Youtie et al., 2007). Il s'agit, par exemple, à l'automatisation des usines dans les années 50 ou à la diffusion des machines moléculaires dans les années 80. Les goulots d'étranglement qui limitent – ou tout au moins ralentissent – la diffusion des idées technologiques radicales sont notamment la viabilité économique, le financement, la demande du marché, l'ajustement stratégique nécessaire, le degré de préparation technique et le délai de mise en œuvre, la puissance des technologies

existantes et l'apparition d'innovations inattendues. Les prévisions récentes de transformation technologique dans le secteur manufacturier sont indiscutablement confrontées aux mêmes réalités. De plus, dans les années à venir, les promesses de la nouvelle révolution de la production pourraient tarder à se concrétiser, voire ne jamais l'être, si elles n'apportent pas de réponse à une série de problèmes de fond d'ordre sociétal et institutionnel. Un certain nombre de ces problèmes sont déjà évidents, notamment la crainte que les travailleurs ne soient remplacés par des robots ou que les machines ne prennent seules les décisions, la cybersécurité et la confidentialité des données, les risques pour la population et les préoccupations éthiques concernant certains aspects du génie biologique (voir le chapitre 8, ainsi que l'examen de la question dans OCDE [2016]).

Les institutions chargées de diffuser les technologies jouent un rôle particulièrement important car elles permettent aux PME de se moderniser et de tirer avantage de la transformation de la fabrication. Tout comme la production évolue, la diffusion des technologies devrait évoluer également, car elle devient elle-même plus complexe, fait intervenir un plus grand nombre d'acteurs, s'accélère et prend de l'ampleur. Cette complexité croissante doit inciter à privilégier les approches réticulaires et à redoubler d'efforts pour anticiper et résoudre les problèmes de gouvernance au sein des institutions qui assurent la diffusion des technologies. Si ces dernières peuvent s'adapter et innover, en assumant des rôles permettant de répondre aux questions sociales, économiques et technologiques, elles pourront contribuer à l'avènement de la prochaine révolution de la production en tenant compte des intérêts de la collectivité.

Le présent chapitre s'intéresse aux institutions chargées de diffuser les technologies, aux raisons de leur existence, à leur organisation et aux services qu'elles dispensent. Il porte à la fois sur les institutions existantes et celles nouvellement créées, en mettant plus particulièrement l'accent sur les mécanismes à vocation publique. L'examen s'appuie sur une typologie de ces mécanismes, à savoir : les services extérieurs dédiés, les services aux entreprises axés sur la technologie, les centres de technologie appliquée, l'échange d'informations technologiques, l'évolution des comportements en fonction de la demande et le partage de ressources en accès libre. On y présente des études de cas consacrées à certaines institutions.

Des méthodes visant à encourager la diffusion des technologies ont déjà été testées – intervention d'un agent, mise en relation, tutorat, projets collaboratifs, services d'orientation, par exemple –, qui permettent d'aider les entreprises à adopter et assimiler de nouvelles technologies et méthodes de fabrication. Ces méthodes sont toujours utiles et valables. De nouvelles approches font également leur apparition, notamment le transfert de connaissances en accès libre et le développement des ressources collectives. Certaines institutions de longue date qui adoptent un schéma classique de programmes publics établis pour fournir des services à leurs clients parviennent également à gérer de nouvelles technologies de production et à remplir de nouvelles fonctions. Outre ces modèles existants, on recense de nouvelles institutions chargées de diffuser les technologies qui font généralement leur apparition à la faveur des technologies émergentes et qui servent de mécanismes pour échanger, expérimenter et appliquer des connaissances. Ces deux types d'institutions jouent des rôles importants et complémentaires.

Le chapitre se termine par des recommandations pratiques pour renforcer les institutions de diffusion technologique. Il importe ainsi que les politiques publiques permettent d'intégrer la diffusion des technologies et les institutions correspondantes à la

prochaine révolution de la production. On a tendance – c’est inévitable – à mettre en avant les progrès enthousiasmants de la recherche et le potentiel des technologies novatrices. Or, celles-ci ne produiront de véritable valeur ajoutée pour l’économie et la société que si elles sont conçues de façon responsable et déployées en concertation avec les utilisateurs et les autres parties prenantes, et si elles peuvent être transposées à une plus grande échelle, diffusées et améliorées dans leur utilisation. Les entreprises et les systèmes qui bénéficieront le plus de cette évolution seront ceux qui auront su mettre en œuvre le plus efficacement les nouvelles technologies et les nouveaux modèles économiques. Les responsables politiques sont en général conscients de l’importance déterminante de la diffusion des technologies, mais ont tendance à la négliger ensuite lorsqu’il s’agit d’y consacrer de l’attention et des ressources. Il est important de remédier à cette situation.

Les programmes de modernisation des entreprises existantes (la majorité des entreprises) doivent être dotés de ressources suffisantes, de même que les programmes visant à promouvoir le développement des technologies de pointe et les start-ups. Lorsque les institutions dédiées au déploiement des technologies sont peu développées ou inexistantes, il convient de les réformer ou d’en créer de nouvelles. Il faut également encourager l’expérimentation, l’apprentissage, l’acquisition de nouvelles compétences et la mise au point de nouveaux modèles au sein des institutions chargées de diffuser les technologies. Les enseignements tirés des activités pilotes doivent être pris en compte par ces institutions – nouvelles et existantes. Par ailleurs, les pratiques et les méthodes en matière de prestation de services doivent être systématiquement revues pour vérifier qu’elles sont efficaces et adaptées aux publics visés, qu’elles permettent l’échange de connaissances et qu’elles offrent des possibilités d’évolution en fonction des besoins. Des mécanismes de gestion doivent être mis au point pour réformer (ou remplacer) les institutions de diffusion technologique qui résistent au changement. Certaines pratiques devraient être évitées par les responsables de l’action publique, à commencer peut-être par celle qui consiste à concentrer l’attention et les ressources sur les politiques de soutien aux grandes découvertes et aux technologies de laboratoire attrayantes, en négligeant – ou tout au moins en ne soutenant pas suffisamment – la diffusion des nouvelles technologies et leur transposition à plus grande échelle. De surcroît, les efforts accomplis pour diffuser les nouvelles technologies visent souvent les primo-adoptants traditionnels, qui sont généralement de grandes multinationales, des start-ups de haute technologie et les quelques entreprises spécialisées dans la mise au point des technologies. Or, l’attention des pouvoirs publics ne devrait pas aller uniquement à ces primo-adoptants éventuels, mais aussi aux PME existantes, qui sont nettement plus nombreuses. En fait, le succès de la prochaine révolution de la production dépendra en grande partie de l’adoption des technologies par les PME.

Autre aspect important, il faut engager une réflexion sur le bien-fondé des politiques de soutien aux institutions de diffusion des technologies, qui ne doivent pas être assimilées à des programmes capables de recréer les emplois perdus dans le secteur manufacturier. Les institutions vouées à la diffusion technologique peuvent aujourd’hui aider les entreprises à modifier leurs méthodes de gestion et à renouveler leurs technologies, leurs produits et leurs stratégies. Il faudra du temps pour renforcer la capacité des entreprises manufacturières à absorber les technologies de la prochaine révolution de la production (entre cinq à dix ans, voire davantage). C’est pourquoi il faut donner aux institutions de diffusion des technologies les moyens qui leur permettront de se projeter sur le long terme.

De par son caractère systématique et réticulaire, la prochaine révolution de la production requiert, pour nombre de ses aspects, une étroite coopération entre les fabricants, les

utilisateurs et autres catégories d'acteurs. Entreprises, fournisseurs, utilisateurs et intermédiaires devraient être associés dans des stratégies de diffusion collaborative. Cela signifie que les institutions concernées – qui travaillent souvent seule sur un projet donné – doivent aujourd'hui mettre en place des stratégies et des actions qui peuvent s'inscrire dans un contexte de collaboration entre plusieurs acteurs. Elles doivent aussi répondre à des objectifs de durabilité ainsi que de recherche et d'innovation responsables.

Pour finir, il est indispensable d'examiner et d'analyser en permanence les modèles et schémas d'organisation de la diffusion technologique, en tenant compte du contexte évolutif de la prochaine révolution de la production. Dans cette démarche, les instruments d'évaluation doivent accorder plus d'importance au développement des capacités à long terme qu'aux résultats limités à court terme. Le partage des bonnes pratiques est également primordial. Les actions publiques et les méthodes de gestion doivent inciter les institutions de diffusion technologique à moderniser leurs pratiques et à expérimenter de nouvelles approches prometteuses à mesure que le paysage de l'innovation évolue.

Les institutions chargées de diffuser les technologies et leurs fonctions

Si le terme « technologie » est souvent associé aux machines et aux appareils, le sens à lui donner ici doit être plus large et inclure également l'organisation et l'utilisation pratique des connaissances¹. La technologie peut être matérialisée (dans les machines, par exemple) ou dématérialisée (sous la forme de savoir-faire, de méthodes et de processus). La diffusion technologique peut être considérée comme le processus qui consiste à faire connaître les innovations et les nouvelles technologies, et à en favoriser l'adoption². Elle repose sur des intermédiaires, des structures et des procédures qui facilitent l'adoption, la généralisation et la mise en œuvre de connaissances, de méthodes et de moyens techniques, qu'il s'agisse d'améliorer l'efficacité des installations de production existantes ou d'introduire de nouveaux processus concernant le développement des produits, la planification stratégique et la formation. Une institution dédiée à la diffusion des technologies peut combiner une présence tangible (par exemple, des installations), des capacités (individus, compétences, communications) et des partenariats (avec les développeurs et les utilisateurs des technologies), mais aussi des aspects « immatériels » comme le partage tacite des connaissances via des interactions informelles (spécialistes, autres entreprises).

Un système d'innovation englobe généralement plusieurs vecteurs de diffusion technologique (comme les universités, les organisations professionnelles et les médias), mais le présent chapitre s'intéresse plus particulièrement aux institutions publiques ou quasi publiques – ou à des parties de ces institutions – qui privilégient les tâches de diffusion technologique. Bien qu'elles jouent un rôle important dans le panachage de mesures mises en œuvre par les pays et les régions pour encourager le développement économique et l'innovation (recherche-développement, technologie, aide aux entreprises, capital humain, réglementation et mesures connexes), ces institutions sont parfois sous-estimées. La diffusion technologique est à distinguer du transfert de technologie, même si ces deux pratiques sont liées et peuvent se compléter. On entend par transfert de technologie le passage d'une technologie de son développeur à son utilisateur, le principal exemple (dans le secteur public) étant la création aux États-Unis (en vertu de la loi Bayh-Dole de 1980) de bureaux de transfert de technologie des laboratoires universitaires et fédéraux, qui concèdent aux entreprises des droits d'utilisation de la propriété intellectuelle financée par l'État fédéral³. Dans ce contexte, le transfert de technologies correspond à la cession, dans un cadre contractuel, des droits de propriété sur les résultats de travaux de R-D entre une

organisation publique et un cessionnaire. La diffusion des technologies est plus large dans sa portée et son intensité : outre un éventuel transfert de technologie, elle inclut également un volet communication pour aider les entreprises à utiliser plus efficacement leurs technologies et processus existants, leur fournir des conseils, des compétences et une formation pour qu'elles améliorent leurs capacités d'absorption et leurs performances, et les aider à diagnostiquer et résoudre les problèmes, y compris par l'intermédiaire de projets appliqués.

Les institutions dédiées à la diffusion technologique sont notamment les programmes de vulgarisation industrielle, les services aux entreprises axés sur la technologie, les centres de technologie appliquée, ainsi que les bureaux de transfert de technologie universitaires. Les réseaux, partenariats et collaborations ouvertes jouent également un rôle de plus en plus important dans la diffusion technologique. L'efficacité de ces institutions dépend de la capacité d'assimilation des nouvelles connaissances et des nouveaux services technologiques par les entreprises (Cohen et Levinthal, 1990), ainsi que de l'ampleur de la demande d'innovation et de nouvelles technologies (Edler, 2016). Les institutions chargées de diffuser les technologies contribuent à l'amélioration de la capacité d'assimilation des entreprises, par exemple via la formation, l'échange d'informations et le tutorat. D'autres initiatives visent des objectifs analogues, comme par exemple les chèques-innovation, qui encouragent les utilisateurs potentiels à entrer en contact avec les détenteurs de connaissances ou de technologies (OCDE, 2010b). Par ailleurs, le développement et l'adoption de nouvelles technologies sont influencés par des caractéristiques plus générales des systèmes d'innovation et de réglementation aux niveaux régional et national. Ainsi, Hekkert et al. (2007) recensent sept fonctions connexes du système d'innovation qui sont capitales pour comprendre la dynamique des évolutions technologiques, à savoir : présence d'un entrepreneuriat actif, processus de développement du savoir, réseaux de diffusion des connaissances, conseils, formation du marché, mobilisation de ressources humaines et financières, et orientation en faveur du changement. D'autres analystes mettent en évidence l'importance des dispositifs sociotechniques et des cadres à plusieurs niveaux pour les transitions technologiques (Geels, 2002).

Les systèmes d'innovation présentent des caractéristiques et des besoins différents selon les pays, et varient (y compris au niveau régional) dans l'organisation de leurs fonctions. On peut donc s'attendre à ce qu'il existe, entre et parmi les systèmes d'innovation, des disparités dans la conception et le fonctionnement des institutions de diffusion technologique. Par ailleurs, lesdites institutions peuvent, en fonction de caractéristiques comme leur autorité, leur stratégie, leur portée et leurs relations, avoir de l'influence sur le fonctionnement des systèmes d'innovation, par exemple en prodiguant des conseils sur les nouvelles technologies, en mettant les entreprises en contact avec des sources de financement pour moderniser leurs processus de fabrication, ou en signalant des débouchés commerciaux pour des produits innovants. Les institutions chargées de diffuser les technologies peuvent aussi servir d'intermédiaires en mettant les différentes entreprises en relation avec l'éventail parfois vaste et complexe de programmes et de fournisseurs qui composent les systèmes d'innovation. Elles peuvent entretenir des relations permanentes avec les systèmes d'innovation dont elles font partie, dans le sens où elles recherchent des méthodes de modernisation technologique ayant fait leurs preuves et où elles encouragent les changements, fussent-ils limités. L'importance de ces relations permanentes ne doit pas être sous-estimée : les PME sont souvent lentes à adopter de nouvelles technologies et, lorsqu'elles le font, des considérations relatives aux ressources, aux capacités et à la gestion

des risques militent en faveur d'une approche graduelle. Cela dit, les institutions de diffusion technologique peuvent aussi adopter des stratégies plus ponctuelles, en mettant au point des mécanismes et des méthodes d'innovation particulièrement utiles pour le déploiement des nouvelles technologies les plus importantes, notamment lorsque celles-ci requièrent des modifications du système sociotechnique. Ainsi, pour permettre l'installation de systèmes automatisés dans les usines, l'établissement d'un partenariat entre les utilisateurs, les distributeurs, les clients et les intermédiaires peut être nécessaire pour faciliter la mise en place de nouveaux systèmes de conception numérique et de partage de données, résoudre les problèmes de restructuration de l'emploi et de reconversion du personnel, et introduire des dispositifs de gestion intégrée (notamment des stocks).

Les raisons de l'intervention des institutions de diffusion technologique

Les principaux avantages (et les conséquences) des progrès technologiques apparaissent une fois que les technologies concernées sont diffusées et appliquées⁴. Il s'agit là d'un point essentiel : le débat sur les politiques à mener à l'égard des transformations technologiques émergentes se concentre souvent sur les modèles à venir, ainsi que sur les innovations attrayantes des laboratoires de R-D et quelques prototypes prometteurs. Or, qu'ils soient économiques, environnementaux ou sociétaux, les effets d'envergure d'une technologie ne pourront que s'accroître avec sa diffusion. De plus, la faisabilité et les performances des technologies émergentes – et des modèles économiques qui y sont associés – peuvent être encore améliorées lorsque les enseignements tirés de la diffusion des technologies auprès des utilisateurs et des clients bénéficient aux développeurs par le truchement de processus itératifs de conception, de mise en œuvre et d'expérimentation (Fleck, 1997 ; Govindarajan et Trimble, 2004 ; Baden-Fuller et Haefliger, 2013).

Dans la pratique, cependant, la diffusion des technologies n'est pas simple : de nombreux obstacles et insuffisances peuvent limiter, entraver ou bloquer l'adoption et l'utilisation effective non seulement des technologies et des méthodes de fabrication de pointe, mais aussi des meilleures qui existent déjà. Cela peut, en retour, peser sur les variables clés du processus de fabrication (comme par exemple la productivité, la qualité, le rendement, les pertes, la consommation d'énergie, le temps de réponse, la taille faisable des lots et les coûts), ainsi que sur la capacité à concevoir et développer des produits novateurs, et à produire de la valeur pour les utilisateurs et les clients (encadré 7.1). Des performances sous-optimales au niveau de la fabrication se répercutent non seulement sur les différentes entreprises (et en dernier lieu sur leur survie), mais aussi potentiellement sur les chaînes d'approvisionnement et les secteurs industriels, les pôles d'activité régionaux et la compétitivité de l'économie nationale ; elles peuvent aussi peser sur la capacité d'acquérir, d'assimiler et de déployer de nouvelles méthodes et technologies. Les difficultés de la modernisation industrielle et les conséquences des retards en la matière sont particulièrement visibles dans les entreprises existantes, surtout les PME (NAPA, 2003 ; National Academy of Engineering, 2012). Le recensement des entreprises manufacturières, qui a lieu aux États-Unis tous les cinq ans, montre par exemple que dans les PME (c'est-à-dire les entreprises de moins de 500 salariés), la valeur ajoutée par salarié a été généralement inférieure de 40 % à celle des grandes entreprises pendant la période 1992-2012 (US Census Bureau, 2016). Le rapport de l'OCDE intitulé *The Future of Productivity*, qui compare les entreprises manufacturières de plusieurs pays, met en évidence un écart important, en ce qui concerne l'augmentation de la productivité du travail, entre un groupe d'entreprises d'avant-garde et la majorité des autres entreprises. Les entreprises d'avant-garde – qui sont

généralement plus grandes, plus rentables et plus jeunes – ont enregistré entre 2001 et 2009 une hausse annuelle de la productivité du travail de 3.5 % en moyenne, contre 0.5 % pour celles de la seconde catégorie (OCDE, 2015). La diffusion des techniques et des technologies – qui inclut l'amélioration de la capacité des entreprises et de leurs chaînes d'approvisionnement

Encadré 7.1. **Les retards de la modernisation technologique dans le secteur manufacturier**

Pour quelles raisons les entreprises manufacturières ne sont-elles pas plus nombreuses à se doter de technologies et de processus plus modernes pour repousser les limites de leurs performances et de leur productivité ? Les réponses à cette question sont en général un ensemble d'insuffisances au niveau du marché, de l'action publique et du système. Cela inclut des contraintes qui pèsent sur les facteurs de production et le fonctionnement, comme par exemple le manque d'accès aux capitaux, aux compétences, aux connaissances et aux capacités de gestion, ainsi que des lacunes et des asymétries en matière d'information. Les entreprises (et en particulier les PME) ne possèdent souvent pas les informations, les compétences, la formation, les ressources, la stratégie et la confiance dont elles auraient besoin pour adopter de nouvelles technologies. Les fournisseurs et consultants indépendants peuvent se heurter à des coûts de transaction élevés lorsqu'ils cherchent à faire connaître une technologie auprès d'un grand nombre de petites entreprises. Les institutions publiques comme les universités et les centres de recherche nationaux privilégient souvent les publications, les technologies de pointe en laboratoire, et les start-ups de haute technologie ; les PME existantes trouvent souvent ces institutions compliquées et de commerce difficile, malgré les efforts accrus de ces dernières pour faciliter les relations. Les fonds nécessaires au déploiement à grande échelle et à la mise en œuvre d'une technologie ne sont pas toujours disponibles, ce qui crée un risque de sous-investissement de la part des entreprises. De plus, les entreprises industrielles possèdent des systèmes, pratiques et attitudes qui fonctionnent et déjà bien implantées. Il est souvent difficile d'y apporter des changements. Cela peut être dû aux « pièges des compétences », c'est-à-dire au fait que les entreprises, fortes de leur expertise et leur expérience dans leurs méthodes actuelles, hésitent à changer même s'il existe des méthodes plus efficaces, ou qu'un segment industriel ou une chaîne d'approvisionnement est « bloqué » dans un type d'approche moins performant à cause d'effets de réseau ou de comportements bien ancrés. Point important, le maintien de « pratiques non optimales », qui peut s'expliquer par des habitudes ou des préférences, et l'influence persistante des investissements passés (par exemple des pratiques non optimales inscrites dans une dépendance historique), peut être toujours bénéfique sur le court terme. Mais en perpétuant ces pratiques, les entreprises risquent de limiter leur capacité à évoluer vers des niveaux de performance plus élevés et des capacités plus durables qui leur permettraient d'être compétitives tout en conservant des niveaux de rémunération et des conditions de travail satisfaisants. Certaines entreprises manufacturières, par exemple, continuent d'utiliser des biens de production vieillissants et moins efficaces – en particulier dans les vieilles usines – parce que cela leur coûte moins cher à court terme que d'installer de nouvelles machines, qui offriraient pourtant des possibilités de personnalisation, d'économie d'énergie ainsi que de collecte et d'analyse de données pour améliorer les processus (Hagerty, 2013). Ces problématiques de l'offre peuvent interagir avec les impératifs de la demande, les clients des marchés intermédiaires et finaux étant peu enclins ou lents à déployer des produits innovants issus des nouvelles technologies, là aussi à cause de l'insuffisance du réseau (par exemple, absence de masse critique des utilisateurs), ainsi que d'un manque d'informations, de capitaux et autres ressources (Geels, 2002 ; Edler, 2010, 2016).

à repenser leurs systèmes – peut permettre d'accroître la productivité. Selon le McKinsey Global Institute, 55 % des gains de productivité pouvant être obtenus dans les pays développés proviennent de l'adoption des bonnes pratiques, et 45 % de l'innovation ; les gains provenant de l'adoption des bonnes pratiques sont encore plus élevés dans les économies émergentes et en développement (Manyika et al., 2015).

Les insuffisances publiques et systémiques qui entravent la modernisation industrielle justifient amplement que l'on soutienne les institutions et mécanismes de diffusion technologique. Si certains des obstacles à la modernisation peuvent être levés à l'aide d'instruments financiers indirects (subventions, prêts, incitations fiscales), un aspect essentiel de la mission des institutions de diffusion technologique demeure la fourniture directe de conseils et de services de soutien. Ce type d'aide active et experte est particulièrement importante pour pallier les manques d'informations, mettre fin aux pratiques historiques dépassées, et aider les entreprises et les chaînes d'approvisionnement à mettre au point des stratégies de modernisation. L'appui offert par les institutions de diffusion technologique est axé sur les capacités des entreprises et vise à aider ces dernières à justifier des investissements dans les nouvelles technologies et à les réaliser. Les institutions chargées de diffuser les technologies peuvent aussi travailler avec des segments industriels ou des chaînes d'approvisionnement qui sont « bloqués » dans des modes de fonctionnement figés, et dont l'évolution nécessite la stimulation et le soutien d'une action collective. Pour citer un exemple, la maintenance des processus de fabrication mécaniques peut être négligée jusqu'à ce qu'il y ait une panne ; l'entreprise peut conserver les processus existants parce qu'elle possède des stocks, ce qui facilite la continuité de la production mais accroît les coûts. L'introduction de capteurs et de moyens de communication perfectionnés envoyant en temps réel aux prestataires de services d'entretien des indications précoces sur l'usure des équipements pourrait résoudre ce problème, mais cela nécessiterait une collaboration entre les fabricants des machines, les utilisateurs et les prestataires de services afin qu'ils conviennent de protocoles communs. Une institution de diffusion technologique peut faciliter la recherche d'une solution en concevant un projet collaboratif et en convaincant les principaux utilisateurs de l'adopter, ainsi qu'en fournissant des conseils sur les options technologiques disponibles.

Dans le contexte particulièrement dynamique de la prochaine génération de technologies de production, le traditionnel argument des défaillances du marché prendra sans doute encore plus de poids lorsqu'il s'agira de légitimer les interventions, les utilisateurs potentiels étant mis au défi de faire le tri parmi une masse croissante d'informations et de mûrir une décision dans un contexte où les technologies et les besoins en compétences spécialisées évoluent rapidement. Par ailleurs, il existe sans doute aussi de plus en plus de raisons systémiques majeures pour non seulement soutenir les institutions de diffusion technologique existantes, mais aussi en créer de nouvelles qui soient en adéquation avec les nouveautés en matière de production et les progrès technologiques. Les feuilles de route technologiques comme « Industry 4.0 » en Allemagne et *Synthetic Biology Roadmap* au Royaume-Uni ont contribué à poser les bases des transformations industrielles systémiques et globales. Ces scénarios ne se concrétiseront que si la diffusion des technologies est parfaitement intégrée et mise en œuvre à une échelle suffisante. Or, un grand nombre des institutions existantes ont été façonnées pour le XX^e siècle, lorsque la R-D était conçue de façon linéaire ; la diffusion est venue s'ajouter après coup. L'importance accrue que l'on accorde à la responsabilité dans le domaine de l'innovation et à la nécessité de s'attaquer aux défis mondiaux est une source de difficulté supplémentaire pour les institutions de diffusion technologique. À l'avenir, ces dernières devront être plus engagées

dans des missions qui, non seulement promeuvent la diffusion auprès des différentes entreprises, mais aussi créent des liens avec des réseaux de fournisseurs, d'utilisateurs et de clients. Ces méthodes devront de plus en plus inclure des mécanismes de conception responsable, d'intégration et d'utilisation des technologies émergentes.

Les types d'institutions de diffusion technologique

De manière générale, comme on l'a vu, les institutions de diffusion technologique sont des intermédiaires qui utilisent des structures et des procédures facilitant l'adoption, la diffusion et la mise en œuvre de connaissances, de méthodes et de moyens techniques. Si ces institutions partagent le même défi général de pallier les défaillances du marché, de l'action publique et du système, elles présentent en revanche des différences dans leurs modalités de mise en service, d'organisation et de gestion. Ces différences tiennent d'une part aux lacunes et aux objectifs spécifiques auxquels chaque institution est chargée de s'attaquer, et d'autre part aux disparités nationales, régionales et sectorielles qui existent entre les systèmes d'innovation (contextes, politiques publiques et pratiques). Les institutions de diffusion technologique à vocation publique peuvent être gérées par des universités, des organismes gouvernementaux ainsi que des organisations avec ou sans but lucratif, ou leur être associées. Leurs missions peuvent être axées sur le transfert de technologies de pointe, le déploiement de méthodes connues auprès de nouveaux utilisateurs, ou les deux à la fois. Là encore, selon leur mission et leur orientation, les institutions peuvent travailler – ou être associées – avec des laboratoires de R-D, des centres de formation et de démonstration, ainsi que des espaces d'échange et de rencontre. Bien que la diffusion technologique soit leur objectif central, ces institutions participent souvent à toutes sortes d'activités et de partenariats qui les aident dans leur mission, notamment aux côtés d'organisations actives dans le domaine de l'innovation, la technologie, le secteur de l'entreprise et le développement des compétences.

Malgré les multiples combinaisons possibles de formes et de fonctions, les institutions de diffusion technologique peuvent être classées en plusieurs catégories en fonction de certaines de leurs caractéristiques comme leur approche de la diffusion et leurs activités. Une typologie de six catégories d'institutions a été établie (tableau 7.1), qui comprend notamment les services extérieurs dédiés, les services aux entreprises axés sur la technologie (qui fournissent aux entreprises des compétences spécialisées, des conseils et d'autres ressources) et les centres de technologie appliquée/avancée, qui ont les moyens d'entreprendre de la R-D axée sur les entreprises. Entrent également dans cette typologie les instruments d'échange de connaissances/axés sur la demande – qui servent d'intermédiaires et de moteurs pour la diffusion des technologies –, ainsi que les mécanismes technologiques ouverts, qui représentent de nouveaux procédés, souvent virtuels, pour établir un lien entre le développement des technologies et leur diffusion. Les six catégories d'institutions ne s'excluent pas mutuellement : certains centres de technologie appliquée proposent par exemple des services extérieurs, et les centres de technologie avancée participent à des réseaux de transfert de connaissances. Cette typologie n'est par ailleurs pas exhaustive, d'autres catégories pouvant y être ajoutées. L'éventail des institutions répertoriées permet malgré tout de mettre en évidence la diversité des approches actuelles de la diffusion technologique, de tirer des enseignements sur les approches et les pratiques efficaces, et de voir comment ces institutions font face aux défis que présente la prochaine révolution de la production. Les principales catégories d'institutions sont examinées en détail dans les sections suivantes.

Tableau 7.1. **Typologie des institutions de diffusion technologique**

Mécanismes de diffusion	Nature des activités (principales)	Exemples
Services extérieurs dédiés	Diagnostics, conseils et accompagnement	<i>Manufacturing Extension Partnership</i> (États-Unis)
Services aux entreprises axés sur la technologie	Conseils en rapport avec le financement Développement des capacités	Programme d'aide à la recherche industrielle (Canada) I-Corps (États-Unis)
Centres de technologie appliquée	Recherche contractuelle, recherche appliquée collaborative, prototypage et normalisation	Instituts Fraunhofer (Allemagne) National Network for Manufacturing Innovation (États-Unis) Kohsetshushi Public Technology Centers (Japon)
Centres de R-D ciblée	Recherche sur les technologies émergentes associée à des missions de commercialisation	Campus for Research Excellence and Technological Enterprise (Singapour)
Instruments d'échange de connaissances/ axés sur la demande	Travail en réseau Incitations au transfert de connaissances	<i>Knowledge Transfer Networks</i> (Royaume-Uni) Chèques-innovation (plusieurs pays)
Mécanismes technologiques ouverts	Bibliothèque technologique partagée Réseaux virtuels	<i>BioBricks/Registry of Standard Biological Parts</i> (États-Unis)

Source : Analyse des auteurs.

Les services extérieurs dédiés

Les services extérieurs dédiés travaillent avec les PME pour les aider à adopter des techniques et des technologies de fabrication modernes et ayant fait leurs preuves, en faisant appel à des spécialistes du secteur, généralement du domaine de l'ingénierie. Ces services sont généralement fournis de façon décentralisée, les spécialistes se rendant sur le site de production pour travailler sur des projets visant à résoudre les problèmes et répondre aux besoins de l'entreprise. Les services extérieurs dédiés proposent des aides variées concernant notamment les systèmes qualité, la production à flux tendu, les économies d'énergie, la protection de l'environnement, la santé et la sécurité, les systèmes informatiques et les logiciels, le développement des produits et le marketing. Ils incluent généralement une évaluation de l'entreprise concernée, la conception d'un projet approfondi et une offre personnalisée de formation. Les services extérieurs dédiés peuvent être fournis par le prestataire lui-même ou par d'autres intervenants : consultants privés, programmes gouvernementaux, organisations de développement des ressources humaines ou centres de recherche appliquée. Le financement de ces services est souvent assuré à la fois par des honoraires facturés aux clients et par une aide publique de base (Shapira et al., 2015).

Le *Manufacturing Extension Partnership* (MEP) est un programme de services extérieurs dédiés mis en place aux États-Unis à l'intention des PME. Créé en 1989, le MEP a évolué progressivement tout au long des années 90 pour devenir un réseau national comprenant des centres dans chacun des États du pays – plus Porto Rico –, avec souvent plusieurs bureaux locaux dans chaque État en fonction de la taille de ce dernier. Certains centres ont le statut d'entités privées à but non lucratif, d'autres d'unités universitaires à vocation non pédagogique, et d'autres encore de programmes gérés par l'État. Le MEP est géré par le National Institute of Standards and Technology (NIST), placé sous l'autorité du ministère du Commerce des États-Unis. Le NIST finance un tiers du budget de ces centres avec des sources non fédérales représentant un ratio de trois pour un. La contribution fédérale au budget du MEP était d'environ 130 millions USD au cours de l'exercice 2016. En janvier 2017, la loi sur « l'innovation et la compétitivité américaines » a ramené la part fédérale du financement du MEP à 50 %⁵. Les centres fournissent un ensemble concret de services ayant trait à l'amélioration des processus, au développement des produits, au marketing, à la formation

et au développement durable (par exemple l'utilisation rationnelle de l'énergie et la gestion environnementale). La plupart des centres mettent également les PME du secteur manufacturier en relation avec d'autres organismes d'aide (publics et privés). Leur gouvernance repose sur un accord de coopération entre le NIST et chaque centre. Les centres du MEP abritent des comités consultatifs nationaux composés principalement de PME. Le programme MEP dessert entre 7 000 et 8 000 PME à travers le pays, dans le cadre de quelque 12 000 projets. Il fait l'objet d'un vaste processus d'évaluation (comptes rendus d'activités et déclarations des clients, enquêtes indépendantes auprès de ces derniers, rapports annuels, examen par des commissions d'experts et études spéciales) en vue de mesurer les impacts économiques tels que les économies réalisées, les ventes, les investissements, les emplois et la productivité.

Les services aux entreprises axés sur la technologie

Les services aux entreprises axés sur la technologie ont pour but d'aider les start-ups et les petites entreprises en combinant assistance et soutien financier. Leur rôle est de remédier à la fragilité des liens qui existent entre les efforts de modernisation technologique de ces entreprises et leurs ressources financières. Les deux programmes emblématiques de cette catégorie sont le Programme d'aide à la recherche industrielle, au Canada, et l'*Innovation Corps* (I-Corps), aux États-Unis.

Le Programme d'aide à la recherche industrielle (PARI) a été mis sur pied au début des années 60 par le Conseil national de recherches du Canada (CNRC). Il est coordonné par un réseau décentralisé de bureaux locaux et géré par le CNRC (Shapira et al., 2015). Il fait appel à d'anciens cadres pour travailler avec les entreprises, offre des financements non remboursables pour des projets de R-D appliquée menés par des PME, et collabore avec des organisations partenaires pour fournir des services aux entrepreneurs. Ce programme gère ses propres bureaux ainsi que des organisations partenaires dans cinq régions, la plupart de ses bureaux étant situés dans les provinces du Québec et de l'Ontario. Près de la moitié du budget annuel du PARI (qui s'élève à environ 90 millions USD) finance des services de conseil ; le reste est consacré à des projets de R-D appliquée. Les services fournis aux entreprises sont gratuits. Le programme entretient des relations régulières avec un portefeuille d'entreprises clientes. Il verse en outre des financements à des organisations du secteur public situées dans des zones reculées, afin de les aider à fournir des services aux entreprises. Quelque 10 000 entreprises bénéficient chaque année des services du PARI, dont un tiers reçoivent typiquement des financements non remboursables. Les entreprises bénéficiaires sont des PME de produits, principalement dans les secteurs des technologies de l'information et des communications (TIC), des matériaux et de la fabrication, de la construction, de l'agriculture et de l'alimentation, de l'énergie et de l'environnement, et des sciences de la vie. Les clients recevant des aides non remboursables doivent rendre compte de l'état d'avancement des projets et fournir des évaluations d'impact. Conformément à la loi, le PARI fait l'objet d'une évaluation indépendante tous les cinq ans.

Le programme I-Corps a été mis sur pied aux États-Unis en 2011 par la National Science Foundation (NSF) pour accélérer le lancement d'entreprises en s'appuyant sur la recherche scientifique. Il utilise le programme d'enseignement « Lean LaunchPad » de l'Université de Stanford, élaboré par Steve Blank (2013). L'idée est de former des équipes composées d'un chercheur principal de la NSF, d'un responsable entrepreneurial (généralement un étudiant ou un chercheur postdoctoral) et d'un tuteur. I-Corps utilise des techniques simples pour sélectionner des clients, à savoir des méthodes systématiques pour déterminer ce qui

intéresse le plus les clients et tester les produits ou services qui répondent le mieux à leurs besoins. La formation utilise le « Business Model Canvas » d'Alexander Osterwalder (Osterwalder et Pigneur, 2010), qui oblige les équipes à concevoir un modèle de gestion théorique pour une ou plusieurs applications de leurs recherches. Ces équipes doivent, hors de leur laboratoire, s'entretenir avec une centaine de clients et partenaires potentiels de leur projet de produit ou de service dans le cadre du modèle de gestion théorique qu'elles ont conçu, en apportant des modifications (également appelées « pivots ») à ce modèle en fonction des commentaires qu'elles reçoivent. Après un « camp d'entraînement » de trois jours (c'est-à-dire une formation courte et intensive pour les entrepreneurs), les modifications suggérées dans les commentaires sont examinées. Chaque équipe procède ensuite à des choix, autrement dit décide de poursuivre ou non l'application en lançant une activité ou en octroyant une licence. Des observations ponctuelles sur les premières cohortes des I-Corps ont montré que l'absence de services et d'infrastructure de soutien dans les universités où elles se trouvaient ont limité leur succès. La NSF en est donc venue à créer un écosystème composé de ce que l'on appelle les « nœuds » et les « sites ». Les nœuds sont des unités disséminées au niveau régional dans les universités et dont le rôle est de dispenser des formations ; les sites fournissent des aides à l'entrepreneuriat et à la commercialisation aux équipes I-Corps dans les universités, souvent sur les campus d'origine pour faciliter la formation d'équipes. VentureWell, connu autrefois sous le nom de National Collegiate Inventors and Innovators Alliance (NCIIA), dirige le *National Innovation Network* qui gère une base de données des activités I-Corps, œuvre pour le développement des ressources collectives et évalue en permanence le programme. Il n'existe pas d'études comparatives des groupes I-Corps, mais selon les premières évaluations, les formations dispensées ont permis de multiplier par trois le nombre de groupes connaissant le modèle économique. Le budget de la NSF pour le programme I-Corps était de 30 millions USD au cours de l'exercice 2016 (US NSF, 2016). Les primes de 50 000 USD versées aux équipes couvrent les dépenses associées à la formation et à la sélection des clients. Les sites reçoivent jusqu'à 100 000 USD pour trois ans. Les nœuds touchent entre 2 millions et 4 millions USD sur trois ans pour dispenser les formations. L'intérêt pour le programme I-Corps s'est étendu à d'autres instances fédérales américaines, dont les National Institutes of Health, le ministère de l'Énergie, le ministère de la Défense, le ministère de la Sécurité intérieure et la Small Business Administration. Des méthodes similaires de sélection des clients ont été adoptées dans d'autres pays, par exemple par le programme SynbiCITE au Royaume-Uni, qui utilise lesdites méthodes pour accélérer la commercialisation des applications de la biologie de synthèse (SynbiCITE, 2016).

Les centres de technologie appliquée

Les centres de technologie appliquée effectuent des travaux de R-D contractuels pour le compte d'entreprises privées, d'administrations locales et nationales, et d'autres types d'organisations. Ces centres peuvent être intégrés à des organisations polyvalentes de plus grande taille. Un exemple type est la Fraunhofer Society, un réseau privé à but non lucratif constitué d'une soixantaine d'instituts de recherche allemands qui mènent des travaux de recherche contractuelle pour l'administration (de l'État fédéral et des Länder) et des organisations privées (Fraunhofer, 2016). Créée en 1949, la Fraunhofer Society est placée sous l'autorité du ministère allemand de l'Éducation et de la Recherche, mais gère elle-même une grande partie de ses activités. Chaque institut qui la compose est spécialisé dans une technologie ou un secteur particulier et fait appel, pour ses travaux de recherche, à un ensemble de chercheurs en interne et d'étudiants. Les services fournis incluent de la

recherche pré-concurrentielle, de la recherche appliquée bilatérale avec différentes entreprises, du prototypage ainsi que des modalités de pré-production et de transfert de technologie collaboratif. Il s'agit en général de projets de grande ampleur, très individualisés et de grande valeur. Le budget de la Fraunhofer Society provient pour un tiers des grandes sources institutionnelles (de l'ordre de plus de 700 millions USD). Le reste est financé par le secteur privé et les organismes publics. Les instituts faisant partie de la Fraunhofer peuvent fournir leurs services à des clients situés dans d'autres régions, et certains instituts sont implantés aux États-Unis et placés sous la direction de Fraunhofer USA. Leur tâche est de produire des publications, des brevets, des contrats de recherche et des licences, et de lancer des start-ups. D'autres groupements de centres de technologie appliquée existent également aux Pays-Bas (TNO), au Danemark (GTS Institutes), en Norvège (SINTEF) et en Espagne (Technalia) (Solberg et al., 2012 ; Shapira et al., 2015).

Aux États-Unis, le National Network for Manufacturing Innovation (renommé officiellement Manufacturing USA en 2016) est une initiative visant à mettre en place dans le pays un système similaire à la Fraunhofer Society, dédié à la recherche appliquée et à la commercialisation des principales technologies de production (US NNMI, 2016). Ce réseau se compose d'instituts de recherche chapeautés par une organisation privée à but non lucratif. Le premier de ces instituts, spécialisés dans l'impression 3D, a été créé à Youngstown/Ohio en 2012. Le financement de base des instituts provient d'organismes différents selon la mission de chaque institut (par exemple le ministère de la Défense, le ministère de l'Énergie, le ministère du Commerce, la National Aeronautics and Space Administration et la NSF). L'enveloppe de base (quelque 60 millions USD) fournie pour plusieurs années est alimentée par plusieurs sources, notamment les frais d'adhésion versés par les entreprises privées (multinationales et plus petites), les universités et les organisations à but non lucratif. L'adhésion donne accès à la propriété intellectuelle sans versement de droits d'auteur (selon le tarif payé par l'organisation membre) et confère le droit de participer aux projets de R-D des instituts ainsi que d'influer sur le programme de recherche de ces derniers. Beaucoup d'instituts doivent traiter des problèmes majeurs de normalisation, en particulier lorsque les produits à fabriquer nécessitent des systèmes complexes. L'un des projets du Digital Manufacturing and Design Innovation Institute consiste par exemple à mettre au point un système de fabrication numérique permettant le partage de données, l'analyse, la modélisation, l'outillage et l'assemblage. Le fait de pouvoir s'appuyer sur les compétences d'un groupe de membres permet aux instituts de recueillir plus facilement des ressources et de mettre à contribution la communauté appropriée (DMC, 2016).

Les centres de R-D ciblée

Si les centres de technologie appliquée travaillent principalement sur des projets propres à telle et telle entreprise – grâce à un haut degré de participation et de gestion des entreprises –, les centres de R-D ciblée sont, eux, dirigés surtout par les chercheurs eux-mêmes, dans le but de mener des recherches de pointe sur les technologies émergentes, et de générer des retombées économiques. Ces centres ont de plus en plus pour tâche de répondre aux enjeux sociétaux en développant et en diffusant leurs technologies ciblées. Ils sont généralement hébergés dans les universités et bénéficient pour leurs recherches d'un soutien important de la part de parties prenantes publiques qui souhaitent par leurs actions faire avancer certaines technologies émergentes dont elles pensent qu'elles auront un fort impact sur l'économie et la société. Ces aspects économiques et sociétaux sont de plus en plus pris en compte – et de façon toujours plus explicite – dans plusieurs projets phares de

R-D lancés récemment dans des domaines touchant aux technologies émergentes. Pour citer des exemples nationaux, la NSF a cautionné aux États-Unis 17 centres d'ingénierie et de recherche scientifique à l'échelle nanoscopique – chacun travaillant dans un domaine spécifique des nanotechnologies émergentes – dans un cadre (la loi intitulée « 21st Century Nanotechnology Research and Development Act »⁶) qui met l'accent non seulement sur la recherche de pointe, mais aussi sur l'incorporation de nouvelles technologies dans les produits, l'acquisition de nouvelles compétences et la conception de nouveaux outils, ainsi que le développement responsable (Fisher et Mahajan, 2006 ; Rogers, Youtie et Kay, 2012). Au Royaume-Uni, six centres de recherche sur la biologie de synthèse ont été soutenus dans le cadre d'un programme national visant à faire progresser les capacités de recherche, à encourager les liens industriels et la commercialisation de la biologie de synthèse, à accroître la formation et à promouvoir une recherche et une innovation responsables (UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group, 2012 ; Shapira et Gök, 2015).

Les centres de R-D ciblée peuvent faire intervenir plusieurs universités et autres parties prenantes, et les approches pluri-institutionnelles mises en œuvre entraînent souvent des liens avec d'autres pays. Le Campus for Research Excellence and Technological Enterprise (CREATE), à Singapour, utilise une approche de ce type combinant une recherche et une commercialisation ciblées ainsi que des partenariats internationaux⁷. Conçu par le gouvernement singapourien, CREATE s'appuie sur des partenariats entre deux grandes universités de recherche du pays et dix prestigieuses universités similaires des États-Unis, d'Europe, du Moyen-Orient et d'Asie pour mettre au point de nouvelles technologies de production en vue de relever les grands défis sociétaux de la ville-État de Singapour (CREATE, 2016). CREATE a été mis en service en 2006 sous la direction de la National Research Foundation de Singapour. Un centre de recherche d'un coût de 250 millions USD a été implanté à côté du campus University Town (UTown) de l'Université nationale de Singapour (NUS). Par ailleurs, chaque université partenaire étrangère reçoit environ 100 millions USD pour effectuer des travaux de recherche appliquée, dont 75 % à 80 % bénéficient au partenaire singapourien – généralement la NUS ou l'Université technologique de Nanyang Technological (NTU) – pour financer les chercheurs et les équipements. Les accords de recherche conclus entre les universités sont d'une durée de cinq ans, renouvelable d'autant.

Le programme avait sélectionné à l'origine comme partenaires neuf universités étrangères : l'École polytechnique fédérale de Zurich (Suisse) ; le Massachusetts Institute of Technology (MIT) ; l'Université technique de Munich ; l'Université hébraïque de Jérusalem ; l'Université Ben Gourion ; l'Université de Californie, à Berkeley ; l'Université de Pékin ; l'Université Jiao Tong de Shanghai ; enfin, l'Université de Cambridge. Chaque projet de recherche inclut deux chercheurs chevronnés : généralement un de la NTU ou la NUS (mais d'autres universités singapouriennes peuvent aussi participer), et l'autre de l'université étrangère partenaire. Les projets qui sont menés relèvent de quatre domaines interdisciplinaires : les systèmes humains (par exemple, les maladies tropicales et infectieuses), les systèmes environnementaux (comme la gestion de l'eau), les systèmes urbains (tels que les véhicules sans chauffeur) et les systèmes énergétiques (comme l'efficacité énergétique des bâtiments). Le programme utilise plusieurs mécanismes pour s'assurer que la commercialisation a bien lieu à Singapour. Chaque université partenaire doit, pour pouvoir recevoir les bourses de recherche et les utiliser, établir une société à responsabilité limitée à Singapour. De même, les directeurs des centres de recherche des universités étrangères doivent être installés ou passer la majorité de leur temps à Singapour, et l'ensemble des chercheurs expérimentés des universités partenaires doivent avoir résidé

un an à Singapour, dont au moins six mois consécutifs. Les droits de propriété intellectuelle sont gérés par le Singapore Technology Licensing Office. La gestion du programme implique la collecte de grands indicateurs de performance et leur approbation mutuelle par la National Research Foundation et l'université étrangère partenaire.

Les instruments d'échange de connaissances/axés sur la demande

On accorde depuis quelques années une attention croissante à la création d'institutions intermédiaires pour faciliter les processus de diffusion technologique. Un rôle plus important est également dévolu aux instruments axés sur la demande, qui permettent d'inciter les entreprises à interagir avec des intermédiaires de la diffusion technologique, ainsi qu'avec des fournisseurs de technologies du côté de l'offre. Ces mécanismes « d'expansion » sont considérés comme essentiels pour le processus itératif de mise en relation, de médiation et de diffusion des connaissances relatives aux nouvelles technologies et aux nouvelles méthodes entre les entreprises et les organisations de recherche et de technologie, et en leur sein (Aldrich et Herker, 1977 ; Tushman, 1977 ; Kaufmann et Tödtling, 2001 ; Virani et Pratt, 2016). Il existe une grande variété de mécanismes de ce type, les réseaux qui se développent le plus étant non seulement ceux des transferts de technologie, mais aussi d'échange de connaissances et de coproduction ; on note aussi l'utilisation croissante – et inventive – d'incitations axées sur le comportement afin d'encourager les entreprises à traverser les frontières pour s'initier à de nouvelles approches.

Les politiques publiques visant explicitement à favoriser la création de réseaux interentreprises pour faire progresser l'innovation via l'échange d'informations et la collaboration ont fait leur apparition en Italie dans les années 70, pour s'étendre ensuite au Danemark dans les années 80, puis dans de nombreux autres pays de l'OCDE (Cunningham et Ramlogan, 2016). Un exemple actuel est le *Knowledge Transfer Network* (KTN), un réseau créé au Royaume-Uni par l'agence de promotion de l'innovation Innovate UK, financée par des fonds publics. Le KTN aide tout un ensemble d'entreprises, d'universités, d'investisseurs, d'organisations à but non lucratif et autres acteurs intéressés, à échanger et collaborer dans des domaines technologiques précis. Les experts du KTN servent par ailleurs de catalyseurs pour les activités du réseau, qui couvrent 16 grands secteurs (parmi lesquels la biotechnologie, les industries créatives et l'économie numérique, la fabrication, les matériaux, la durabilité et l'économie circulaire). Le KTN réunit également une vingtaine de groupes d'intérêt sectoriels autour de thèmes comme la fabrication flexible, l'informatique sobre en énergie, la robotique et la biologie de synthèse⁸. Les activités du KTN consistent à faciliter les échanges en ligne entre les membres du réseau, à organiser des manifestations ouvertes, à collaborer avec les pôles de connaissances (par exemple dans le domaine de la chimie des matériaux ou de l'innovation de procédé), à faciliter l'accès à des concours de financement et à organiser des groupes de travail et des feuilles de route. En 2015-16, le KTN comptait plus de 77 000 membres, plus de 400 manifestations, qui ont attiré plus de 20 000 participants, plus de 120 feuilles de route et analyses, et plusieurs milliers d'entretiens individuels ; il avait en outre soutenu 455 propositions de financement et environ 120 campagnes de collecte de fonds. Le budget annuel du réseau est d'environ 15.8 millions GBP.

De manière générale, les réseaux d'échange de connaissances se composent des membres d'une chaîne de valeur particulière (par exemple : les concepteurs et les utilisateurs potentiels d'une technologie émergente ; les entreprises et les organisations technologiques faisant partie d'une chaîne d'approvisionnement sectorielle particulière). Ces réseaux

peuvent être nationaux ou internationaux, ou encore avoir une dimension régionale. Lorsque l'échange de connaissances technologiques présente un caractère régional prononcé, les réseaux peuvent fusionner avec des pôles d'activité – ou encore en émaner ou évoluer vers ce type de structure – qui, globalement, mettent en relation des groupes d'entreprises et d'autres acteurs du système d'innovation situés dans des zones géographiques précises. En Allemagne, plus de 450 pôles d'activités régionaux ont été recensés, dont un grand nombre sont financés par l'État fédéral et les Länder, ainsi que d'autres pôles privés (Clusterplatform Deutschland, 2017). Les secteurs technologiques actifs (nombre de pôles d'activité régionaux en janvier 2017) sont notamment les suivants : environnement (79), énergie (69), information et communications (69), production (66), matériaux (48), industrie automobile (41), biotechnologie (41), génie électrique, mesure et capteurs (34)⁹. Ces pôles aident les entreprises à participer avec d'autres entreprises et institutions à des activités de développement et de diffusion des technologies, et à établir un lien entre ces activités et des stratégies de conception de nouveaux produits, de marketing et d'internationalisation. L'un des moteurs du développement de cet éventail dense et varié de réseaux d'échange fut le programme *Kompetenznetze* (« réseaux de compétences »), créé au milieu des années 2000 par le ministère fédéral de l'Économie et de la Technologie de l'époque. Ce programme encourageait la création et la reconnaissance de plus d'une centaine de réseaux régionaux – notamment dans les sciences de la vie, l'agroalimentaire, la médecine, les énergies renouvelables et les technologies de l'information –, répartis dans toute l'Allemagne (BMW, 2010). En 2012, le programme *Kompetenznetze* a été intégré à la plateforme allemande de pôles d'activité financée conjointement par le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (BMW) et le ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (BMBWF). Dans le cadre de cette plateforme, le BMW subventionne un programme *Go Cluster* qui fournit une procédure de certification des pôles, l'accès à des fonds publics, la possibilité de participer à des activités de réseau transversales, et les conseils d'une agence indépendante. On dénombre une centaine de pôles d'activité *Go Cluster* en Allemagne, soit environ 13 000 membres dont 8 500 entreprises (des PME, pour la plupart), ainsi que des universités, les instituts de la Fraunhofer Society, des centres de technologie et de recherche non universitaires, et des organisations professionnelles. Une récente évaluation montre que la mise en relation des entreprises avec ces ressources complémentaires via les pôles d'activité régionaux a favorisé les innovations et leur mise en œuvre (Ekert, Schüren et Bode, 2016).

Ces réseaux et d'autres du même type se caractérisent par une communauté d'intérêts industriels, technologiques ou régionaux, la libre participation, la mise à disposition de capacités essentielles pour favoriser l'échange d'informations, des activités collaboratives, des projets, une volonté de mettre en œuvre et de déployer des technologies d'avenir, ainsi qu'une gouvernance et une gestion efficaces (voir aussi BMW, 2010 ; Cunningham et Ramlogan, 2016). Les réseaux d'échange de connaissances peuvent aussi assumer des fonctions de coproduction, les entreprises travaillant souvent avec des institutions technologiques pour mener conjointement des projets de développement ainsi que des tâches groupées de conception, production, formation et marketing, généralement entre des membres du réseau proches géographiquement. Des programmes de travail en réseau associant « villes intelligentes » et secteurs industriels ont été mis sur pied dans plusieurs pays européens et ailleurs. Exemple, Brainport Eindhoven aux Pays-Bas, où l'encadrement, l'augmentation des échanges de connaissances et les nouvelles interactions en matière de coproduction ont favorisé la redynamisation de cette vieille région portuaire industrielle (Horlings, 2014). Au Royaume-Uni, une initiative financée par deux conseils de recherche

étudie des possibilités de « fabrication redistribuée », en déployant des technologies de fabrication avancées dans des entreprises flexibles regroupées localement en pôles d'activité, ce qui pourrait conférer à ces dernières un avantage concurrentiel durable par rapport aux chaînes d'approvisionnement mondialisées traditionnelles (Pearson, Noble et Hawkins, 2013). Des pistes prometteuses sont expérimentées par ces réseaux, par exemple dans le domaine des médicaments et de la santé, des biens de consommation et des données massives ; d'autres examinent les avantages potentiels de la fabrication redistribuée, avec l'impression en 3D et les « makerspaces » (Freeman, McMahon et Godfrey, 2016 ; Moreno et Charnley, 2016 ; Zaki et al., 2017).

Ces réseaux et initiatives d'échange de connaissances sont complétés par des mesures incitatives visant à stimuler l'intérêt du côté de la demande et à favoriser de nouvelles relations transfrontières pouvant accélérer la diffusion des technologies entre les entreprises, en particulier les PME. Ces incitations peuvent prendre la forme de chèques-innovation que les PME peuvent utiliser pour acheter du temps et obtenir de l'assistance auprès de centres de recherche et de technologie ainsi que d'organismes d'aide aux entreprises. Ces chèques sont associés à de modestes incitations financières pour favoriser l'intérêt, la demande et le changement de comportement des entreprises, de manière à encourager l'interaction avec les universités, les centres de recherche, les consultants spécialisés et d'autres sources de connaissances et de technologies (Bakhshi et al., 2015). Les chèques-innovation sont préconisés à la fois par les administrations nationales et régionales. Ils existent aux Pays-Bas, en Irlande et au Royaume-Uni (parmi plus de 20 pays européens), ainsi qu'en Australie, au Canada, en République populaire de Chine (ci-après « la Chine »), en Inde, à Singapour et aux États-Unis (DG ENTR-Unit D2, 2009 ; Langhorn, 2014 ; CORFO, 2016). Le montant du chèque est généralement peu élevé (de 3 000 EUR environ à moins de 10 000 EUR) et peut s'accompagner d'une obligation de contrepartie en espèces ou en nature par la PME bénéficiaire. Les chèques-innovation n'ont pas vocation à financer le coût d'un gros projet : ils ne correspondent généralement qu'à un budget de quelques jours. En revanche, ils visent à susciter un changement de comportement, afin d'encourager les PME à entrer en contact avec d'autres organisations pour explorer de nouvelles pistes en matière de technologie et de gestion, entreprendre des projets et envisager des étapes complémentaires et des options possibles. Les chèques-innovation peuvent être conçus pour des PME de certains secteurs remplissant les conditions requises (le secteur manufacturier ou les services de pointe, par exemple), pour mettre l'accent sur certaines technologies en particulier (notamment les TIC), ou pour encourager les liens avec des domaines de compétence spécifiques dans les milieux universitaires ou le secteur privé. Bien que ces chèques ne soient pas suffisants pour modifier totalement l'attitude des PME à l'égard de l'innovation, les évaluations qui ont été faites (y compris de façon aléatoire) montrent qu'ils encouragent les entreprises à établir de nouvelles relations et à entreprendre de nouveaux projets (Cornet, Vroomen et van der Steef, 2006 ; OCDE, 2010 ; Sala, Landoni et Verganti, 2015 ; Bakhshi et al., 2015). Les bonnes pratiques qui sont associées aux chèques-innovation sont notamment une gestion publique efficace, une bonne organisation de la mise en relation des entreprises avec des sources d'expertise, des démarches administratives minimales pour les participants, un marketing satisfaisant et des capacités pour lancer des projets complémentaires (OCDE, 2010b).

Les chèques-innovation ne sont qu'un exemple des instruments axés sur la demande qui peuvent être utilisés pour encourager la diffusion technologique. Les autres instruments sont notamment l'utilisation ciblée des marchés publics, les incitations fiscales et les

subventions visant à réduire le coût des nouvelles technologies pour les utilisateurs, les opérations de sensibilisation, la formation, la facilitation des interactions entre les fabricants et les utilisateurs, ainsi que l'adoption d'une réglementation favorisant le déploiement des nouvelles technologies (Blind, Petersen et Riillo, 2016 ; Edler, 2016 ; Uyarra 2016). Certains de ces instruments sont des mécanismes « immatériels » qui utilisent des approches indirectes fondées sur l'information ou les comportements ; d'autres en revanche reposent sur des aides financières directes. Si les pouvoirs publics souhaitent accélérer la diffusion des technologies associées à la prochaine révolution de la production, il est probable que ces approches devront de plus en plus être intégrées aux activités des institutions de diffusion technologique, et mises en œuvre avec elles.

Les mécanismes technologiques ouverts

Ces dernières années, des méthodes ouvertes de diffusion de nouvelles technologies de production ont fait leur apparition, en écho à l'essor des logiciels libres dans le secteur informatique. Exemple, la BioBricks Foundation, créée en 2006 par Drew Endy, professeur à l'Université de Stanford¹⁰. Cette fondation privée à but non lucratif est la première à concevoir des modèles ouverts de transfert de technologie dans le domaine de la biologie de synthèse. Elle cherche à éviter que ce domaine émergent ne soit dominé par la protection de la propriété intellectuelle et la culture du secret, ce qui pourrait représenter un frein à l'application, à la diffusion et aux développements futurs. BioBricks a mis sur pied plusieurs programmes pour encourager l'innovation ouverte dans le domaine de la biologie de synthèse. *OpenWetWare* est une application wiki qui a été conçue en 2007 pour permettre le partage d'informations entre les laboratoires du monde entier au sujet des protocoles, des formations et autres informations intéressant la communauté de la biologie de synthèse. Elle compte plus de 20 000 utilisateurs. Depuis la conférence fondatrice de la biologie de synthèse organisée au MIT en 2004, BioBricks parraine une conférence internationale sur le même sujet (SBx.0) pour renforcer les liens entre les membres de la communauté ; cette manifestation a lieu alternativement aux États-Unis, en Europe et en Asie. L'édition la plus récente, SB6.0, a été organisée à l'Imperial College, au Royaume-Uni, en 2013 (avec plus de 700 participants). L'édition SB7.0 est prévue à Singapour en 2017. En 2008, BioBricks a lancé un processus « d'appel à commentaires » qui a conduit à l'établissement d'un cadre de normes techniques pour les éléments biologiques standard, afin que ces éléments puissent « aller ensemble » lorsqu'ils sont échangés. BioBricks a établi un accord volontaire entre les chercheurs – le *BioBricks Public Agreement* –, qui énonce les conditions dans lesquelles les éléments biologiques peuvent être utilisés. En 2015, la fondation a approuvé un « accord pour le transfert ouvert de matériaux » (*OpenMTA*) visant à pallier les lacunes des accords actuels d'échange de biomatériaux, comme par exemple la limitation de la participation commerciale. Par ailleurs, elle met actuellement en place une plateforme d'information pair à pair – *bio.net* – devant permettre le contrôle et l'échange des biomatériaux.

La BioBricks Foundation a été financée par de modestes dons de la NSF et des National Institutes of Health américains jusqu'en 2015. Elle a ensuite reçu une subvention de 3.9 millions USD sur trois ans dans le cadre du programme « *Biomedical Research Infrastructure Program* » du Helmsley Charitable Trust pour créer la plateforme *bio.net* (Helmsley Charitable Trust, 2016). Ces fonds ont permis à BioBricks de recruter un directeur général, un directeur des affaires juridiques et des transferts de technologie, ainsi qu'un informaticien, tout en sous-traitant le développement logiciel à l'Université de Stanford. BioBricks vient de lancer un programme d'adhésion pour s'assurer un financement à long terme.

BioBricks est par ailleurs en relation avec la fondation International Genetically Engineered Machine (iGEM) et International Open Facility Advancing Biotechnology (BIOFAB). L'iGEM était au départ un cours du MIT en 2003, dispensé par Drew Endy et d'autres professeurs, et avait pour but d'apprendre aux étudiants à concevoir des dispositifs de biologie de synthèse. Randy Rettberg, alors chercheur au MIT et l'un des premiers membres du conseil d'administration de BioBricks, a fait de l'iGEM une fondation et en est aujourd'hui le président. La fondation iGEM organise un concours ouvert à des équipes d'étudiants qui ont pour mission de concevoir des dispositifs de biologie de synthèse à partir d'éléments biologiques standard (en prenant en compte les risques et les répercussions sociétales). L'iGEM gère en outre le *Registry of Standard Biological Parts*, un registre utilisé par les étudiants participant au concours – et par d'autres – pour faire progresser l'innovation dans le domaine de la biologie de synthèse, ainsi que le *Labs Program*, qui permet aux étudiants ne participant pas au concours d'avoir accès à des éléments biologiques. En 2015, le concours de l'iGEM a attiré plus de 5 000 participants répartis dans plus de 200 équipes internationales. BIOFAB est une installation qui conçoit et produit des éléments biologiques standard de meilleure qualité et mieux sélectionnés pour les mettre à la disposition du public. Parrainé par la NSF, BIOFAB est partenaire de BioBricks, du Synthetic Biology Engineering Research Center de Berkeley, et du Lawrence Berkeley National Laboratory. Les éléments biologiques sont mis à la disposition des milieux universitaires et des entreprises dans une « bibliothèque », le *BioBricks Public Agreement* étant utilisé pour définir les conditions d'utilisation des éléments.

Outre les nombreuses plateformes logicielles en accès libre, d'autres mécanismes technologiques ouverts ont été créés dans des domaines comme la robotique, le matériel de production et les normes opérationnelles pour l'automatisation dans l'industrie. À mesure que les technologies et les systèmes de production sont de plus en plus perfectionnés, intégrés et fondés sur des données, ces mécanismes pourraient devenir de plus en plus utiles pour encourager la coordination à grande échelle entre un grand nombre d'organisations. Les mécanismes technologiques ouverts sont de surcroît flexibles et relativement bon marché, à la fois pour les nouveaux entrants et les opérateurs existants cherchant à étendre et diffuser des technologies émergentes.

Les institutions de diffusion technologique : évolution et défis

Comme le montrent les exemples ci-dessus, les institutions chargées de diffuser les technologies sont présentes dans l'ensemble des systèmes d'innovation, avec des objectifs variés ainsi que des formes d'organisation et des fonctions diverses. Certaines existent depuis un certain temps et sont profondément ancrées dans leurs systèmes d'innovation respectifs, alors que d'autres sont en pleine évolution ou tout juste naissantes. Dans le contexte de la prochaine révolution de la production, de nouvelles institutions seront nécessaires pour promouvoir de façon créative l'échange de connaissances, le changement organisationnel, le développement des capacités ainsi que la demande de diffusion technologique dans les domaines technologiques émergents et les nouveaux modèles économiques. Parallèlement, il est également important pour les institutions déjà établies d'améliorer et d'orienter leurs approches de façon à s'adapter aux défis et aux chances que présentent les technologies de nouvelle génération.

Les institutions de diffusion technologique font partie des systèmes d'innovation au sens large ; leur contribution à ces systèmes, les relations qu'elles entretiennent avec eux et ce qu'elles en obtiennent dépendent des structures et des politiques publiques mises en œuvre dans les environnements hôtes. Au niveau général du système et de l'action publique,

toute une série de facteurs influencent les performances de ces institutions, notamment les politiques et pratiques relatives à la R-D, à la collaboration entre l'industrie et l'université, au financement des investissements des entreprises, aux compétences, au marché du travail, aux infrastructures, à la propriété intellectuelle, au commerce, à la fiscalité, ainsi que la politique macroéconomique et la place que le système accorde aux dispositifs de diffusion technologique (OCDE, 1998 ; Bozeman, 2000 ; OCDE, 2015 ; Kochenkova, Grimaldi et Munari, 2016 ; Caiazza et Volpe, 2017). Une tâche indispensable – qui suppose d'être attentif à la panoplie de mesures en place (Flanagan, Uyerra et Laranja, 2011) – est de coordonner les conditions-cadres du système d'innovation et les mécanismes indirects avec les dispositifs relatifs aux institutions de diffusion technologique. Plus précisément, les cadres généraux et les politiques spécifiques devraient encourager les stratégies aux niveaux méso- et microéconomique propres à favoriser une conception et un fonctionnement efficaces des institutions chargées de diffuser les technologies. Une série de bonnes pratiques ont donc été recensées. Elles sont présentées dans les exemples et font également l'objet d'un examen plus approfondi dans d'autres études (voir par exemple Shapira et al., 2015).

Une bonne pratique essentielle à retenir est la mise en place d'un environnement organisationnel qui favorise une gestion solide des institutions de diffusion technologique. Comme on l'a vu, cet environnement peut inclure les universités, les centres technologiques, les organismes de développement économique, les agences gouvernementales et les organisations à but non lucratif. Cet environnement varie selon les systèmes d'innovation en place dans les différents pays, ces systèmes pouvant prendre des formes d'organisation très différentes, centralisée ou non. Ce qui importe toutefois avant tout, c'est de s'assurer que quel que soit le type d'organisation retenu, l'environnement permet un fonctionnement efficace ; cela veut aussi dire qu'il faut prévoir des dispositifs pour les examens de performances internes et externes, qui puissent conduire à ajuster les services et la gestion et, le cas échéant, à modifier l'environnement. Il est également important, pour les institutions de diffusion technologique aux niveaux méso- et microéconomique, de disposer d'une clientèle d'entreprises explicite (qui peut couvrir un large éventail de secteurs ou uniquement des secteurs spécifiques), de programmes d'une portée suffisante pour toucher une part importante de cette clientèle, et d'adopter une approche structurée des services afin d'optimiser les ressources disponibles. Il convient aussi de recommander, entre autres bonnes pratiques, que ces institutions soient dotées d'un personnel ayant de l'expérience dans l'industrie, établissent des liens avec d'autres installations et partenaires, et disposent d'un financement de base pour garantir leur stabilité. Dans les écosystèmes industriels et technologiques développés, il peut y avoir plusieurs institutions de diffusion technologique dédiées à des missions distinctes. Dans ce contexte, des capacités sont requises pour élever les entreprises existantes (typiquement les PME) aux niveaux actuels de la modernisation technologique et pour doter, le cas échéant, les entreprises nouvelles et existantes de moyens technologiques de pointe, ainsi que pour travailler avec les entreprises en mode individuel, en groupe ou en réseau (Park, 1999 ; Shapira et al., 2015).

Il est primordial que les institutions de diffusion technologique, ainsi que les systèmes d'innovation auxquels elles sont associées, utilisent des approches correspondant aux bonnes pratiques actuelles. Un socle de diffusion technologique, s'il est solide, peut soutenir des adaptations et des innovations institutionnelles pour diffuser des technologies émergentes. En revanche, si ce socle est fragile, il faudra peut-être intensifier les efforts pour mettre en place des institutions de diffusion technologique et améliorer celles existantes. Dans un cas comme dans l'autre, lesdites institutions devront être guidées par les politiques

et pratiques qui marchent. Elles devront également s'adapter et innover, de manière à mettre en avant les caractéristiques susceptibles d'être accentuées par la prochaine révolution de la production, voire d'être à l'origine de celle-ci, et à pouvoir demeurer en phase avec l'évolution technologique, industrielle et de gouvernance qui sera associée à cette révolution.

Comme on l'a vu dans l'introduction du présent chapitre, la prochaine révolution de la production se caractérisera principalement par le pouvoir de transformation des TIC, l'essor de l'impression numérique, les modifications profondes qui touchent les matériaux et les fondements économiques, ainsi que l'émergence de nouveaux modèles économiques mettant davantage l'accent sur la participation de l'utilisateur, la durabilité et l'innovation responsable (OCDE, 2016). Toute prévision des évolutions technologique, économique et stratégique doit s'appuyer sur des éléments probants, car la prochaine révolution de la production pourrait emprunter différentes voies. En gardant cette réserve à l'esprit, et en s'appuyant sur les exemples types examinés dans ce chapitre et sur les enseignements plus généraux tirés de la documentation spécialisée, on a recensé huit grands axes d'évolution technologique, économique et stratégique qui sont intrinsèquement liés à la prochaine révolution de la production et devraient être pris en compte par les institutions de diffusion technologique et les responsables de l'action publique (tableau 7.2). Ces axes de changement sont décrits ci-après et illustrés par des exemples.

Tableau 7.2. Évolutions technologiques, économiques et stratégiques associées à la prochaine révolution de la production, et conséquences pour les institutions de diffusion technologique

Évolution	Conséquences pour les institutions de diffusion technologique
Transformation numérique	Intégrer la diffusion des technologies numériques dans tous les domaines (conception, matériaux, production, produits, communication et services).
Émergence rapide et itérative de nouvelles technologies et de nouveaux modèles économiques	Mobiliser des capacités pour apporter des réponses rapides et personnalisées. Adapter les modèles économiques des organisations et en créer de nouveaux pour répondre aux nouveaux besoins et saisir les chances qui se présentent. Passer des modèles par projets et des approches de planification formelles à des méthodes flexibles, d'aide collective et de partage.
Nouveaux besoins en matière de capacités	Renforcer les capacités des entreprises et des systèmes locaux d'innovation pour permettre l'assimilation des technologies. Accroître les capacités des institutions en ce qui concerne les technologies émergentes et leur intégration.
Rôle accru des partenariats technologiques collaboratifs	Regrouper des acteurs variés – notamment universités, centres de recherche et organisations privées – pour mener des travaux collectifs : traduction de la recherche en applications, transposition à plus grande échelle et déploiement des technologies.
Développement mondial de nouveaux pôles de connaissances	Multiplier les activités transfrontières ainsi que les liens et partenariats internationaux.
Importance vitale de la durabilité	Intégrer les considérations à long terme de durabilité environnementale dans les approches technologiques.
Attention croissante à la recherche et l'innovation responsables	Faire une place à la recherche et l'innovation responsables dans les approches technologiques.
Rôle moteur de l'action publique et de l'administration	Tirer parti du soutien de l'action publique et de l'administration grâce à leur rôle moteur, à l'instauration de partenariats et à la stimulation de la demande.

Source : Analyse des auteurs.

- **La transformation numérique.** Les technologies numériques de l'information seront à l'avenir au cœur du processus de développement et d'adoption des technologies. Dans un mouvement comparable à l'essor de la mise en accès libre des publications et données de

recherche, on voit apparaître des « bibliothèques » dédiées à la mise en commun d'éléments technologiques de base. Un exemple déjà cité est celui de BioBricks, qui propose une norme ouverte – mise au point par le MIT – permettant le partage et l'utilisation accrue d'éléments biologiques de synthèse grâce au *Registry of Standard Biological Parts*. Ce registre est alimenté principalement par les participants au concours de l'iGEM ; une bibliothèque publique plus spécialisée et de qualité supérieure, BIOFAB, a également été créée. Ces mécanismes ouverts coexistent avec des approches traditionnelles fondées sur le principe d'exclusivité. Un autre exemple est le Digital Manufacturing and Design Innovation Institute, qui fait partie du réseau américain National Network for Manufacturing Innovation (NNMI) et utilise une approche fondée sur des ressources numériques communes pour mettre au point des outils logiciels de fabrication. Ces exemples mettent en évidence le rôle grandissant des institutions de diffusion technologique en ce qui concerne non seulement la diffusion des technologies numériques et leur intégration dans les différentes entreprises manufacturières, mais aussi la mise au point de nouveaux modèles virtuels et collaboratifs entre les secteurs et les réseaux industriels afin d'accélérer l'utilisation d'approches novatrices fondées sur le numérique.

- **L'émergence rapide et itérative de nouvelles technologies et de nouveaux modèles économiques.** Les institutions de diffusion technologique fonctionnent généralement selon des modèles linéaires, par projets, pour interagir avec les entreprises, souvent en utilisant des méthodes de planification formelles et des procédures systématisées. Bien que ces méthodes soient appelées à demeurer la norme pour travailler avec les entreprises, il est à prévoir que la prochaine révolution de la production incitera et obligera les institutions de diffusion technologique à adopter de plus en plus des approches flexibles et davantage axées sur les découvertes. L'une des conséquences de cette évolution sera la nécessité de mobiliser des capacités pour apporter des réponses rapides et personnalisées, afin d'accélérer la diffusion technologique et d'accroître la pertinence de ses méthodes. Certains signes montrent déjà que les institutions de diffusion technologique sont bien conscientes de ces défis : les méthodes flexibles et personnalisées y jouent un rôle croissant, l'aide collective y est plus présente, et une plus grande place est faite aux processus itératifs collaboratifs. Exemple, le programme américain I-Corps, qui a été conçu par la NSF et est aujourd'hui préconisé par de plus en plus d'autres agences et organisations. I-Corps accélère la commercialisation de résultats de recherches à forte composante scientifique en misant sur une formation influencée par le concept de « sélection simple des clients » et le modèle de gestion de type *business model canvas*. Des équipes de chercheurs et d'aspirants entrepreneurs sont encouragés par les tuteurs du programme à entretenir une interaction continue et réfléchie avec leurs clients et partenaires. Cette interaction flexible favorise l'adoption précoce de nouveaux modèles technologiques et économiques, dans le but de répondre aux demandes du marché et de saisir les chances qu'il présente (Weilerstein, 2014). En encourageant des échanges collaboratifs, l'apprentissage et le partage au sein de sa communauté, BioBricks promeut lui aussi une approche itérative.
- **Les nouveaux besoins en matière de capacités.** La prochaine révolution de la production ne se caractérise pas seulement par l'émergence de nouvelles technologies et de nouveaux modèles économiques, mais aussi par leur convergence et leur intégration. Ainsi, les technologies – physiques et numériques – seront de plus en plus fusionnées (par exemple dans la conception logicielle de nouveaux biomatériaux) ; il devrait en être de même pour la conception, la fabrication, la logistique et les services. Les fabricants devront acquérir de

nouvelles compétences dans les technologies émergentes et dans leur intégration systématique, ainsi que dans des domaines comme le travail en réseau et la coproduction. Les institutions de diffusion technologique devront donc développer leurs compétences dans les technologies émergentes et leur intégration, et mettre en œuvre des stratégies permettant de renforcer les capacités d'assimilation des entreprises et de leurs écosystèmes industriels en vue d'amorcer la prochaine révolution de la production. Elles peuvent s'y prendre de différentes manières. Aux États-Unis, par exemple, le programme MEP mise sur la formation du personnel interne et la planification des ressources humaines. Ses centres ont également mis en place des dispositifs flexibles permettant de faire appel à des prestataires de services différents en fonction de l'évolution des besoins techniques. En Allemagne, la Fraunhofer Society et ses instituts proposent aux entreprises toute une gamme de programmes de formation avancée, notamment dans le domaine des nouvelles technologies. Ils sont également actifs dans le transfert de connaissances (via de larges collaborations avec des entreprises), et aident les chercheurs à créer leurs propres entreprises (y compris par essaimage). Par ailleurs, les liens étroits qu'entretiennent les instituts Fraunhofer avec les universités facilitent la participation de jeunes chercheurs à des projets menés avec les entreprises : cela permet d'injecter de nouvelles compétences techniques dans les projets et de favoriser la diffusion car ces jeunes chercheurs acquièrent des compétences dans les applications industrielles puis occupent des postes au sein des entreprises. Aux États-Unis, le programme *I-Corps Sites* propose aux universités une nouvelle méthode de franchisage, structurée et acceptée, pour commercialiser la recherche : ce modèle représente une autre façon de développer les capacités pour mettre en place de nouvelles approches en matière de diffusion des technologies.

- **Le rôle accru des partenariats technologiques collaboratifs.** Les partenariats collaboratifs (dans le contexte de la diffusion des technologies) impliquent le regroupement de plusieurs acteurs – universités, centres de recherche et organisations du secteur privé – pour mener collectivement des activités de recherche appliquée, de transposition des résultats de recherche en applications et de déploiement des technologies. Si ces partenariats existent depuis longtemps, les technologies de production de nouvelle génération ont entraîné l'émergence de partenariats d'un nouveau genre qui englobent plusieurs secteurs et sont conçus pour pallier la différence « d'échelle » entre la recherche et la production à visée commerciale. Les partenariats technologiques offrent par ailleurs des possibilités d'échange tacite – mais aussi formel – de connaissances, de groupement des capacités et des spécialités, de conclusion de protocoles communs et de mobilisation de sources de financement (en attirant des fonds privés pour compléter les financements publics). Aux États-Unis, par exemple, pour « Manufacturing USA », le NNMI s'appuie sur des organisations privées à but non lucratif qui forment le cœur d'un réseau d'organisations professionnelles et universitaires s'employant à mettre au point des normes et des prototypes dans des domaines tels que la fabrication additive ainsi que la conception et la fabrication numériques. Les partenariats sont généralement centrés sur une technologie émergente en particulier ; c'est le cas avec le NNMI qui, début 2017, regroupe 14 instituts d'innovation dans le secteur manufacturier, chacun d'eux constitué de plusieurs partenaires publics et privés et travaillant sur une technologie avancée particulière¹¹. Au Royaume-Uni, également, un réseau de 11 centres « Catapult » créés par InnovateUK cherche à transformer la recherche de pointe en produits et services nouveaux ; là aussi, chaque centre associe de plusieurs partenaires issus des milieux universitaires, du secteur public et du secteur des entreprises, avec un mélange de fonds

publics et privés¹². Les partenariats technologiques collaboratifs peuvent prendre la forme de réseaux et d'initiatives d'envergure nationale, mais ils ont souvent une importante dimension régionale ; ils peuvent aussi inclure des partenaires étrangers et avoir une dimension internationale (voir ci-après). La prochaine révolution de la production exigera sans doute, pour les besoins de la diffusion technologique, un recours plus fréquent aux partenariats collaboratifs afin de permettre une transposition systématique des technologies émergentes complexes et de pouvoir disposer à la fois de ressources publiques et privées.

- **Le développement mondial de nouveaux pôles de connaissances.** La prochaine révolution de la production mobilisera un large éventail de pôles de connaissances et d'innovation situés dans le monde entier. Cela concernera les économies développées (Europe, Amérique du Nord et Asie de l'Est), mais aussi les économies émergentes en plein essor. En Chine, de nouvelles initiatives sont menées actuellement pour moderniser le secteur manufacturier, en mettant l'accent sur l'innovation et les technologies de fabrication avancées¹³. Dans plusieurs villes-régions de Chine (notamment Beijing, Shanghai et Shenzhen), d'importants pôles de recherche de pointe et d'entreprises travaillent activement sur des méthodes de fabrication novatrices (Bound et al., 2016 ; Saunders et Kingsley, 2016). Des pôles d'innovation dynamiques se sont développés – ou viennent d'être créés – en Inde, au Brésil et dans d'autres régions du monde (Dutta et Lanvin, 2013 ; Engel, 2014). Les institutions de diffusion des technologies opèrent généralement aux niveaux national et régional, même si certaines d'entre elles ont une dimension internationale. Les instituts Fraunhofer ont des implantations ailleurs qu'en Allemagne, d'une part pour proposer des services aux chaînes d'approvisionnement mondiales qui ont leur centre en Allemagne, et d'autre part pour pouvoir accéder à l'expertise technologique spécialisée des autres pays. Outre la gestion de centres affiliés à l'étranger, une autre stratégie consiste à travailler avec des organisations internationales et des multinationales ayant le statut non pas de clients, mais de partenaires dans le cadre de la collaboration et de la diffusion technologiques. Au Royaume-Uni, par exemple, le centre Cell and Gene Therapy Catapult a conclu un accord avec la préfecture de Kanagawa, au Japon, en vue d'encourager l'application et la commercialisation de la médecine régénérative et de la thérapie cellulaire au Japon et au Royaume-Uni ; cet accord prévoit la facilitation de l'accès au marché pour les entreprises britanniques au Japon, et pour les entreprises japonaises au Royaume-Uni et en Europe¹⁴. Le programme CREATE de Singapour, on l'a vu, est partenaire avec des universités nationales et étrangères pour faciliter le développement des capacités de recherche et la commercialisation des résultats de recherches appliquées axées sur les défis sociétaux auxquels est confrontée la ville-État (par exemple : congestion urbaine, maladies tropicales et accès aux sources d'énergie). À mesure que des pôles de connaissances et d'innovation feront leur apparition dans le monde, les institutions de diffusion technologique devront trouver des moyens d'y accéder et, de plus en plus, procéder avec eux à des échanges de connaissances et de technologies.
- **L'importance vitale de la durabilité.** La durabilité est une caractéristique de plus en plus importante de la production de nouvelle génération. De nombreux aspects de cette production (par exemple, le remplacement des produits pétrochimiques par des biomatériaux, l'utilisation des nanotechnologies pour produire des solutions plus efficaces faisant appel aux énergies renouvelables, ou encore la mise au point de méthodes de fabrication redistribuée qui réduisent les besoins de transport) promettent de fait l'émergence de processus et de produits plus écologiques et plus durables. Ces

derniers devraient permettre de relever les défis mondiaux liés à l'environnement, à l'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre. Cela dit, outre son utilité au regard des objectifs mondiaux, la durabilité peut procurer des avantages directs aux entreprises et aux consommateurs : réduction des déchets et de l'utilisation de matériaux, diminution des coûts liés sur le cycle de vie, et accélération de l'innovation de procédé et de produit. Aux États-Unis, le MEP propose plusieurs services axés sur la durabilité : évaluation de la consommation énergétique et recommandations en vue de la réduire ; recensement des possibilités d'amélioration des processus ; aide à la mise en conformité avec les réglementations environnementales. Cette aide concerne également le respect des normes énergétiques telles que la norme ISO 50001 sur le management de l'énergie et la série des normes ISO 14000 sur le management environnemental. À un niveau plus général, le centre Energy Systems Catapult, au Royaume-Uni, aide les entreprises à trouver et développer des débouchés commerciaux dans l'ensemble du réseau énergétique¹⁵. La recherche de la durabilité environnementale sera sans doute une caractéristique de plus en plus fréquente des activités de diffusion technologique lors de la prochaine révolution de la production¹⁶.

- **Une attention croissante accordée à la recherche et à l'innovation responsables.** La recherche et l'innovation responsables ont pour but d'anticiper les répercussions sociales, éthiques et juridiques des sciences et technologies de demain, mais aussi leurs incidences sur l'environnement, la santé et la sécurité. Elles visent également à éviter ou réduire les effets négatifs, ainsi qu'à favoriser les approches inclusives – et l'efficacité – de la recherche et de l'innovation, (UE, 2012 ; Owen, Stilgoe et Macnaghten, 2012). En Europe et aux États-Unis surtout, on accorde depuis quelques années une attention croissante aux processus de recherche et d'innovation responsables, en particulier dans les technologies émergentes comme les nanotechnologies, la biologie de synthèse et les technologies numériques, l'intelligence artificielle et l'automatisation (Owen, Bessant et Heintz, 2013 ; McBride et Stahl, 2014 ; Gregorowius et Deplazes-Zemp, 2016 ; Michelson, 2016). Ces technologies sont à la base de la prochaine révolution de la production. Les institutions de diffusion technologique, de même que d'autres acteurs – publics et privés – de la prochaine révolution de la production, devront intégrer dans leurs activités des processus de recherche et d'innovation responsables et les mettre en œuvre. Bien qu'elles impliquent la connaissance des lois, réglementations et protocoles applicables, à la fois aux niveaux national et international, la recherche et l'innovation responsables dépasse largement la simple conformité à la réglementation. Elles nécessitent (selon un cadre établi au Royaume-Uni) : des processus d'anticipation – des impacts potentiels sur le plan économique, social et environnemental ; une réflexion sur les répercussions, les motivations, les incertitudes et les dilemmes ; un engagement – l'ouverture à la discussion et au dialogue ; enfin, l'action, en influençant le processus de recherche et d'innovation¹⁷. L'attention qui est accordée à la recherche et l'innovation responsables dans la feuille de route britannique sur la biologie de synthèse (*UK Synthetic Biology Roadmap*), ainsi que leur intégration dans les centres de recherche du pays consacrés à cette discipline (*Synthetic Biology Research Centres*) est un exemple concret. Les enjeux associés à la recherche et à l'innovation responsables dépendent ensuite de la technologie concernée. Ainsi, lors du déploiement de nouvelles technologies de l'information dans les entreprises et au sein des réseaux de fabricants et d'utilisateurs, il conviendra d'accorder toute l'attention voulue à la protection des données, à la confidentialité et à la sécurité. Les nouvelles technologies médicales peuvent susciter des questions éthiques complexes. Pour ce qui est des

nouvelles technologies relatives aux énergies renouvelables, ce sont les facteurs relatifs au cycle de vie et à l'environnement qui doivent être pris en compte. Cela dit, parmi l'éventail des technologies jouant un rôle dans la prochaine révolution de la production, toutes soulèvent d'une façon ou d'une autre des questions économiques, sociales et environnementales. Dans tous les cas interviennent des considérations d'équité en ce qui concerne les effets de déplacement que provoqueront les technologies émergentes sur des segments de la population qui risqueront de perdre leur emploi ou de le voir transformé. De manière générale, les institutions de diffusion technologique ont un rôle important à jouer en travaillant avec les concepteurs des technologies, les responsables de l'action publique, les entreprises, la population et d'autres membres de la collectivité pour les encourager à prendre conscience rapidement de leur responsabilité dans la recherche, la conception et les premières phases de développement. De plus, dans le cadre du déploiement de certaines technologies, il est recommandé à ces institutions de mettre en place des mesures et des actions particulières dans les projets et les plans d'intervention relevant de l'innovation responsable, afin que tout effet néfaste soit pris en compte et que les difficultés éventuelles soient évitées ou atténuées. C'est cette fonction que remplit par exemple le programme I-Corps, qui soulève un ensemble de questions d'intérêt public que les équipes de chercheurs peuvent prendre en compte au cours de leurs travaux (Youtie et Shapira, 2016).

- **L'évolution du rôle de l'administration.** Il est fréquent que l'administration publique (généralement l'administration centrale) soit l'instance dirigeante, le gestionnaire et la source de financement des institutions chargées de diffuser les technologies. Comme on l'a vu, ce rôle des pouvoirs publics persiste, car en l'absence d'intervention ou de financement public, les dysfonctionnements du marché entraîneront un sous-investissement dans la diffusion technologique. Plus précisément, dans les systèmes d'innovation nationaux où les institutions de diffusion technologiques sont fragiles ou désorganisées, l'intervention directe et le parrainage des pouvoirs publics sont sans doute nécessaires pour promouvoir la modernisation et une prestation de services efficace. Cela dit, si l'on prend en compte un mouvement apparu il y a quelques années – à savoir la mise en œuvre de la politique publique à l'aide d'autres mécanismes, comme par exemple les partenariats public-privé –, la prochaine révolution de la production suscitera de nouveaux besoins et de nouvelles possibilités qui induiront une évolution du rôle de l'administration au regard de la promotion de la diffusion technologique. On verra apparaître de nouveaux agents qui joueront un rôle de catalyseur ou d'intermédiaire pour associer d'autres organisations publiques et privées à l'action et à la mobilisation de ressources, et pour rechercher ensemble les voies à suivre en faveur de l'adoption des nouvelles technologies et de l'innovation responsable. Comme cela a déjà été indiqué, dans l'approche « Manufacturing USA », aux États-Unis, les organisations sans but lucratif doivent travailler en partenariat avec le secteur privé, les universités et d'autres entités sans but lucratif dans le cadre d'un programme d'adhésion. Cela permet de trouver des sources de financement, mais surtout de réunir tout l'éventail des compétences et des capacités requises pour déployer les technologies de pointe et en étendre la diffusion. L'élargissement du panache des mesures employées pour la diffusion des technologies de nouvelle génération nécessitera la participation accrue d'acteurs pouvant apporter leur contribution sur des questions comme le financement, la sécurité des informations, la réglementation, l'environnement, les ressources humaines et les enjeux de société. Les approches et les institutions de diffusion technologique devront à l'avenir être créatives,

surtout en ce qui concerne les principales technologies émergentes, de même qu'il faudra être prêt à expérimenter, et encourager la recherche et l'application itérative de nouvelles méthodes. Les politiques publiques agiront sans doute davantage sur la demande, tout en s'attaquant aux défis mondiaux et sociétaux. Les villes et les régions seront appelées à jouer un rôle plus important dans la diffusion technologique et sa coordination, et chercheront activement à orienter la prochaine révolution de la production de manière à redistribuer les activités de fabrication en faveur de la revitalisation de l'économie locale et de la durabilité.

De manière générale, les méthodes existantes de diffusion technologique devront s'améliorer en fonction de l'évolution des technologies de production ; de nouveaux modèles de diffusion devront également être conçus pour faciliter le déploiement efficace, efficient et équitable des technologies. Ces nouveaux modèles seront probablement plus collaboratifs et plus ouverts, et s'appuieront sur des sources de financement plus diversifiées et sur des approches de renforcement des capacités et de diffusion des technologies créatives, qui pourront être adoptées dans les institutions nouvelles comme dans les instances existantes. Les systèmes d'innovation dont les acteurs sauront faire preuve de clairvoyance et de flexibilité, et qui auront la volonté d'améliorer et de perfectionner rapidement leurs institutions de diffusion technologique auront sans doute plus de chances de tirer un avantage concurrentiel de la prochaine révolution de la production. Les systèmes plus fragiles ou dont les institutions de diffusion accusent un retard pourraient bien se trouver désavantagées, quels que soient leurs atouts en science fondamentale.

Quoi qu'il en soit, des difficultés évidentes se profilent en ce qui concerne la diffusion des nouvelles technologies de production et l'émergence d'une nouvelle génération d'institutions de diffusion technologique. De nouvelles technologies et des modèles prometteurs vont faire leur apparition alors que les approches utilisées actuellement sont bien ancrées dans les installations industrielles et les écosystèmes existants. Pour citer un exemple, les usines totalement intégrées et automatisées qui étaient proposées dans les années 80 ne se sont pas concrétisées comme prévu, en partie à cause de la difficulté à les intégrer aux chaînes d'approvisionnement existantes, et également du fait du raccourcissement du cycle de vie des produits. Il faudra du temps, de la patience et des capacités d'expérimentation pour définir de nouvelles modalités d'assimilation et de diffusion de la technologie. Or dans bien des cas, les pouvoirs publics veulent voir rapidement des résultats, sans prendre de risque. De surcroît, alors que les nouvelles technologies de production sont souvent mises en avant pour leur utilité publique et leur capacité à résoudre les défis sociétaux, les modèles de financement et d'évaluation qu'utilisent de nombreuses institutions publiques de diffusion technologique conduisent à privilégier le nombre de clients et les recettes plutôt que l'intérêt général. On met parfois l'accent sur la diffusion des technologies les plus avancées, alors que beaucoup d'entreprises et d'utilisateurs ne disposent pas des capacités nécessaires pour les assimiler. Il faut donc adopter plutôt une approche pragmatique, qui s'appuie sur l'établissement de relations durables afin de développer des capacités qui permettront de mettre en œuvre des stratégies plus avancées. La dépendance à la trajectoire des institutions de diffusion technologique risque elle aussi de susciter des blocages, qui empêcheront d'améliorer les compétences, les services et les modèles économiques. Les préoccupations concernant la responsabilité des pouvoirs publics, conjuguées au climat d'austérité qui règne dans nombre de pays, pourraient faire hésiter les institutions en place à prendre le risque du changement, ce qui risquerait de ralentir l'émergence d'institutions de diffusion technologique plus performantes.

Par ailleurs, si des institutions de diffusion technologique efficaces sont indispensables à l'avènement de la prochaine révolution de la production, en particulier pour les PME, ces institutions ne peuvent pas tout faire. L'ampleur, la portée et la qualité de la diffusion technologique qui aura lieu dans le cadre de la prochaine révolution de la production dépendront également du cadre national et régional des systèmes d'innovation. L'amélioration du financement, de l'infrastructure et de la formation (notamment professionnelle) aura de l'importance à cet égard.

Recommandations

C'est le fil conducteur du présent chapitre, les politiques publiques doivent intégrer la diffusion technologique et ses institutions à la prochaine révolution de la production, dès ses prémices. Bien que l'accent soit mis inévitablement sur les progrès sensationnels de la recherche et le potentiel que représentent les toutes dernières technologies mises au point, leur utilité pour l'économie et pour la société ne sera optimale que si ces technologies sont conçues de façon responsable et déployées avec l'aide des utilisateurs et autres parties prenantes, et si elles peuvent être transposées à grande échelle, diffusées et utilisées plus efficacement. La modernisation et la réorganisation des capacités des institutions de diffusion technologique, de même que l'intégration de ces institutions dans les stratégies de la prochaine révolution de la production, sont des étapes essentielles. Elles font l'objet des recommandations formulées dans l'encadré 7.2 ci-après.

Encadré 7.2. **Recommandations à l'intention des pouvoirs publics : l'intégration des institutions de diffusion technologique dans la prochaine révolution de la production**

- **Prendre conscience que des institutions efficaces sont indispensables à l'avènement généralisé de la prochaine révolution de la production.** Le rôle et la mission de ces institutions doivent être intégrés aux stratégies associées à cette révolution. Il convient de remédier, le cas échéant, à l'absence ou à l'insuffisance des capacités nécessaires, d'encourager la création de nouvelles institutions de diffusion technologique, de favoriser l'expérimentation et l'apprentissage, et de renforcer le développement de nouvelles compétences et de nouveaux modèles économiques.
- **Améliorer les pratiques de diffusion des technologies et les partager.** Les institutions chargées de diffuser les technologies doivent être encouragées à passer systématiquement en revue leurs pratiques et leurs approches en matière de prestation de services, à s'assurer que ces pratiques sont efficaces et adaptées à la communauté visée, à expérimenter de nouvelles approches et à les étendre à mesure que les besoins évoluent, et à échanger des connaissances sur les pratiques. Il faut pour cela que les pouvoirs publics accordent l'attention nécessaire à la stratégie, à l'affectation des ressources, au soutien opérationnel de l'équipe de direction, à la formation du personnel, à l'analyse et à l'évaluation, ainsi qu'à l'échange de connaissances.
- **Dégager une convergence de vues et élaborer des actions conjointes pour concrétiser la prochaine révolution de la production.** La production de nouvelle génération suppose des changements au sein des entreprises, mais nécessite aussi la contribution et la coordination des chaînes de valeur, des secteurs et des pôles d'activité. La mission n'est pas seulement technique. Il faut également faire participer les entreprises, les fournisseurs, les utilisateurs et les institutions intermédiaires aux stratégies collaboratives afin d'exploiter au mieux les attributs du système et du réseau qui sont

**Encadré 7.2. Recommandations à l'intention des pouvoirs publics :
l'intégration des institutions de diffusion technologique
dans la prochaine révolution de la production (suite)**

associés à la prochaine révolution de la production. Ces collaborations devront s'étendre au-delà des frontières nationales et régionales.

- **Mettre en place des politiques-cadres complémentaires du système d'innovation, des mesures indirectes et des incitations agissant sur la demande** afin d'intégrer et d'amplifier les effets des institutions de diffusion technologique. Il est impératif d'accorder l'attention voulue au panachage des mesures et aux liens organisationnels si l'on veut s'assurer de la diffusion effective des résultats de la recherche et des progrès technologiques, et de l'intégration de la diffusion technologique aux politiques y afférentes (notamment en termes de financement, d'infrastructure, d'amélioration des compétences et de passation de marchés).
- **Faire en sorte que les objectifs de durabilité, et de recherche et d'innovation responsables soient pris en compte, dès ses prémices, dans la prochaine révolution de la production.** Les aspects économiques, sociaux et environnementaux doivent avoir leur place dans les politiques publiques relatives aux institutions de diffusion technologique. Cela passe par un dialogue avec les clients, les différentes parties prenantes et les publics visés, ainsi que par une utilisation plus poussée des méthodes prospectives.
- **S'assurer que la diffusion des technologies tient compte des besoins des PME.** Bien que les institutions de diffusion technologique travaillent avec de nombreux types d'entreprises, il importe d'aider les PME à acquérir les capacités d'assimilation et de transformation nécessaires pour prendre leur place dans la prochaine révolution de la production et en tirer profit.
- **Remédier aux insuffisances de l'action publique en matière de diffusion technologique.** Veiller à ce que les programmes de modernisation des entreprises existantes (c'est-à-dire la majorité des entreprises) disposent de ressources suffisantes, de même que les programmes visant à promouvoir le développement des technologies de pointe et les start-ups. Mettre au point des mécanismes de gestion permettant de réformer (ou de remplacer) les institutions présentant une dépendance au sentier et une résistance au changement. S'assurer que les évaluations gouvernementales accordent plus d'importance au développement des capacités à long terme qu'aux résultats limités à court terme. Promouvoir les approches de conception/construction/mise à l'essai pouvant être expérimentées dans le cadre de nouveaux modèles de diffusion des technologies, et encourager la prise en compte des enseignements tirés de ces expérimentations par les institutions de diffusion technologique nouvelles et existantes.

Corollaire des recommandations énoncées ci-dessus – qui mettent l'accent sur le renforcement des rôles et sur la contribution des institutions de diffusion technologique à la transformation du secteur manufacturier –, il existe des pratiques que les responsables de l'action publique doivent s'efforcer d'éviter. La première est peut-être celle qui consiste à concentrer l'attention et les ressources sur les politiques de soutien aux grandes découvertes et aux technologies de laboratoire attrayantes, en négligeant – ou tout au moins en ne soutenant pas suffisamment – la diffusion des nouvelles technologies et leur transposition à plus grande échelle.

Par ailleurs, la diffusion des nouvelles technologies ne pourra pas se faire uniquement en renforçant les transferts de technologie depuis les universités (qui, généralement, concernent

surtout des travaux scientifiques au stade initial). Elle ne saurait non plus être assurée au moyen de programmes généraux d'aide aux entreprises (allègements fiscaux, prêts ou services de planification stratégique conventionnels). La diffusion des technologies requiert des mécanismes intermédiaires efficaces d'interaction humaine et d'échange de connaissances tacites. De plus, même si les communications électroniques et les ressources du web sont désormais des outils indispensables, il ne suffit pas de les utiliser pour donner accès à des outils d'évaluation ou des documents de présentation : l'intervention de spécialistes expérimentés, possédant des connaissances et des compétences relationnelles, est nécessaire pour comprendre les problèmes et mettre au point des solutions personnalisées.

Le procédé peut-être le plus courant pour assurer la diffusion des nouvelles technologies consiste à cibler les primo-adoptants probables. Ces derniers sont généralement de grandes multinationales, des start-ups de haute technologie et quelques entreprises spécialisées dans la mise au point de technologies. L'attention des pouvoirs publics doit être dirigée non seulement vers ces précurseurs, mais aussi vers les PME en place, qui sont beaucoup plus nombreuses. Toutes les PME n'ont pas la capacité ou la volonté de se moderniser, mais nombre d'entre elles peuvent être incitées et aidées à adopter de nouvelles technologies et de nouvelles approches en matière de fabrication par les institutions chargées de diffuser les technologies. Le succès de la prochaine révolution de la production dépendra en grande partie de cette adoption par les PME, ce qui aura des effets de levier sur les chaînes d'approvisionnement et les pôles d'activité régionaux, où les PME prédominent.

La raison affichée pour justifier le soutien public aux institutions de diffusion technologique est elle aussi importante. Les mesures prises en ce sens ne doivent pas être présentées comme des programmes visant à restaurer des emplois perdus dans le secteur manufacturier ou à redynamiser rapidement d'anciennes régions industrielles. Les institutions de diffusion technologique peuvent aider aujourd'hui les entreprises à modifier leurs méthodes de gestion ainsi qu'à adopter de nouvelles technologies et à concevoir de nouveaux produits et stratégies commerciales, pour qu'elles puissent poursuivre leurs activités et renforcer leurs capacités à proposer des emplois de qualité (même si l'introduction de nouvelles technologies peut entraîner la modification du profil des emplois et de leurs attributions). Il faudra probablement un certain temps (entre cinq et dix ans, voire plus) pour que se fassent sentir les principaux effets positifs de l'action des institutions de diffusion technologique sur l'amélioration des capacités et des performances des entreprises manufacturières en termes d'assimilation des technologies de la prochaine révolution de la production. Les institutions, comme les entreprises, ont besoin de temps pour nouer des relations approfondies et des collaborations. En vérité, d'importants efforts seront nécessaires, pendant de nombreuses années, avant que les interactions de la diffusion technologique – si elles sont importantes – ne produisent des résultats. Cela signifie qu'il faut doter les institutions de diffusion technologique des pouvoirs et des ressources qui leur permettront d'inscrire leur action dans une perspective à long terme. S'il est souhaitable que les services et les programmes soient empreints de flexibilité, en revanche, l'instabilité ou les perspectives à court terme des institutions ont peu de chances de conduire à des pratiques efficaces.

Il ressort du présent chapitre que l'avènement généralisé de la prochaine révolution de la production passe par des institutions de diffusion technologique efficaces. Les responsables de l'action publique en sont en général conscients, mais ils ont tendance à l'oublier ensuite lorsqu'il s'agit de consacrer de l'attention et des ressources à ces institutions. Il est important de remédier à cette situation. Les bienfaits de la diffusion iront généralement aux entreprises et aux systèmes qui parviennent le mieux à déployer les technologies et les modèles

économiques de la prochaine révolution de la production. Ce chapitre a également rappelé la nécessité de mettre en place des politiques-cadres complémentaires du système d'innovation, des mesures indirectes et des incitations agissant sur la demande afin d'intégrer et d'amplifier les effets des institutions de diffusion technologique.

Une autre tâche importante – et un défi – pour ces institutions sera de dégager une convergence de vues et d'élaborer des actions conjointes en vue de concrétiser la prochaine révolution de la production. De par son caractère systématique et réticulaire, cette révolution demandera, sur de nombreux plans, une coopération étroite entre les fabricants, les utilisateurs et autres catégories d'acteurs. Cela signifie que les institutions de diffusion technologique – qui travaillent souvent seule sur un projet donné – doivent aujourd'hui mettre en place des stratégies et des actions qui puissent s'inscrire dans un contexte de collaboration entre plusieurs acteurs. Elles doivent s'affranchir des frontières (nationales et régionales) pour accéder aux connaissances et mener de nouvelles actions conjointes. Elles doivent aussi répondre à des objectifs de durabilité, et de recherche et d'innovation responsables pour contribuer à l'avènement de la prochaine révolution de la production.

Les grandes entreprises seront sans doute plus promptes à adopter de nouvelles technologies et de nouveaux modèles économiques, tandis que les start-ups, de leur côté, joueront un rôle important de par les technologies de rupture qu'elles mettent en œuvre. Cela dit, l'un des objectifs fondamentaux de la diffusion technologique est de faire en sorte que les PME existantes soient parties prenantes à ces mutations, que les stratégies et les services soient adaptés et abordables, et qu'un plus grand nombre de ces entreprises soient encouragées à améliorer leurs capacités d'assimilation et de transformation.

Il importe de pallier les insuffisances de l'action publique en matière de diffusion technologique. Il s'agit en l'occurrence de consacrer l'attention et les ressources voulues à cette diffusion, de veiller à ce que les systèmes d'évaluation soient axés comme il se doit sur le long terme plutôt que sur le court terme, et enfin d'encourager l'expérimentation d'approches nouvelles et créatives pour en intégrer ensuite les enseignements dans les institutions de diffusion technologique nouvelles et existantes.

Enfin, il est indispensable d'examiner et d'analyser en permanence les configurations organisationnelles et les nouveaux modèles qui sont efficaces pour la diffusion technologique, dans un contexte où les conditions de la prochaine révolution de la production ne cessent d'évoluer. Mais pour importants qu'ils soient, les évaluations et le partage des bonnes pratiques ne sont pas suffisants. Il faut, plus fondamentalement, mettre en œuvre des dispositifs et des approches de management qui pousseront les institutions de diffusion technologique à moderniser leurs méthodes et à en expérimenter de nouvelles, à intégrer des technologies novatrices et des méthodes responsables dans leurs propres activités, et à améliorer les capacités d'assimilation des clients et des utilisateurs.

Notes

1. Il convient de noter que cette acception de la technologie suppose que cette dernière est placée sous le contrôle de l'être humain, que ce soit volontairement ou en dernier ressort. Or, le contrôle de la technologie fait l'objet d'éternels débats (voir par exemple Winner, 1997), les technologies autonomes ayant suscité récemment des inquiétudes croissantes (Bostrom, 2014).
2. Pour un examen plus approfondi de la diffusion technologique et des concepts connexes de diffusion des connaissances et de l'innovation, voir par exemple Geroski (2000), Everett (2003), ainsi que Stoneman et Battisti (2010).

3. Bayh-Dole Patent and Trademark Amendments Act of 1980, Pub. L. N° 96-517 (12 décembre 1980), 35 USC §§200-12.
4. Pour comprendre comment certaines nouvelles technologies viennent à s'imposer, plusieurs facteurs sont à prendre en compte, en particulier dans un contexte de rivalité et de concurrence (notamment des conditions d'appropriabilité et des actifs complémentaires ; voir par exemple Teece, 1986). Pour autant, en règle générale, la diffusion d'une technologie dominante est essentielle pour assurer des retombées positives (en particulier des transferts sectoriels et sociaux, ainsi que des gains privés).
5. The American Innovation and Competitiveness Act of 2017, Pub. L. 114-329 (6 janvier 2017).
6. 21st Century Nanotechnology Research and Development Act of 2003, Pub. L. 108-153 (3 décembre 2003), 15 USC 7501.
7. Les informations fournies dans cette section proviennent notamment des entretiens réalisés à Singapour par J. Youtie en mars 2016.
8. Pour en savoir plus sur le KTN, voir : www.ktn-uk.co.uk/.
9. Informations disponibles sur le site : www.clusterplattform.de/SiteGlobals/CLUSTER/Forms/Suche/EN/Clustersearch_Form.html (consulté le 12 janvier 2017).
10. D'après un entretien avec le conseiller en chef et directeur de BioBricks le 29 août 2016, ainsi que la consultation du site web de BioBricks (<https://biobricks.org>).
11. www.manufacturingusa.com/ (consulté le 12 janvier 2017).
12. <https://catapult.org.uk> (consulté le 12 janvier 2017).
13. La Chine a lancé un programme national de modernisation du secteur manufacturier, baptisé « Made in China 2025 » (China State Council, 2015). Voir aussi le site <http://english.gov.cn/2016special/madeinchina2025/> (consulté le 12 janvier 2017).
14. Cell Therapy Catapult a signé un protocole d'accord avec la préfecture de Kanagawa, Japon. <https://ct.catapult.org.uk/news-media/regulatory-news/cell-therapy-catapult-signs-memorandum-understanding-kanagawa-prefecture> (consulté le 12 janvier 2017).
15. <https://es.catapult.org.uk/> (consulté le 12 janvier 2017).
16. La définition générale de la durabilité englobe les volets environnemental, économique et social. Cette section porte sur la durabilité environnementale, mais les volets économique et social sont abordés dans la section relative à la recherche et l'innovation responsables.
17. Engineering and Physical Sciences Research Council, Framework for Responsible Innovation, www.epsrc.ac.uk/research/framework/ (consulté le 12 janvier 2017).

Références

- Alessi, C. et C. Gummer (2014), « Germany bets on “smart factories” to keep its manufacturing edge », *Wall Street Journal*, 26 octobre, www.wsj.com/articles/germany-bets-on-smart-factories-to-keep-its-manufacturing-edge-1414355745.
- Aldrich, H. et D. Herker (1977), « Boundary spanning roles and organization structure », *Academy of Management Review*, vol. 2, n° 2, pp. 217-230, <http://dx.doi.org/10.5465/AMR.1977.4409044>.
- Baden-Fuller, C. et S. Haefliger (2013), « Business models and technological innovation », *Long Range Planning*, vol. 46, n° 6, pp. 419-426, <http://dx.doi.org/10.1016/j.lrp.2013.08.023>.
- Bakhshi, H. et al. (2015), « Assessing an experimental approach to industrial policy evaluation: Applying RCT+ to the case of Creative Credits », *Research Policy*, vol. 44, n° 8, pp. 1462-1472, <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2015.04.004>.
- Birtchnell, T. et W. Hoyle (2014), *3D Printing for Development in the Global South: The 3D4D Challenge*, Palgrave Macmillan, Basingstoke.
- Blank, S. (2013), « Why the lean start-up changes everything », *Harvard Business Review*, vol. 91, n° 5, pp. 63-72.
- Blind, K., S.S. Petersen et C.A.F. Riillo (2016), « The impact of standards and regulation on innovation in uncertain markets », *Research Policy*, vol. 46, n° 1, <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2016.11.003>.
- BMW (Ministère fédéral allemand de l'Économie et de l'Énergie) (2010), « Cluster management excellence. Volume II : Sustainability and effectiveness of clusters and networks », initiative du Kompetenznetze Deutschland, Ministère fédéral de l'Économie et de la Technologie, Berlin.

- Bostrom, N. (2014), *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*, Oxford University Press, Oxford.
- Bound, K. et al. (2014), *China's Absorptive State: Research, Innovation and the Prospects for China-UK Collaboration*, Nesta, Londres, www.nesta.org.uk/sites/default/files/chinas_absorptive_state_0.pdf (consulté le 12 janvier 2017).
- Bozeman, B. (2000), « Technology transfer and public policy: A review of research and theory », *Research Policy*, vol. 29, n° 4-5, pp. 627-655, [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00093-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00093-1).
- Brennan, L. et al. (2015), « Manufacturing in the world: Where next? », *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 35, n° 9, pp. 1253-1274, <http://dx.doi.org/10.1108/IJOPM-03-2015-0135>.
- Buffington, J. (2016), *Frictionless Markets: The 21st Century Supply Chain*, Springer International Publishing Cham, Suisse.
- Caiazza, R. et T. Volpe (2017), « Innovation and its diffusion: Process, actors and actions », *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 29, n° 2, pp. 181-189, <http://dx.doi.org/10.1080/09537325.2016.1211262>.
- Chesbrough, H., W. Vanhaverbeke et J. West (dir. pub.) (2014), *New Frontiers in Open Innovation*, Oxford University Press, Oxford.
- Conseil des Affaires d'État de la République de Chine (2015), *中国制造 2025 (Made in China 2025)*, Conseil des Affaires d'État, Pékin, République populaire de Chine, <http://community.iotone.com/uploads/secondsite/original/1X/3ea7f668ee18d9dee5b6afa32da17b40cc8e5b66.pdf> (consulté le 12 janvier 2017).
- Cohen, W.M. et D.A. Levinthal (1990), « Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation », *Administrative Science Quarterly*, vol. 35, n° 1, pp. 128-152, <http://dx.doi.org/10.2307/2393553>.
- CORFO (2016), « Voucher de Innovación », [chèque-innovation], page web, Corporación de Fomento de la Producción de Chile, Santiago, Chili, www.corfo.cl/programas-y-concursos/programas/voucher-de-innovacion (consulté le 12 janvier 2017).
- Cornet, M., B. Vroomen et M. van der Steef (2006), « Do innovation vouchers help SMEs to cross the bridge towards science? » CPB Discussion Paper 58, Bureau néerlandais d'analyses de politique économique CPB, La Haye, www.cpb.nl/sites/default/files/publicaties/download/do-innovation-vouchers-help-smes-cross-bridge-towards-science.pdf (consulté le 12 janvier 2017).
- CREATE (2016), « Campus for Research Excellence and Technological Enterprise (CREATE) », page web, Fondation nationale pour la Recherche (NRF), www.nrf.gov.sg/about-nrf/programmes/create (consulté le 27 octobre 2016).
- Cunningham, P. et R. Ramlogan (2016), « The impact of innovation networks », in J. Edler, P. Cunningham, A. Göck et P. Shapira, (dir. pub.), *Handbook of Innovation Policy Impact*, Edward Elgar, Cheltenham.
- DG ENTR-Unit D2 (2009), *Availability and Focus on Innovation Voucher Schemes in European Regions*, Direction générale des entreprises et de l'industrie, Commission européenne, Bruxelles, <http://wbc-inco.net/object/document/7801/attach/Innovationvouchersurveyresults.pdf> (consulté le 12 janvier 2017).
- DMC (Digital Manufacturing Commons) (2016), « Digital Manufacturing Commons », site web, www.projectdmc.org/, (consulté le 27 octobre 2016).
- Dutta, S. et B. Lanvin (dir. pub.) (2013), *The Global Innovation Index 2013: The Local Dynamics of Innovation*, Université Cornell, INSEAD et OMPI, Ithaca, Fontainebleau et Genève, www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/economics/gii/gii_2013.pdf (consulté le 12 janvier 2017).
- Edler, J. (2016), « The impact of policy measures to stimulate private demand for innovation », in J. Edler, P. Cunningham, A. Göck et P. Shapira, (dir. pub.), *Handbook of Innovation Policy Impact*, Edward Elgar, Cheltenham.
- Edler, J. (2010), « Demand-based innovation policy », in R.E. Smits, S. Kuhlmann et P. Shapira, (dir. pub.), *The Theory and Practice of Innovation Policy: An International Research Handbook*, Edward Elgar, Cheltenham.
- Ekert, D., V. Schüren et A. Bode (2016), « Evaluation des Programms go-cluster des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), InterVal, Berlin », [Evaluation du programme « Go-cluster » du Ministère fédéral allemand de l'Économie et de l'Énergie (BMWi), InterVal, Berlin], www.clusterplattform.de/CLUSTER/Redaktion/DE/Downloads/Publikationen/kurzfassung_evaluation_des_programms_go_cluster.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (consulté le 12 janvier 2017).
- Engel, J. (dir. pub.) (2014), *Global Clusters of Innovation: Entrepreneurial Engines of Economic Growth Around the World*, Edward Elgar, Cheltenham.
- Everett, R.M. (2003), *Diffusion of Innovations*, Fifth Edition, Free Press, New York.

- Fisher, E. et R.L. Mahajan (2006), « Contradictory intent? US federal legislation on integrating societal concerns into nanotechnology research and development », *Science and Public Policy*, vol. 33, n° 1, pp. 5-16, <http://dx.doi.org/10.3152/147154306781779181>.
- Flanagan, K., E. Uyarra et M. Laranja (2011), « Reconceptualising the “policy mix” for innovation », *Research Policy*, vol. 40, n° 5, pp. 702-713, <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2011.02.005>.
- Fleck, J. (1997), « Contingent knowledge and technology development », *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 9, n° 4, pp. 383-398, <http://dx.doi.org/10.1080/09537329708524293>.
- Foresight (2013), *The Future of Manufacturing: A New Era of Opportunity and Challenge for the UK*, Government Office for Science, Londres.
- Fraunhofer (2016), « Fraunhofer-Gesellschaft – About Fraunhofer », page web, www.fraunhofer.de/en.html (consulté le 27 octobre 2016).
- Freeman, R., C. McMahon et P. Godfrey (2016), « Design of an integrated assessment of re-distributed manufacturing for the sustainable, resilient city », in R. Setchi et al. (dir. pub.), *Sustainable Design and Manufacturing 2016*, Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 52, pp. 601-612, Springer, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-32098-4_51.
- Geels, F.W. (2002), « Technological transitions as evolutionary reconfiguration processes: A multi-level perspective and a case-study », *Research Policy*, vol. 31, pp. 1257-1274, [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333\(02\)00062-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333(02)00062-8).
- Geroski, P. (2000), « Models of technology diffusion », *Research Policy*, vol. 29, n° 4-5, pp. 603-625, [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00092-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00092-X).
- Govindarajan, V. et C. Trimble (2004), « Strategic Innovation and the Science of Learning », *MIT Sloan Management Review*, vol. 45, n° 2, pp. 67-75.
- Gregorowius, D. et A. Deplazes-Zemp (2016), « Societal impact of synthetic biology: Responsible research and innovation (RRI) », *Essays in Biochemistry*, vol. 60, n° 4, pp. 371-379, <http://dx.doi.org/10.1042/EBC20160039>.
- Hagerty, J. (2013), « Forget revolution. More like renovation. At many US manufacturing plants, the winds of change have barely caused a ripple », *Wall Street Journal*, 10 juin, www.wsj.com/articles/SB10001424127887323372504578469781201089200 (consulté le 27 octobre 2016).
- Hekkert, M.P. et al. (2007), « Functions of innovation systems: A new approach for analysing technological change », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 74, n° 4, pp. 413-432, <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2006.03.002>.
- Helmsley Charitable Trust (2016), « The BioBricks Foundation », page web, <http://helmsley79.rssing.com/browser.php?indx=52025383&item=5> (consulté le 27 octobre 2016).
- Horlings, L.G. (2014), « Leadership, governance and knowledge in an enterprising place: The case of Brainport Eindhoven in the Netherlands », in L. Pugalis et J. Liddle (dir. pub.), *Enterprising Places: Leadership and Governance Networks*, Emerald Group Publishing Limited, Bingley, pp. 149-175.
- Kagermann, H., W. Wahlster et J. Helbig (dir. pub.) (2013), *Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0: Final Report of the Industrie 4.0 Working Group*, sous l'égide du Ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche, www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Material_fuer_Sonderseiten/Industrie_4.0/Final_report__Industrie_4.0_accessible.pdf.
- Kaufmann, A. et F. Tödtling (2001), « Science-industry interaction in the process of innovation: The importance of boundary-crossing between systems », *Research Policy*, vol. 30, n° 5, pp. 791-804, [http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333\(00\)00118-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-7333(00)00118-9).
- Kochenkova, A., R. Grimaldi et F.J. Munari (2016), « Public policy measures in support of knowledge transfer activities: A review of academic literature », *Journal of Technology Transfer*, vol. 41, n° 3, pp. 407-429, <http://dx.doi.org/10.1007/s10961-015-9416-9>.
- La Maison-Blanche (2016), « President Obama announces winner of new Smart Manufacturing Innovation Institute and New Manufacturing Hub competitions », Fact Sheet, 20 juin, Bureau exécutif du président, Maison-Blanche, Washington, DC, www.whitehouse.gov/the-press-office/2016/06/20/fact-sheet-president-obama-announces-winner-new-smart-manufacturing.
- Langhorn, K. (2014), « Encouraging entrepreneurship with innovation vouchers: Recent experience, lessons, and research directions », *Administration publique du Canada*, vol. 57, n° 2, pp. 318-326, <http://dx.doi.org/10.1111/capa.12070>.

- Manyika, J. et al. (2015), *Global Growth: Can Productivity Save the Day in an Aging World?*, McKinsey Global Institute, San Francisco.
- Michelson, E. (2016), *Assessing the Societal Implications of Emerging Technologies. Anticipatory Governance in Practice*, Routledge, Abingdon.
- McBride, N. et B. Stahl (2014), « Developing responsible research and innovation for robotics », *Proceedings of the IEEE 2014 International Symposium on Ethics in Engineering, Science, and Technology (ETHICS '14)*, 27, IEEE Press, Piscataway, NJ, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2960620> (consulté le 12 janvier 2017).
- Moreno, M. et F. Charnley (2016), « Can re-distributed manufacturing and digital intelligence enable a regenerative economy? An integrative literature review », in R. Setchi et al. (dir. pub.), *Sustainable Design and Manufacturing 2016. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 52, pp. 563-575, Springer, Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-32098-4_48.
- NAE (2015), *Making Value for America: Embracing the Future of Manufacturing, Technology, and Work*, Committee on Foundational Best Practices for Making Value for America, Académie nationale d'ingénierie des États-Unis, National Academies Press, Washington, DC.
- NAE (2012), « Making things: 21st century manufacturing & design », compte rendu d'un symposium de l'Académie nationale d'ingénierie des États-Unis, National Academies Press.
- NAPA (2003), *The National Institute of Standards and Technology's Manufacturing Extension Partnership Report 1: Re-examining the Core Premise of the MEP Program*, National Academy of Public Administration, Washington, DC.
- OCDE (2016), « The next production revolution: An interim project report », document interne, OCDE, Paris.
- OCDE (2015), *The Future of Productivity*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264248533-en>.
- OCDE (2010a), *Eco-innovation in Industry: Enabling Green Growth*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264077225-en>.
- OCDE (2010b), « Innovation vouchers », OCDE, Paris, www.oecd.org/innovation/policyplatform/48135973.pdf.
- OCDE (1998), *Technology, Productivity and Job Creation: Best Practices 1998 Edition*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264163416-en>.
- Osterwalder, A. et Y. Pigneur (2010), *Business Model Generation: A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers*, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Owen, R., J. Bessant et M. Heintz (dir. pub.) (2013), *Responsible Innovation: Managing the Emergence of Science and Innovation in Society*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Park, Y.-T. (1999), « Technology diffusion policy: A review and classification of policy practices », *Technology in Society*, vol. 21, n° 3, pp. 275-286, [http://dx.doi.org/10.1016/S0160-791X\(99\)00015-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0160-791X(99)00015-9).
- Pearson, H., G. Noble et J. Hawkins (2013), *Workshop on Re-distributed Manufacturing. Technical Report*, Engineering and Physical Sciences Research Council, Swindon, Royaume-Uni, www.epsrc.ac.uk/newsevents/pubs/re-distributed-manufacturing-workshop-report/.
- Prendeville S. et al. (2016), « Makespaces: From redistributed manufacturing to a circular economy », in R. Setchi et al. (dir. pub.), *Sustainable Design and Manufacturing 2016: Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 52, Springer International Publishing, Cham, Suisse.
- Rauch, E., P. Dallasega et D.T. Matt (2016), « Sustainable production in emerging markets through Distributed Manufacturing Systems (DMS) », *Journal of Cleaner Production*, vol. 135, n° 1, pp. 127-138, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.106>.
- Rogers, J.D., J. Youtie et L. Kay (2012), « Program-level assessment of research centers: Contribution of Nanoscale Science and Engineering Centers to US Nanotechnology National Initiative goals », *Research Evaluation*, vol. 21, n° 5, pp. 368-380, <http://dx.doi.org/10.1093/reseval/rvs028>.
- Sala, A., P. Landoni et R. Verganti (2015), « Small and medium enterprises collaborations with knowledge intensive services: An explorative analysis of the impact of innovation vouchers », *R&D Management*, vol. 46, n° S1, pp. 291-302, <http://dx.doi.org/10.1111/radm.12196>.
- Saunders, T. et J. Kingsley (2016), *Made in China: Makerspaces and the search for mass innovation*, Nesta, Londres, www.nesta.org.uk/sites/default/files/made_in_china_-_makerspaces_report.pdf (consulté le 12 janvier 2017).
- Shapira, P. et al. (2015), *Institutions for Technology Diffusion*, banque interaméricaine de développement, Washington, DC, <https://publications.iadb.org/handle/11319/6994> (consulté le 12 janvier 2017).

- Shapira, P. et A. Gök (2015), « UK Synthetic Biology Centres tasked with addressing public concerns », *The Guardian*, 30 janvier, www.theguardian.com/science/political-science/2015/jan/30/uk-synthetic-biology-centres-tasked-with-addressing-public-concerns (consulté le 12 janvier 2017).
- Solberg, E. et al. (2012), *Markets for Applied Research: A Comparative Analysis of R&D Systems in Five Countries*, Rapport 46/2010, Nordic Institute for Studies in Innovation and Research (NIFU), Oslo.
- Stilgoe, J., R. Owen et P. Macnaghten (2013), « Developing a framework for responsible innovation », *Research Policy*, vol. 42, n° 9, pp. 1568-1580, <http://dx.doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008>.
- Stoneman, P. et G. Battisti (2010), « The diffusion of new technology », in B.H. Hall et N. Rosenberg (dir. pub.), *Handbook of the Economics of Innovation*, vol. 2, pp. 733-760.
- SynbiCITE (2016), « SynbiCITE », site web de l'entreprise, www.synbicite.com/ (consulté le 27 octobre 2016).
- Teece, D.J. (1986), « Profiting from technological innovation », *Research Policy*, vol. 15, n° 6, pp. 285-305, [http://dx.doi.org/10.1016/0048-7333\(86\)90027-2](http://dx.doi.org/10.1016/0048-7333(86)90027-2).
- Tushman, M. (1977), « Special boundary roles in the innovation process », *Administrative Science Quarterly*, vol. 22, n° 4, pp. 587-605, <http://dx.doi.org/10.2307/2392402>.
- UE (Union européenne) (2012), « Responsible research and innovation: Europe's ability to respond to societal challenges », Office des publications, Commission européenne, Luxembourg, https://ec.europa.eu/research/swafs/pdf/pub_public_engagement/responsible-research-and-innovation-leaflet_en.pdf (consulté le 12 janvier 2017).
- UK Synthetic Biology Roadmap Coordination Group (2012), *A Synthetic Biology Roadmap for the UK*, Technology Strategy Board, Swindon, Royaume-Uni, www.rcuk.ac.uk/documents/publications/syntheticbiologyroadmap-pdf/ (consulté le 12 janvier 2017).
- US Census Bureau (2016), « Economic Census », Government Printing Office, Washington, DC, www.census.gov/programs-surveys/economic-census.html.
- US Government Accountability Office (2011), *NIST Manufacturing Extension Partnership Program Cost Share*, GAO-11-437R, Bureau d'impression du gouvernement, Washington, DC.
- US NNMI (2016), « Manufacturing USA – The national network for manufacturing innovation », site web, www.manufacturing.gov/nnmi/ (consulté le 27 octobre 2016).
- US NSF (2016), *NSF Budget Requests to Congress and Annual Appropriations*, National Science Foundation, Bureau d'impression du gouvernement, Washington, DC, <https://nsf.gov/about/budget/> (consulté le 27 octobre 2016).
- Uyerra, E. (2016), « The impact of public procurement of innovation », in J. Edler et al. (dir. pub.), *Handbook of Innovation Policy Impact*, Edward Elgar, Cheltenham.
- Virani, T.E. et A.C. Pratt (2016), « Intermediaries and the knowledge exchange process: The case of the creative industries and higher education », in R. Comunian et A. Gilmore (dir. pub.), *Higher Education and the Creative Economy: Beyond the Campus*, Routledge, Abingdon, pp. 41-58.
- Weilerstein, P. (2014), « NCIIA: Students as the vanguard in a geographically dispersed approach to stimulating science and technology innovation », in J. Engel (dir. pub.), *Global Clusters of Innovation: Entrepreneurial Engines of Economic Growth around the World*, pp., 359-377, Edward Elgar, Cheltenham.
- Wu, D. et al. (2015), « Cloud-based design and manufacturing: A new paradigm in digital manufacturing and design innovation », *Computer-Aided Design*, vol. 59, pp. 1-14, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2014.07.006>.
- Youtie, J. et al. (2007), « A brief history of the future of manufacturing: U.S. manufacturing technology forecasts in retrospective, 1950-present », *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 3, n° 3, pp. 311-331.
- Youtie, J. et P. Shapira, (2016), « Exploring public values implications of the I-Corps program », *Journal of Technology Transfer*, pp. 1-15, <http://dx.doi.org/10.1007/s10961-016-9518-z>.
- Zaki, M. et al. (2017), « The role of big data to facilitate redistributed manufacturing using a co-creation lens: Patterns from consumer goods », 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP.

PARTIE II

Chapitre 8

Adhésion du public et technologies de production émergentes

par

David E. Winickoff

Direction de la science, de la technologie et de l'innovation, OCDE

L'adhésion du public à la technologie joue pour beaucoup dans l'influence que l'innovation exerce sur la société, et elle doit donc être prise en compte dans l'élaboration des politiques qui touchent à la prochaine révolution de la production. On pense souvent, à tort, que la résistance à la technologie tient principalement au fait que le public méconnaît les avantages véritables de certaines technologies ou de l'innovation en général. La recherche en sciences sociales montre que cette résistance serait davantage due à des conflits de valeurs, à des préoccupations quant à la répartition des avantages attendus et à un manque de confiance dans les institutions de gouvernance, telles que les autorités de réglementation et les organismes techniques consultatifs. En règle générale, les pays et les innovateurs devraient, dans toute la mesure du possible, tenir compte des préoccupations et des objectifs sociaux dès le début du processus de développement. Cette exigence n'est guère facile à respecter, mais de bonnes pratiques apparaissent, qui peuvent montrer la voie à suivre. Elles consistent notamment à intégrer les flux de financement des travaux en sciences sociales et humaines, avec les sciences naturelles et physique, en utilisant des formes participatives de prospective et d'évaluation de la technologie pour dessiner les perspectives souhaitables, et en engageant les parties prenantes à des processus de communication clairement liés à l'action publique. Tout cela contribuera à instaurer la confiance et la crédibilité des systèmes d'innovation.

Introduction

L'adhésion du public à la technologie est une composante clé des politiques d'innovation (OCDE, 2016a). Il est essentiel d'en tenir compte dans l'élaboration des politiques qui touchent à la prochaine révolution de la production. Les vives inquiétudes du public peuvent infléchir l'orientation, le rythme et la diffusion de l'innovation, voire faire obstacle à ses progrès (Gupta, Fischer et Frewer, 2012). Et cela même lorsque la faisabilité technique et économique a été démontrée, que les arguments avancés pour justifier l'adoption semblent solides et que des investissements massifs ont été consentis. Les technologies émergentes se sont parfois heurtées à des préoccupations sociales et éthiques (CE, 2013). Dans le même temps, la résistance du public aux technologies peut donner naissance à des législations qui renforcent la confiance et guident l'innovation vers des voies acceptables (Rodricks, 2006 ; Packer, 2008 ; Davis, 2014).

L'attention prêtée à l'adhésion du public aux technologies de la prochaine révolution de la production pourrait bien être particulièrement décisive aujourd'hui. L'utilisation de la technologie peut être influencée par le contexte social et politique (Gupta, Fischer et Frewer, 2012). Le développement et l'adoption des technologies de production sont en passe d'influer considérablement les marchés du travail (The Economist, 2016), ce qui soulève de sérieuses questions quant à l'attitude du public à l'égard de ces nouvelles technologies et de son adhésion à ces dernières. Les enjeux pourraient être considérables : d'aucuns voient dans certains événements politiques de 2016 une réaction de la population aux politiques industrielles en vigueur et aux les effets de la technologie sur le marché du travail.

Il y a longtemps que l'opposition du public croît à l'égard de divers secteurs technologiques, notamment l'énergie nucléaire, les organismes génétiquement modifiés (OGM) et d'autres domaines des biotechnologies. En Europe, par exemple, en raison de la méfiance du public à l'égard des OGM, les niveaux de financement ont été plus faibles, les décisions réglementaires défavorables plus nombreuses et l'innovation moins dynamique dans ce secteur qu'ailleurs (Currall et al., 2006). L'investissement public peut aussi se retrouver « immobilisé » (impossible à exploiter). Ainsi, de nombreux pays ont investi dans la construction de réacteurs nucléaires dans les années 60 et 70, mais malgré l'avis d'experts qui en garantissaient la sûreté, la mobilisation politique a mis un coup d'arrêt à l'expansion du parc nucléaire à travers le monde (Winner, 1977).

Il ne faut pas en conclure que le public est contre la technologie. L'attitude générale des citoyens européens à cet égard est évaluée régulièrement par l'Eurobaromètre, avec un ensemble d'enquêtes menées pour le compte de la Commission européenne depuis 1973. S'il est difficile de se faire une idée de l'attitude du grand public concernant les technologies émergentes, on observe que les sociétés regardent généralement l'évolution technologique avec optimisme, même si celle-ci leur inspire quelques craintes. Lors d'une enquête majeure menée récemment en Europe, au moins la moitié des personnes interrogées ont indiqué qu'elles s'attendaient à ce que, d'ici 15 ans, l'évolution scientifique et technologique ait des effets positifs sur la santé et les soins médicaux (65 %), sur l'éducation et les compétences

(60 %), sur le transport et les infrastructures de transport (59 %), sur la fourniture d'énergie (58 %), sur la protection de l'environnement (57 %), sur la lutte contre le changement climatique (54 %) et sur la qualité du logement (50 %) (CE, 2014a).

Pour évaluer l'adhésion du public, il faut toutefois dépasser la mesure des attitudes, et chercher à mieux comprendre les sources et les moteurs de cette adhésion. Il importe tout d'abord de comprendre que le public dont on parle ici est en fait multiple. Des travaux récents sur l'adhésion dans le contexte des énergies renouvelables montrent bien qu'il faut éviter de se limiter à une acceptation trop réduite de ce concept. Ces travaux soulignent que le phénomène ne dépend pas uniquement d'une acceptation politique large de la part du public et des parties prenantes clés, mais aussi de l'adhésion des consommateurs et des investisseurs, ainsi que de celle des collectivités au sein desquelles les nouvelles technologies sont introduites. Certains universitaires parlent du « triangle de l'adhésion » (Wüstenhagen, Wolsink et Bürer, 2007 ; Reith et al., 2013).

Le présent chapitre tire des enseignements applicables à la prochaine révolution de la production de travaux menés dans d'autres branches de la science et d'autres secteurs à fort coefficient de recherche tels que la santé, et examine les préoccupations que suscitent certaines technologies participant à cette révolution, en particulier l'intelligence artificielle, les biotechnologies industrielles et les nanotechnologies. L'accueil réservé par la société aux technologies émergentes par le passé devrait aider à éclairer les responsables de l'élaboration des politiques et d'autres acteurs clés afin de faire avancer ces technologies. On pense souvent, à tort, que la résistance à la technologie tient au fait que le public méconnaît les avantages véritables de certaines technologies ou de l'innovation en général. La recherche en sciences sociales montre que les conflits de valeurs fondamentales, les préoccupations quant à la répartition des avantages attendus et un manque de confiance dans les institutions de gouvernance, telles que les autorités de réglementation et les organismes scientifiques consultatifs, pourraient avoir un rôle plus important.

En règle générale, les pays et les innovateurs devraient, dans toute la mesure du possible, intégrer les préoccupations et les aspirations sociales dès le début du processus de développement. Cette exigence n'est guère facile à respecter, mais de bonnes pratiques voient le jour et montrent la voie à suivre. Elles consistent notamment à intégrer les flux de financement des travaux en sciences sociales et humaines, avec ceux de sciences naturelles et physique, en utilisant des formes participatives de prospective et d'évaluation de la technologie pour dessiner les perspectives souhaitables, et en associant les parties prenantes à des processus de communication clairement liés à l'action publique. Tout cela contribuera à instaurer la confiance et la crédibilité des systèmes d'innovation, deux facteurs indispensables à l'adhésion du public.

Technologies essentielles

Certaines technologies examinées dans le présent rapport sont déjà sources de préoccupations pour le public, et vont probablement continuer à l'être (CE, 2013). Cette section passe brièvement en revue les enjeux de l'adhésion du public aux biotechnologies, aux nanotechnologies, aux données massives et à l'intelligence artificielle. Certaines préoccupations du public concernant les technologies de production émergentes tiennent aux risques associés – notamment à l'influence que les nouvelles technologies pourraient exercer sur la santé et la sécurité des individus et sur l'environnement – et à l'idée que la surveillance actuelle est inadaptée pour anticiper les préjudices potentiels. D'autres

concernent les questions d'intervention sur les processus du vivant, ou encore sur le pouvoir de décision et l'accès à la technologie elle-même, tel que le contrôle de la propriété intellectuelle ou la domination du marché. L'une des principales sources d'incertitude quant à la trajectoire de ces technologies reste le fait qu'elles convergent de façon inattendue, et créent encore d'autres technologies nouvelles. On pourrait prendre comme exemple la convergence entre les technologies de l'information et des communications (TIC) et les biotechnologies, qui ouvre des voies de recherche en biologie de synthèse, laquelle constitue un tremplin pour de nombreux autres types d'entités et d'outils biologiques.

Les biotechnologies industrielles

L'utilisation des biotechnologies à l'échelle industrielle pour les combustibles, les produits chimiques et d'autres produits est probablement l'une des composantes de la refonte du système de production (voir le chapitre 9). Bien entendu, les biotechnologies et les risques possibles pour la société sont une source persistante de conflits au sein de l'opinion publique, particulièrement lorsqu'il s'agit des OGM et de la biologie de synthèse. Dans les pays développés comme dans les pays en développement, les OGM suscitent des inquiétudes quant aux risques pour la santé et la sécurité, ainsi qu'à la capacité de limiter et d'inverser leur dissémination.

Les perceptions négatives se sont aussi focalisées sur un lien entre les biotechnologies, le brevetage des semences et la concentration industrielle dans le secteur agroalimentaire (Jasanoff, 2005). Ces préoccupations ont été levées différemment selon les pays, certains adoptant les cultures génétiquement modifiées à un rythme beaucoup plus lent que d'autres. Des approches réglementaires très disparates reflétant l'hétérogénéité de l'accueil réservé par l'opinion aux biotechnologies se sont soldées par des dérèglements dans les échanges internationaux et parfois même par des différends pour lesquels l'Organisation mondiale du commerce (OMC) a été saisie (Pollack et Shaffer 2009).

Concernant la biotechnologie, les démarches entreprises des pouvoirs publics dans le but de répondre aux inquiétudes liées à la technologie misant sur l'évaluation des risques ne sont parfois que partiellement concluantes. Dans le domaine des biotechnologies, les désaccords portant sur les risques sanitaires et environnementaux tiennent, au moins en partie, à des convictions profondes quant à la relation entre l'homme et l'environnement, à l'éthique de la manipulation de la « nature » par l'homme et aux craintes d'une appropriation de la biologie par le secteur privé (Jasanoff, 2005), mais, faute souvent d'une autre voie pour débattre des implications morales de la technologie, le risque de sécurité environnementale et sanitaire devient un sujet majeur de préoccupation (Winickoff et al., 2005).

La bioproduction ne dépend pas des matières premières agricoles génétiquement modifiées, mais elle implique assurément des stratégies biochimiques techniques perfectionnées pour décomposer et reformuler le matériel génétique à grande échelle. Il faudra que les pouvoirs publics anticipent les préoccupations du public quant aux avancées biotechnologiques récentes qui rendent ces approches possibles. Les avancées récentes en génie génétique, en particulier ce qu'on appelle l'« édition génomique », ont déjà provoqué un débat dans l'opinion au sujet des avantages et effets nocifs potentiels de cette technologie, notamment lorsqu'il s'agit de modifier la lignée germinale humaine (encadré 8.1). La biologie de synthèse, en particulier le développement de nouvelles séquences d'ADN *de novo* a également soulevé la controverse au sein de l'opinion. Le discours public sur ces technologies, à l'intérieur des pays et entre eux, aura probablement une forte incidence sur les biotechnologies industrielles (McNutt, 2015).

Encadré 8.1. L'édition génomique face à la société

Avec les techniques d'édition génomique, et notamment celles reposant sur le système CRISPR-Cas9 (désigné par la revue *Science* comme l'innovation radicale de l'année 2015), les scientifiques sont désormais en mesure de modifier une séquence d'ADN en des endroits précis d'un chromosome. Ces techniques sont employées avec succès pour transformer la manipulation des génomes dans toutes sortes d'applications. L'édition génomique doit rendre plus faciles et moins onéreuses la conception et la construction d'organismes présentant les caractéristiques que l'on souhaite. Elle a été utilisée avec de bons résultats sur des organismes d'importance commerciale telles que les plantes cultivées et les animaux d'élevage, ouvrant ainsi la voie à l'élaboration de nouvelles méthodes de lutte contre les ravageurs et les maladies, et à des gains d'efficacité dans la sélection végétale et animale. Dernièrement, le système CRISPR a été utilisé en République populaire de Chine pour modifier le génome d'embryons humains non viables, et des expériences similaires ont été approuvées au Royaume-Uni (Callaway, 2016).

Certaines communautés scientifiques ont adopté une démarche proactive, ouvrant un débat public sur le CRISPR, un système qui pourrait être utilisé dans divers domaines, tels que la médecine, la sélection animale et la gestion de l'environnement. La technique a soudainement rendu plus plausibles des applications de la biotechnologie potentiellement sujettes à controverse, comme une modification précise du génome humain. En mars 2015, un groupe de scientifiques et de spécialistes de l'éthique, dont les Prix Nobel David Baltimore (Caltech) et Paul Berg (université Stanford), a proposé un moratoire mondial sur les modifications du génome humain susceptibles de se transmettre aux générations futures. En décembre 2015, la National Academy of Science (États-Unis), l'Académie chinoise des sciences et la Royal Society (Royaume-Uni) ont organisé un sommet réunissant des experts du monde entier pour débattre des enjeux scientifiques et éthiques, ainsi que des questions de gouvernance liés à la recherche en matière d'édition génomique appliquée à l'homme (Reardon, 2015).

Les nanotechnologies

On prévoit que l'ingénierie à l'échelle moléculaire par le biais des nanotechnologies jouera un rôle important dans la prochaine révolution de la production (voir le chapitre 4). Au début des années 90, les pouvoirs publics et le secteur privé ont vanté les nanotechnologies comme constituant l'une des clés de la croissance économique future et un outil nouveau pour résoudre les problèmes de la société. Les entreprises, les pouvoirs publics et les milieux universitaires ont consenti des investissements considérables dans ces technologies et leur commercialisation (Barben et al., 2007). L'optimisme autour des possibilités de transformation positive de la société par les nanotechnologies a stimulé la croissance de l'innovation dans ce domaine, mais cet enthousiasme s'est accompagné d'inquiétudes et de protestations. Des personnalités en vue telles que Bill Joy et Son Altesse royale le prince Charles, mais aussi des groupes de militants, dont Greenpeace (Arnall, 2003) et le Groupe d'action sur l'érosion, la technologie et la concentration (Groupe ETC, 2003), ont tiré la sonnette d'alarme. Dans la revue *Wired*, Joy (2000), par exemple, a envisagé un scénario catastrophe intitulé « *grey goo* » (gelée grise) dans lequel des nanorobots autorépliquants pouvaient anéantir la vie. D'autres se sont dits préoccupés par les dangers pour l'environnement et les conséquences indésirables de ces technologies (Tenner, 2001), leurs effets sur la vie privée et la sécurité (MacDonald, 2004), et le risque qu'elles accentuent les inégalités économiques (Meridian Institute, 2005).

Ces préoccupations du public concernant les nanotechnologies ont croisé l'hostilité existante envers les biotechnologies, comme en témoigne la demande répétée du Groupe ETC – une organisation de la société civile axant son action sur les effets socioéconomiques et écologiques des nouvelles technologies et organisatrice d'une mobilisation contre la biotechnologie agricole – qu'un moratoire soit adopté sur certaines formes de recherche et développement (R-D) en nanotechnologies en raison de préoccupations concernant la santé et la sécurité de l'environnement (Barben et al., 2007).

Avertis par l'expérience de l'opposition du public aux aliments génétiquement modifiés en Europe, les responsables de l'élaboration des politiques ont commencé à craindre que les nanotechnologies se heurtent à une large résistance du public. Dans certains pays, ils ont pris des mesures pour promouvoir des considérations sociétales plus vastes, en les intégrant dans la R-D en nanotechnologies dès les premiers stades. Des mesures telles que le co-financement de travaux de recherche en sciences sociales et humaines, et diverses formes de participation du public étaient censées garantir une science attentive aux besoins de la société, et une prise de décision plus efficace.

Aux États-Unis, par exemple, à l'inverse des mesures prises précédemment, un texte législatif a été adopté en 2003, visant à intégrer la recherche sociale et la contribution du public « en amont » dans la politique de R-D en nanotechnologies. Cette priorité accordée à l'intégration précoce ou simultanée de travaux sur les préoccupations sociales était comparable à la démarche adoptée dans le cadre du programme de recherche sur les conséquences éthiques, juridiques et sociales du Projet sur le génome humain, aux États-Unis. De même, l'Union européenne, les Pays-Bas, le Brésil et la Colombie ont lancé des travaux de recherche en sciences sociales sur les nanotechnologies, qu'ils ont reliés à la prise de décision (Barben et al., 2007). Une enquête récente réalisée par l'OCDE (2013) a permis de constater que 11 des 25 pays interrogés disposaient d'une politique relative au développement responsable des nanotechnologies, et que plusieurs autres étaient en train d'en élaborer une.

Des inconnues demeurent quant aux effets des nanoparticules sur la santé et l'environnement, ce qui continue d'alimenter l'inquiétude du public et des autorités de réglementation. Aujourd'hui, on trouve des nanomatériaux fabriqués dans plus de 1 300 produits commercialisés, dont du matériel médical, des tissus, des additifs pour carburants, des produits cosmétiques et des matières plastiques (US EPA, 2016). Les approches réglementaires continuent d'évoluer, alors même que les nanomatériaux entrent dans les flux de déchets. Dans un examen récent des travaux publiés sur le traitement des eaux usées (recyclage, incinération, mise en décharge et traitement des eaux usées), l'OCDE a mis en évidence un grave déficit d'information au sujet de l'élimination finale de ces nanomatériaux (OCDE, 2016a).

Les données massives

L'un des moteurs de la prochaine révolution de la production sera la numérisation, et il est possible que de larges corpus d'informations personnelles soient recueillis et utilisés dans les nouveaux processus de production. De vastes programmes gouvernementaux de collecte et d'exploitation des données massives à des fins de surveillance et de sécurité nationale soulèvent de grandes inquiétudes dans l'opinion, mais d'autres domaines sont aussi l'objet de vifs débats au sein de la population. Ainsi, les responsables des politiques de santé à travers le monde cherchent à regrouper diverses données de santé sur des millions de personnes pour permettre la recherche comparative sur l'efficacité des traitements et

faciliter la mise en place d'une architecture de données massives innovante pour la recherche et la découverte (Institute of Medicine, 2014). L'un des principaux objectifs est d'intégrer les données sanitaires générées à l'échelle de l'individu dans les secteurs public et privé afin d'étoffer la base de données probantes destinée aux soins cliniques, de suivre la qualité des données et de contribuer à la découverte de biomarqueurs permettant d'élaborer des diagnostics et des médicaments plus efficaces (Krumholz, 2014).

Les défis que pose l'intégration d'ensembles de données de santé et d'architectures de l'information hétérogènes sont d'ordre technique, éthique et social. Collecter des données de santé pour la recherche au sein des centres de soins jette un flou d'un type nouveau sur la frontière entre soins cliniques et recherche. La réalisation d'analyses prédictives pour stratifier les populations soulève des inquiétudes sur le plan de la justice, car ces analyses peuvent servir à inclure certaines populations dans des interventions thérapeutiques ou des essais cliniques intéressants ou, au contraire, à les en exclure. En outre, l'obtention du consentement éclairé habituel est impossible compte tenu du nombre et de l'ampleur des utilisations potentielles (Faden, Beauchamp et Kass, 2014). Au Royaume-Uni, l'absence de réponse aux interrogations relatives à la protection de la vie privée et à la confidentialité des données a déclenché une vaste polémique parmi les médecins cliniciens, et parmi des groupes de défense des malades et du grand public, ce qui a terni l'image des autorités nationales de la santé (Kirby, 2014). Les incertitudes sociales poussent de nombreux gouvernements à nouer des partenariats et à établir un dialogue public avec les patients, les établissements de santé et d'autres parties prenantes pour trouver des solutions acceptables aux questions relatives à la vie privée, au contrôle et à la justice. Dernièrement, les pays de l'OCDE se sont attaqués à certains problèmes soulevés par la gestion des données de santé dans leur *Recommandation du Conseil sur la gouvernance des données de santé* (OCDE, 2017).

L'intelligence artificielle

Les technologies de l'intelligence artificielle peuvent transformer la société, mais posent aussi divers problèmes éthiques, réglementaires et sociaux (États-Unis, 2016). Des assistants automatisés aux voitures sans conducteur, l'intelligence artificielle devrait croître rapidement. Ce point de vue est largement partagé par les ministères de la Science (G7, 2016). Certains regardent cette innovation avec optimisme : ses défenseurs font valoir qu'elle peut tout à la fois stimuler l'innovation et donner un coup de fouet à la productivité économique, voire, plus largement, améliorer la condition humaine. D'après les travaux de recherche de l'OCDE, « les données massives utilisées pour alimenter les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent stimuler les entreprises, notamment dans les domaines de la publicité, des soins de santé, des services d'utilité publique, de la logistique, du transport et de l'administration publique » (Bradbury, 2016). Cependant, il est manifeste que l'inquiétude quant aux risques, aux avantages et aux problèmes éthiques qui leur sont associés ne cesse de grandir. Le Professeur Stephen Hawking a déclaré, non sans provocation, que « le développement intégral de l'intelligence artificielle pourrait signifier la fin de la race humaine » (Cellan-Jones, 2014). Parmi les préoccupations du grand public, on trouve notamment la crainte de voir l'intelligence artificielle supplanter certaines catégories d'emploi (Smith et Anderson, 2014), ainsi que les questions de sécurité (Marks, 2016). Une enquête récente en Grande-Bretagne a permis de constater qu'une personne sur trois pensait que l'essor de l'intelligence artificielle constituait une menace pour l'humanité (British Science Association, 2016).

Dans un article paru en juin 2015 dans la revue *Nature* (Sarewitz, 2015), le Professeur Dan Sarewitz, spécialiste des politiques scientifiques, a appelé à un dialogue public mondial

éclairé sur l'intelligence artificielle et ses effets potentiels. Pour autant, aucun mécanisme solide de gestion des risques, des avantages et des problèmes éthiques n'a encore été institutionnalisé (Calo, 2014). Cela tient en partie au fait que l'intelligence artificielle est encore en cours de développement, et en partie au fait que l'étendue et la diversité des applications rendent difficile la mise en place d'un cadre réglementaire complet. De surcroît, certains considèrent avec scepticisme l'intervention des pouvoirs public dans ce domaine, arguant qu'il est trop tôt pour réglementer en la matière (McAfee, 2015) et que toute intervention pourrait entraver le développement technologique et les avantages potentiels pour la société (Brundage et Bryson, à paraître). D'autres pensent, au contraire, que la réglementation peut, en soi, favoriser l'innovation, et que l'intelligence artificielle a déjà une incidence sur notre vie quotidienne. À cette fin, le Bureau des politiques scientifiques et technologiques (Office of Science and Technology Policy) de la Maison Blanche et les parlements européen et britannique mènent, ou ont mené, des ateliers publics sur les technologies et les politiques relatives à ce domaine. D'aucuns ont préconisé la constitution de commissions nationales sur la robotique (Calo, 2014). Il est important de noter que de nombreux spécialistes ont demandé des fonds pour conduire les premières recherches sur les dimensions humaine et sociale des technologies de l'intelligence artificielle, parallèlement aux travaux de recherche technique. Gagner l'adhésion du public à la R-D en intelligence artificielle aura une importance critique pour l'avenir de cette discipline.

Comprendre l'adhésion du public

L'adhésion ou le rejet du public à l'égard de la technologie est un phénomène complexe, difficile à expliquer. On trouvera ci-après l'analyse de publications en sciences sociales et de pratiques existantes utiles pour proposer des stratégies permettant d'introduire la technologie dans la société de manière acceptable.

Perception du risque et sophisme du modèle de déficit public

Pendant un temps, on a pensé que la résistance du public à la technologie était principalement due à un manque d'information ou d'éducation. Cette théorie repose en partie sur des études classiques qui montrent une divergence dans la façon d'évaluer les risques selon que l'on est un profane ou un spécialiste (Slovic, 1987). Ces différences suivent un schéma et révèlent un biais en faveur de certaines caractéristiques technologiques. Les technologies considérées comme irréversibles, échappant à tout contrôle humain et/ou susceptibles de présenter des défaillances catastrophiques sont généralement perçues comme plus risquées par le grand public que par les spécialistes. De la même façon, le fait que les technologies soient nouvelles et moins bien connues, imperceptibles par l'homme (comme les nanoparticules, qui sont invisibles à l'œil nu) et que les nuisances engendrées se manifestent de manière différée tend à susciter une inquiétude plus forte dans la population (Slovic, 1987). Plusieurs technologies de la prochaine révolution de la production possèdent une partie de ces caractéristiques. Ainsi, les biotechnologies et les nanotechnologies font preuve d'une évolution rapide, ont des propriétés physiques nouvelles et les éléments qu'elles construisent sont souvent invisibles à l'œil nu.

Les études de ce type de perception du risque ont parfois conduit les pouvoirs publics à privilégier les campagnes d'éducation pour amener le public à adhérer aux technologies. Or, les examens de la corrélation entre éducation et adhésion aux technologies sont, au mieux, peu concluants. Sur les questions controversées, il n'y a absolument aucune corrélation et, selon les mots d'un spécialiste : « on trouve des citoyens bien informés et moins bien

informés des deux côtés de la controverse » (Bauer, 2009). Ce constat fait écho à d'autres travaux de sciences sociales qui montrent que lorsque des valeurs et des identités personnelles profondément ancrées sont en jeu, les rapports fondés sur la science sont rejetés même par les plus instruits. Ainsi, il est ressorti d'une vaste étude que les personnes croyantes, y compris celles qui possèdent le plus haut niveau de formation scientifique, réfutent généralement certains préceptes fondamentaux de l'évolution (Kahan, 2015).

L'éducation et l'information sont importantes pour façonner et encadrer le discours public sur la technologie, mais l'attitude des citoyens dépend fortement du contexte social et politique ainsi que de la culture de la confiance entre ces mêmes citoyens, les organismes de réglementation et les entreprises. On trouvera dans les sections qui suivent des éléments supplémentaires sur ce point.

Confiance accordée aux institutions

La résistance du public aux technologies nouvelles et la perte de confiance dans les autorités chargées de la réglementation sont étroitement liées. Dans une étude importante des facteurs contribuant à la mauvaise image des OGM dans l'opinion publique de nombreuses régions d'Europe, Gaskell et al. ont remarqué que « dans un monde de plus en plus complexe, la confiance fonctionne comme un substitut à la connaissance » (Gaskell et al., 1999). D'après ces auteurs, la résistance aux OGM en Europe est étroitement liée à un manque de confiance dans les procédures réglementaires.

Encadré 8.2. La consultation publique menée par la HFEA au sujet de la recherche sur l'ADN animal et les embryons : hybrides et remplacement mitochondrial

Au Royaume-Uni, la HFEA a été créée en 1990 pour autoriser/homologuer et surveiller la fécondation in vitro (FIV) et les centres d'insémination dans l'ensemble du pays, ainsi que les institutions dirigeant la recherche embryonnaire et le stockage de gamètes et d'embryons (Jasanoff, 2005). En 2007, elle a lancé une consultation publique pour chercher à établir si la population estimait que les scientifiques devaient être autorisés à créer des embryons contenant de l'ADN animal dans le cadre de leurs travaux de recherche embryonnaire (HFEA 2007 ; Blackburn-Starza, 2007). Le programme, intitulé *Hybrids and Chimeras* (Hybrides et chimères), a donné lieu à une consultation publique pour faciliter l'engagement du public et a été appuyé par Sciencewise, un programme mené par le Bureau de la science et de l'innovation (Office of Science and Innovation), qui a pour but d'aider les responsables des politiques à mener des activités visant à faire participer la population.

La consultation, qui s'est déroulée d'avril à juillet 2007, a pris diverses formes. Un sondage d'opinion a cherché à recueillir les points de vue d'un échantillon représentatif de la population. Des débats publics ont approfondi ces constatations générales et soulevé de nouvelles questions, insistant sur l'effet de la délibération et des nouvelles informations sur l'opinion des participants. Une consultation par écrit et une réunion publique ont également été organisées. Les résultats de la consultation publique ont été analysés comme en a attesté la HFEA, laquelle a ensuite décidé que la recherche sur les hybrides cytoplasmiques devrait être autorisée pour aller de l'avant, avec prudence et moyennant une surveillance attentive (HFEA, 2007).

Plus récemment, la HFEA a recueilli l'avis du public et soumis au Parlement une proposition préconisant d'autoriser le remplacement mitochondrial dans les embryons destinés à être implantés. Le Parlement a accepté la recommandation, avec un large soutien du public.

D'autres travaux sur la confiance dans la réglementation corroborent ce point. Dans les années 90 au Royaume-Uni, par exemple, une polémique publique a éclaté à propos de la mauvaise gestion de l'insécurité et des éventualités possibles par les autorités de réglementation lors de la crise de l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB ou maladie de la vache folle). De nombreux commentateurs estiment que cette crise, surtout la perte de confiance dans le système de contrôle de la sécurité sanitaire des aliments, est à l'origine de la forte résistance aux aliments OGM au Royaume-Uni, même après que ceux-ci ont été déclarés sûrs par les autorités chargées de la réglementation (Pidgeon, Kasperson et Slovic, 2003). Cet exemple montre qu'une fois la confiance perdue, il est difficile de la retrouver, même dans d'autres contextes.

À l'inverse, on pourrait citer l'exemple de l'adhésion à la médecine et à la technologie reproductive, toujours au Royaume-Uni, où une institution de réglementation spécialisée, l'Autorité pour la fertilisation et l'embryologie humaines (Human Fertilisation and Embryology Authority, HFEA), a été créée en 1990, avant l'arrivée de nombreuses avancées sujettes à controverse. La HFEA a réussi à anticiper les épineuses questions du contrôle, et a fait état des problèmes au grand jour (encadré 8.4). Les décisions qui en ont résulté concernant la recherche et les applications de la recherche en embryologie et la médecine reproductive ont emporté une large adhésion.

Le battage médiatique autour des technologies – l'exagération des avantages qu'elles procurent – peut miner la confiance dans les institutions gouvernementales et scientifiques. La mise en exergue de la nouveauté et des avantages à court terme peut entraîner de la déception et un certain scepticisme au sein de l'opinion (Rayner, 2004). Dans les domaines de la recherche sur les cellules souches et de leurs applications cliniques, par exemple, on a observé une tendance persistante à l'exagération des prévisions par les communautés scientifiques, les organismes de financement et les médias (Kamenova et Caulfield, 2015). Ce phénomène a attisé la polémique en Californie, où une initiative publique de 3 milliards de dollars sur la recherche sur les cellules souches amorcée en 2004 a permis d'obtenir des avancées scientifiques, mais n'est pas parvenue à procurer les avantages concrets pour la santé qui avaient été annoncés.

Valeurs et incertitudes relatives à la gouvernance du risque et aux avis scientifiques

L'une des clés pour renforcer la confiance dans les institutions réglementaires consiste à renforcer la confiance dans les approches et les procédures d'analyse sous-jacentes, parmi lesquelles l'analyse du rapport risques-avantages occupe une position centrale. Les spécialistes des sciences sociales ont tiré des enseignements des erreurs que les organismes pouvaient commettre en matière de prise de décision fondée sur le risque et d'avis scientifique.

Les organes de réglementation ou de conseil technique doivent être transparents sur la façon dont les incertitudes sont prises en compte et sur la manière dont les hypothèses fondées sur des valeurs sont intégrées dans la modélisation des risques/bénéfices. Des polémiques telles que celles qui ont entouré l'épidémie d'ESB mentionnée plus haut, ou la catastrophe de Fukushima au Japon, montrent qu'il est nécessaire, dans toutes les communautés d'experts et dans le grand public, de prendre davantage conscience des limites inhérentes aux modèles de risques et du fait que les décisions réglementaires fondées sur des connaissances scientifiques s'accompagnent inévitablement de jugements de valeur (Pfothner et al., 2012). Ceux-ci interviennent, par exemple dans le choix des faits ou des types d'expertise considérés comme pertinents pour déterminer à quel moment les éléments de preuve réunis sont suffisants, dans la méthode retenue pour gérer les avis divergents et dans les décisions d'agir malgré l'incertitude.

Encadré 8.3. **Le choix des valeurs dans le domaine du conseil scientifique et technologique : exemples et enseignements tirés de l'expérience**

Des travaux de recherche portant sur les études scientifiques et technologiques ont décrit l'interaction de la science et des valeurs dans les décisions, à l'intersection de la science et de l'action publique. En particulier, ils ont fait la preuve d'un processus de délimitation là où la science et la société se rencontrent, parfois appelé « travail sur les limites ». Le travail sur les limites peut se définir comme une méthode permettant de distinguer, d'un côté, les connaissances utiles pour l'action publique et, de l'autre, la pseudo-science, la politique ou les valeurs. C'est un processus de délimitation par lequel les décisions des pouvoirs publics portant sur les éléments probants à retenir se trouvent du côté étiqueté « bonne science » de la fracture entre connaissance objective et science illégitime, politisée ou fausse (Jasanoff, 1990).

Le travail sur les limites est jugé nécessaire pour atteindre deux objectifs au moins : veiller à ce que la recherche réponde aux besoins des utilisateurs (souvent les responsables de l'élaboration des politiques) et préserver la crédibilité de la science proprement dite. Comme excellent exemple de ce type de travail, on pourrait citer les tentatives des pouvoirs publics pour établir une distinction nette entre évaluation des risques et gestion des risques, les facteurs sociaux et économiques n'intervenant qu'en phase de gestion. Cette distinction occupe également une place prépondérante dans le droit international du commerce, et dans la façon dont celui-ci reconnaît les formes valides ou non de règlement sur la santé et la sécurité sanitaire des végétaux (Winickoff et al., 2005). Elle se retrouve aussi dans la réglementation sur les substances chimiques cancérigènes : il est souvent impossible d'établir un risque pour les humains à partir de preuves directes, si bien que les décisions réglementaires reposent dans bien des cas sur des essais sur l'animal, par exemple, qui sont interprétés avec une grande part d'incertitude et pas mal de divergences, même au sein des cercles d'experts. Résultat, l'issue de la controverse quant à la nécessité de réglementer certains composés chimiques dépend au moins autant des procédures et institutions utilisées pour résoudre les conflits que des objectifs de la science proprement dite (Jasanoff, 1990).

L'existence, dans la politique scientifique, de différends fondés sur des valeurs ne remet pas en cause la validité des évaluations de la technologie : elle plaide plutôt en faveur d'une gestion active des limites par les institutions chargées de régir le risque technologique, et indique que les appels à la seule objectivité scientifique n'ont guère de chances d'apaiser les inquiétudes qu'inspirent les technologies émergentes.

Dernièrement, les pays ont reconnu l'importance de l'ouverture, de l'intégrité, de la transparence et de la redevabilité pour parvenir à des avis scientifiques crédibles (OCDE, 2015). Ainsi, au lieu de formuler les questions appelant un avis scientifique dans des termes exclusivement technocratiques, les pays ont commencé à ouvrir le processus pour le rendre plus inclusif et ont procédé de manière plus scrupuleuse pour décrire les incertitudes et déterminer les questions auxquelles la science ne peut pas répondre à elle seule. Aux États-Unis, une étape a été franchie dans les années 80 quand les militants luttant contre le syndrome de l'immunodéficience acquise (SIDA) ont acquis les connaissances techniques et la stature politique nécessaires pour participer à des groupes d'experts chargés de trancher des questions telles que les critères scientifiques à remplir pour prendre part aux tests cliniques (Epstein, 1996). Depuis lors, des groupes de patients, « spécialistes non professionnels » de leur domaine, sont souvent associés aux groupes de travail sur les politiques de santé. En outre, les questions de politique générale sont de plus en plus souvent élaborées et formulées au sein d'instances multipartites (OCDE, 2015).

Le document OCDE (2015) décrit comment certains organismes scientifiques consultatifs ont adopté de nouvelles procédures et pratiques susceptibles de contribuer à limiter les polémiques autour des avis scientifiques et à renforcer la confiance du public dans les systèmes consultatifs. Ces procédures et pratiques sont les suivantes :

- **Clarification des responsabilités.** Si on leur demande de traiter une question, les organismes consultatifs doivent s'assurer que cette tâche est compatible avec leur mandat et leurs compétences techniques.
- **Renforcement de la transparence.** Les conflits d'intérêts potentiels ou avérés sont à l'origine d'une grande partie de la perte de confiance des citoyens dans les structures en place et les politiques fondées sur la science. Il est probable que les experts auront eu des contacts, et souvent des relations contractuelles, avec un certain nombre des parties prenantes concernées par les questions qu'ils ont à examiner. Il est donc nécessaire d'améliorer et de normaliser la définition des « intérêts » en jeu et d'établir des règles transparentes de détermination de ces intérêts.
- **Consultation des parties prenantes.** On entend généralement par parties prenantes les personnes physiques ou morales susceptibles d'être concernées par les décisions prises à la suite d'avis scientifiques, ce qui peut comprendre des personnes ayant des intérêts économiques en jeu et des groupements de la société civile (ONG, syndicats, organisations de patients, etc.). Pour prendre en compte les effets potentiels de leurs avis, un nombre croissant d'organismes consultatifs intègrent une forme ou une autre de consultation des parties prenantes, en parallèle des évaluations classiques menées par leurs experts.
- **Participation directe de la société civile.** Certains organismes consultatifs sont allés un peu plus loin et ont intégré dans leur comité d'experts des représentants de la société civile, parmi lesquels des groupes de parties prenantes (organisations professionnelles, associations de consommateurs) et des non-spécialistes. Certains craignent que la participation de non-scientifiques à des comités scientifiques consultatifs ne nuise à la qualité des avis, mais on a pu noter, dans nombre de cas, que ces personnes avaient acquis un niveau de connaissance suffisant pour bien comprendre les enjeux.
- **Information du public et communication ouverte.** Pour communiquer des avis scientifiques en associant plus pleinement la société, les organismes scientifiques consultatifs vont devoir faire un usage plus efficace des médias sociaux.

Diversité des méthodes de réglementation selon les pays

Il n'existe pas de méthode universelle pour mettre en place un système solide et crédible de conseil technique et de surveillance réglementaire. En fin de compte, les sociétés diffèrent dans la façon dont elles prennent leurs décisions fondées sur le risque et dont elles fournissent au public des justifications en matière de science et de technologie (Jasanoff, 2005). Un important corpus de travaux en sciences sociales comparant les processus de prise de décision fondée sur le risque, dans plusieurs systèmes politiques nationaux, montre comment des différences dans la formulation des enjeux et la politique scientifique peuvent conduire à des différences systématiques dans l'évaluation de la santé, de la sécurité et du risque environnemental selon les pays. Malgré ces différences, il est clair que, dans de nombreux pays, la transparence renforce la crédibilité en règle générale.

Jeter les bases d'une adhésion du public

Des décennies de travaux en sociologie de la technologie ont montré que la trajectoire du développement technologique n'est pas gravée dans le marbre ni prédéterminée, mais peut dépendre de facteurs humains au niveau des individus ou de l'action publique, ainsi que d'événements historiques (Bijker, Pinch et Hughes, 2012). Il est vrai que la transformation du système de production entraînera un grand nombre de choix de recherche et de choix technologiques pertinents possibles, qui seront faits de manière non coordonnée par des personnes allant du personnel des organismes de financement aux entrepreneurs et aux travailleurs, en passant par les responsables des institutions qui soutiennent l'innovation. Mais il est vrai aussi que les stratégies et les investissements nationaux auront une influence sur la direction du changement technologique. La stratégie et la politique en matière d'innovation peuvent-elles s'attaquer à la question de l'adhésion du public dès le début ? La présente section passe en revue un certain nombre de stratégies et de mécanismes qui pourraient contribuer à créer les conditions de cette adhésion selon le besoin.

Prospective

Les technologies entrant dans la prochaine révolution de la production, des biotechnologies industrielles à l'impression 3D, semblent prêtes à transformer les marchés et, potentiellement et plus largement, les sociétés. Il est clair toutefois que plusieurs avènements sont possibles. Si l'un des objectifs de l'action publique est de renforcer l'adhésion du public aux technologies de la prochaine révolution de la production, une des premières étapes consiste à coup sûr à entreprendre des activités de prospective pour déceler les tendances dans les domaines innovants, et à veiller à la coordination, autant que possible, pour atteindre une série de résultats optimaux sur le plan social. Les exercices de prospective ne peuvent pas prédire l'avenir, mais ils peuvent aider à déterminer et à évaluer de manière systématique et transparente les facteurs sociaux, technologiques, économiques, environnementaux et politiques qui, à tel ou tel égard, auront une incidence sur l'avenir (voir le chapitre 9). Bien conçues, les politiques d'innovation peuvent aider à orienter les trajectoires technologiques vers les objectifs convenus, comme la transition énergétique à grande échelle ou certaines visions de la médecine et de la santé humaine. L'un des avantages qu'il y a à entreprendre des activités de prospective tient aux processus adoptés, notamment le renforcement des réseaux de parties prenantes et de l'adhésion du public aux technologies.

Comme exemples de processus prospectifs, on pourrait citer l'élaboration de feuille de route technologique, l'utilisation de données bibliométriques et de données sur les brevets pour réfléchir sur l'avenir de la technologie et la sollicitation d'experts. Dans le domaine des nanotechnologies, par exemple, le Conseil de la recherche économique et sociale (Economic and Social Research Council, ESRC) du Royaume-Uni a commandé plusieurs scénarios de convergence des technologies afin d'éclairer sa stratégie de recherche (Barben et al., 2007). Il sera important de dessiner les grandes lignes des évolutions technologiques possibles pour mieux en comprendre les répercussions sociales et pour définir les moyens de gagner l'adhésion du public pendant le processus d'innovation. Certains travaux visant à institutionnaliser cette réflexion à plus long terme sur les politiques sont en cours. Ainsi, en Allemagne, le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie et celui de l'Éducation et de la Recherche ont créé un organisme de coordination afin de réunir les parties prenantes autour de l'évaluation d'une stratégie à long terme pour l'avenir du secteur.

Évaluation participative de la technologie

Un autre mécanisme visant à comprendre et renforcer l'adhésion du public aux technologies consiste à mettre en place des processus d'évaluation sociétale de la technologie. Apparue dans les années 60, l'évaluation de la technologie a été adoptée progressivement dans de nombreux pays et a évolué au fil du temps à partir des enseignements tirés de l'expérience. Dans de nombreux pays de l'OCDE, la politique d'innovation est aujourd'hui guidée par une forme ou une autre d'évaluation sociétale de la technologie réalisée par divers acteurs, parmi lesquels on retrouve des comités d'éthique nationaux ainsi que d'autres organismes publics chargés d'évaluer, dans une perspective large, les risques liés aux effets sociaux, à la santé et à la sécurité. Certaines de ces évaluations sont ouvertes à un plus grand éventail de participants et comprennent des procédures permettant aux parties prenantes et au grand public d'apporter leur contribution (Durant, 1999).

Ce vaste ensemble de processus d'évaluation sociétale de la technologie repose notamment sur une analyse formelle des risques, mais peut également embrasser les conséquences sociales à plus long terme de l'adoption de la technologie, parfois difficiles à réduire aux risques immédiats en matière de santé et de sécurité. Les questions à examiner portent sur la répartition des avantages et des coûts potentiels, sur les conséquences de la propriété intellectuelle dans le domaine, sur la possibilité que certaines trajectoires apportent un plus grand avantage social et sur les sources d'incertitude dans l'évaluation de la technologie. Ces processus doivent aussi prendre en compte les bénéfices potentiels de l'innovation.

De façon générale, on est passé de formes d'évaluation plutôt fondées sur le travail des experts à des modèles plus participatifs (voir ci-après). Née des polémiques autour de technologies telles que l'énergie nucléaire, aux États-Unis, l'évaluation de la technologie s'est d'abord concentrée sur l'apport de connaissances objectives et probabilistes concernant les trajectoires futures des technologies émergentes. Avec le temps, on s'est rendu compte que les hypothèses retenues lors de l'identification du cadre (définition des problèmes, champ d'action et méthodes, par exemple) façonnaient les conclusions de l'évaluation de la technologie (Ely, van Zwanenberg et Stirling, 2011). En particulier, l'importance exagérée accordée aux conséquences techniques pouvait occulter des questions cruciales liées aux incidences sociales, éthiques et politiques des technologies. Pour ces raisons, les pays ont commencé à adopter des formes plus inclusives, ouvertes et délibératives d'évaluation de la technologie.

Certains mécanismes de cette évaluation font intervenir des procédures publiques formelles qui alimentent directement les décisions d'action publique et de gouvernance en matière d'innovation, en particulier à travers des organismes consultatifs d'experts. L'une des méthodes consiste à faire appel aux académies scientifiques ou aux autorités de réglementation pour évaluer les aspects les plus techniques des technologies émergentes. Il est également possible de créer des organismes consultatifs publics. Entre autres exemples de ces approches, on citera la Fondation du Conseil danois de la technologie, le Conseil Nuffield de la bioéthique (Nuffield Council on Bioethics) au Royaume-Uni et les comités présidentiels de bioéthique aux États-Unis. Des groupes de ce type pourraient être chargés de rédiger des rapports sur des technologies particulières, lesquels rassembleraient des données probantes au moyen de travaux de recherche et de témoignages de la population et pourraient éclairer la justification publique. Des enquêtes publiques et des entretiens avec

les parties prenantes sur les technologies émergentes pourraient servir à évaluer les technologies et à jauger l'opinion à un moment donné. Des auditions visant à recueillir des éléments d'information auprès de publics divers pourraient aussi être utilisées pour éclairer les autorités de réglementation.

Comme on l'a vu plus haut, les initiatives récentes d'évaluation de la technologie ont pris une forme plus participative. Ces approches portent différents noms : « évaluation constructive de la technologie » (Schot et Rip, 1996), « évaluation participative de la technologie » (Guston et Sarewitz, 2002) ou « évaluation en temps réel de la technologie », pour ne citer que ces quelques exemples. Elles soulignent l'intérêt d'associer les citoyens et les parties prenantes à l'analyse des spécialistes pour aboutir à une évaluation efficace. L'une des raisons de cette évolution est qu'étant donné que, par nature, l'évaluation de la technologie n'échappe pas aux jugements de valeurs, il paraît nécessaire que les citoyens fassent entendre leur voix dans ces processus. En outre, il est de plus en plus souvent admis que les non-spécialistes et autres parties prenantes possèdent des connaissances utiles à cette évaluation, qui ne seraient pas prises en compte autrement. Les risques toxicologiques en sont un bon exemple. Les personnes qui utilisent des substances potentiellement toxiques sur leur lieu de travail sont les mieux placées pour expliquer, par exemple, comment naissent les risques d'exposition dans certains endroits, compte tenu des habitudes de travail. Pour donner un autre exemple évident, toute évaluation des risques liés aux pesticides devrait prendre en considération les pratiques quotidiennes des personnes qui travaillent dans les champs, en cherchant à déterminer, par exemple, si elles ont l'habitude de porter des vêtements de protection.

Les modes plus participatifs d'évaluation de la technologie tiennent compte du fait que le public a plus de chances d'accepter des évaluations auxquelles il a participé et que, selon toute probabilité, les résultats de ces évaluations seront plus fiables si diverses parties prenantes y ont été associées. Ces approches pourraient comprendre des éléments comme une cartographie sociotechnique, qui combine l'analyse des parties prenantes avec la représentation graphique des innovations techniques récentes ; une expérimentation précoce pour déterminer et gérer les effets non prévus ; un renforcement du dialogue entre le public et les innovateurs ; des sondages d'opinion menés auprès du public ; des groupes de discussion ; et l'élaboration de scénarios (Guston et Sarewitz, 2002).

Encadré 8.4. **Ateliers autour de scénarios aux fins d'évaluation de la technologie**

Atelier Parliaments and Civil Society in Technology Assessment (PACITA, Les parlements et la société civile dans l'évaluation de la technologie) : scénarios élaborés pour la Norvège, le Danemark, l'Autriche, la Bulgarie, la Catalogne (Espagne), la Wallonie (Belgique), la République tchèque, l'Irlande et la Hongrie.

Comme il est expliqué dans la Déclaration de Lund (une déclaration européenne concluant que la recherche européenne devrait être axée sur les grands problèmes et servir avant tout à relever les grands défis de la société), on considère que la gestion du vieillissement de la société est un problème central en Europe. On qualifie de « double défi démographique » le fait que la population vieillissante a de plus en plus besoin de services de santé alors que la population active diminue. Les nouvelles technologies seront donc importantes pour assurer les soins de santé dans l'Union européenne.

Encadré 8.4. **Ateliers autour de scénarios aux fins d'évaluation de la technologie** (suite)

Pour tenir compte des défis et possibilités associés à diverses technologies (maisons intelligentes, appareils de localisation et robots, par exemple) et pour fournir aux responsables de l'élaboration des politiques plusieurs options d'action, l'Union européenne a élaboré un projet qui a réuni des parties prenantes et divers publics dans des ateliers organisés autour de scénarios et qui a abouti à un rapport d'orientation.

Un groupe de parties prenantes a été constitué en regroupant des spécialistes d'horizon divers. Des descriptions de technologies et un aperçu des évolutions futures possibles ont été réunis, et un ensemble de scénarios relatifs à l'utilisation potentielle de ces technologies dans une société vieillissante ont été élaborés. Des ateliers ont ensuite été organisés autour de ces scénarios dans les pays mentionnés plus haut afin d'examiner les similitudes et les différences en Europe dans les attentes et les préférences relatives aux défis technologiques en question. Chaque atelier a réuni des parties prenantes, patients et usagers, chercheurs et développeurs de technologies, et décideurs intervenant à plusieurs niveaux de responsabilité. Les observations, les réponses d'ordre général, les problèmes et les idées ont été recueillis lors de ces ateliers délibératifs, enregistrés et communiqués aux responsables de l'élaboration des politiques.

Participation de la population et débat public

Il est de plus en plus largement admis que, parallèlement aux processus formels d'évaluation de la technologie, la participation des parties prenantes et de la population sur la question des enjeux de la science, de la technologie et de l'innovation est un élément essentiel pour aboutir à des politiques robustes en matière de science et d'innovation. Dans leur étude de l'adhésion aux technologies des énergies renouvelables, Reith et al. (2013) ont relevé trois interventions susceptibles d'améliorer l'adhésion de la société aux technologies émergentes : fournir une meilleure information au public (publicité, journaux, sites web et excursions sur site, par exemple), renforcer la coopération et la participation (aux processus décisionnels et aux arrangements financiers) et consulter la population et l'associer à l'action (réunions et dialogues publics, par exemple). Ces approches sont prometteuses pour l'analyse et la mise en œuvre d'autres technologies émergentes (Reith et al., 2013).

La participation du public pourrait se définir comme « un processus participatif à travers lequel les membres de divers publics expriment leurs opinions et leurs préoccupations, et font part de leurs recommandations sur une question technoscientifique. Ces initiatives font du public non pas un receveur passif de connaissances spécialisées, mais un acteur important façonnant les technologies et leurs trajectoires » (Winickoff, Flegal et Asrat, 2015). Les mécanismes de participation du public vont de la consultation (à l'aide d'enquêtes, par exemple) à des initiatives davantage axées sur le dialogue (consultations citoyennes, évaluation participative de la technologie). La participation du public peut aider à orienter la science et l'innovation vers des objectifs socialement souhaitables, à renforcer le bagage scientifique des citoyens ainsi que leur soutien et leur implication, et à élargir l'éventail des possibilités envisagées dans le développement et la conduite des travaux de recherche.

Les différentes justifications d'une plus grande participation du public à la science et à la technologie peuvent être examinées utilement sous trois angles : normatif, instrumentaliste et essentiel (Fiorino 1990 ; Stirling, 2007). Sur le plan normatif, on peut arguer que la gouvernance de la science et de l'innovation sans participation réelle des

parties intéressées est contraire aux idéaux de la démocratie. Les citoyens doivent avoir la possibilité de dire si et en quoi la science et la technologie ont une incidence sur leur vie. L'argument instrumentaliste s'intéresse à l'adhésion du public à la science et à la technologie : associer d'emblée le public aux mesures sujettes à controverses peut éviter une levée de boucliers et renforcer la confiance entre les scientifiques et les non-experts. Enfin, l'argument essentiel fait valoir que la participation du public, et en particulier la prise en compte des points de vue de non-spécialistes, peut améliorer la qualité et la pertinence des connaissances produites, ainsi que l'utilité des technologies.

La « participation du public » à l'élaboration des politiques d'innovation comprend souvent un large éventail d'instruments. On trouvera au tableau 8.1 une typologie des mécanismes de participation tirés de Rowe (2005), exemples à l'appui. L'une des formes de participation pourrait être qualifiée de « communication » et englobe des instruments qui transmettent l'information, des responsables de l'élaboration des politiques (ou autres promoteurs des technologies) au public. Dans ces initiatives, l'information circule dans un seul sens. Pour autant, une communication bien conçue peut avoir des effets considérables en faveur d'une innovation responsable, notamment parce que la transparence contribue à renforcer la confiance du public dans les avis scientifiques. Une communication pertinente peut prendre diverses formes : plans de recherche stratégique rendus accessibles au public, soit sur papier, soit en ligne ; ou stratégie « science ouverte », qui désigne « une approche de la recherche reposant, premièrement, sur un accès plus facile aux données issues de la recherche publique, rendu possible par les outils et plateformes des TIC ; deuxièmement, sur une collaboration élargie dans les domaines scientifiques, ce qui inclut la participation de non-scientifiques ; et, troisièmement, sur l'emploi d'outils non traditionnels de gestion du droit d'auteur pour diffuser les résultats de la recherche » (OCDE, 2016b).

Tableau 8.1. Typologie des mécanismes de participation du public et exemples de politiques nationales

Principales caractéristiques des politiques		Principaux instruments d'action	Exemples de politiques nationales
Communication	Information en ligne	Publication de plans de recherche/mesures de réglementation sur un site web accessible au public	Plates-formes électroniques publiques (Lituanie) ; bulletin d'information public (Pologne)
	Science ouverte	Accès libre à la recherche universitaire	Scientific Electronic Library Online (Afrique du Sud) ; Déclaration d'Ankara sur l'accès libre et Comité national de la science ouverte (Turquie)
Consultation	Contribution du public à l'établissement de l'ordre du jour	Enquêtes, retour d'informations en ligne, remontée d'informations, etc.	Programme Idées pour le changement (Colombie) ; feuilles de route de la technologie (Turquie) ; programme national de recherche (Pays-Bas) ; <i>Argentina Innovadora 2020</i> (Argentine) ; <i>The Great New Zealand Science Project</i>
Participation	Gouvernance anticipative	Activités de prospective concernant l'évaluation de la technologie	PACITA (République tchèque) ; processus de prospective BMBF (Allemagne)
	Dialogue sur les priorités de la recherche	Ateliers publics visant à déterminer les grandes questions de société	Dialogue sur les technologies futures (Allemagne) ; catalogue INNO+ (Danemark)
	Science citoyenne		Centre autrichien de science citoyenne

La participation peut aussi prendre la forme d'une « consultation publique », dans le cadre de laquelle les responsables de l'élaboration des politiques (ou d'autres promoteurs des technologies) entreprennent de recueillir des éléments de compréhension auprès du public. La consultation publique ne comprend généralement pas de dialogue formel entre le public et les responsables. Néanmoins, les informations sollicitées par ces derniers

auprès de la population peuvent aider à guider des activités d'innovation socialement responsables. Entre autres exemples de consultations publiques, on citera la sollicitation formelle de l'avis de la population concernant les priorités de la recherche ou la conduite d'enquêtes d'opinion, sur la science et la technologie par exemple.

Contrairement aux formes de participation susmentionnées, la « participation du public » comprend un dialogue formel entre les responsables de l'élaboration des politiques et la population. Le débat est primordial dans les initiatives participatives. Experts et non-spécialistes s'échangent des informations, ce qui peut faciliter l'apprentissage mutuel, voire l'évolution des opinions tant des responsables que des membres du public participant aux discussions. Les méthodes participatives d'évaluation de la technologie sont un exemple de participation du public.

La tendance croissante à l'adoption de mécanismes de participation du public dans les politiques d'innovation porte à croire que ces mécanismes sont jugés bénéfiques par les pays. Leur mise en œuvre effective se heurte toutefois à certains problèmes. Premièrement, il peut être difficile de réunir des publics représentatifs pour ce type d'exercice. Certains processus participatifs ne sont considérés comme légitimes que par les publics qui y prennent part directement. Ce phénomène a été qualifié de « problème fondamental d'échelle » (Löfbrand et al., 2015 ; Stilgoe, Lock et Wilsdon, 2014) et souligne la nécessité d'envisager les opérations de participation comme un élément parmi d'autres d'une politique d'innovation plus responsable. L'une des autres difficultés est de faire en sorte que les politiques de la science, de la technologie et de l'innovation (STI) tiennent compte des résultats des opérations de participation du public. Il y a un risque que le manque de participation du public ne complique la tenue d'un véritable débat, et contribue au contraire à légitimer les politiques en place. En outre, cette participation a d'autant plus de chances d'avoir un effet que les technologies en sont à un stade plus « en amont » ou ne sont pas encore verrouillées (Collingridge, 1980). Autrement dit, la participation du public sera particulièrement efficace dans le cas de technologies émergentes, mais pourra s'avérer plus délicate pour des technologies déjà bien ancrées.

Le programme de traitement des déchets nucléaires de la Suède offre un bon exemple de processus délibératif ayant réussi à réduire les fractures entre experts et profanes pour aboutir à une décision socialement acceptable concernant l'avenir d'une technologie. Dans les années 2000, en réponse aux préoccupations sociales causées par le choix d'un site de stockage des déchets nucléaires, les autorités suédoises ont constitué et présenté un « dossier sécurité » en en faisant un outil majeur pour susciter le débat public sur le sujet, et le processus a abouti à une installation agréée et approuvée par le public (Long et Scott, 2013 ; Société nucléaire européenne, 2009). Les documents réunis dans le dossier comportaient des arguments techniques, exprimés dans des termes accessibles aux non-spécialistes, expliquant pourquoi le site proposé était considéré comme sûr. Ils décrivaient clairement en quoi les informations utilisées dans le dossier étaient jugées de qualité. Ils décrivaient aussi ce que l'on prévoyait de faire pour améliorer la compréhension, les résultats attendus de ces initiatives et les progrès que les précédentes initiatives visant à faciliter la compréhension avaient permis d'obtenir. Lors d'une réunion de suivi, les résultats d'expérimentations récentes ont été comparés aux résultats qui avaient été prédits. Au fil du temps, la transparence de ce processus a permis à chacun de comprendre de plus en plus finement comment il fonctionnait (Long et Scott, 2013).

L'expérience en matière d'innovation dans la santé montre comment les patients, les participants à la recherche et le public non-expert, s'ils sont consultés au cours de la R-D,

peuvent favoriser l'innovation et l'orienter vers des besoins réels. Dans le domaine des maladies rares, par exemple, les organisations de défense des malades ont organisé leurs propres banques biologiques, recruté des chercheurs pour travailler sur leurs maladies, co-inventé des outils d'intervention et joué un rôle consultatif clé dans la conception des systèmes d'éthique de la recherche applicables aux essais cliniques.

Intégration en amont des questions éthiques, juridiques et sociales

Les préoccupations sociales potentielles et la question de l'adhésion du public ne doivent pas être laissées pour la toute fin du processus de développement des technologies. On admet de plus en plus souvent qu'il est essentiel de prendre ces questions en compte dans les décisions de financement de la recherche, la pratique de la science et le développement et la commercialisation des technologies. Comment peut-on procéder ?

La première génération d'approches visant à intégrer les préoccupations sociales plus larges dans le développement et l'évaluation de la technologie consistait à s'intéresser aux enjeux éthiques, juridiques et sociaux. Depuis le Projet sur le génome humain, au début des années 90, les mécènes de la science, dans de nombreux pays de l'OCDE, ont tenté de prendre ces enjeux en considération. Les responsables de la planification de ce projet, conscients que la cartographie et le séquençage du génome humain allaient avoir des conséquences majeures pour les individus, les familles et les sociétés, ont décidé de consacrer plus de 3 % de leur budget à l'étude de ses répercussions éthiques, juridiques et sociales. Dans le domaine des nanotechnologies, 2,4 % des fonds alloués au titre de la *National Nanotechnology Initiative*, aux États-Unis ont été consacrés à la recherche sur les enjeux éthiques, juridiques et sociaux, et aux Pays-Bas, 25 % du programme national de recherche sur les nanotechnologies sont allés à la recherche sur le risque et à l'évaluation de la technologie (OCDE, 2013). Cette démarche a fait école et nombreux sont les pays, notamment les pays de l'OCDE, qui se sont efforcés d'intégrer des travaux en sciences sociales et humaines dans les flux de financement.

De nouveaux mécanismes cherchent à intégrer les considérations sociales non pas en bout de chaîne, mais au cours du développement des technologies, afin de soutenir l'innovation au lieu de la freiner. Parmi les exemples d'approches globales de ce type on citera l'*US National Nanotechnology Initiative* et le programme Horizon 2020 de la Commission européenne (encadré 8.5).

Encadré 8.5. Gouvernance anticipative

La *US National Nanotechnology Initiative* (NNI), lancée en 2003, gère un budget de recherche de plus de 1 milliard USD par an. Elle met l'accent sur la nécessité d'une commercialisation au service de la compétitivité d'une part et d'une meilleure compréhension des répercussions sociétales d'autre part. Elle a donné lieu à la création de deux centres pour enquêter sur les « nanotechnologies dans la société ». Ces centres ont élaboré une approche de « gouvernance anticipative » qui vise à renforcer la capacité de la société à prendre part aux innovations dans le domaine des nanotechnologies. La gouvernance anticipative comprend au moins trois composantes et tend à réaliser les objectifs suivants :

- Prise en compte des valeurs humaines dans le débat autour de la technologie, souvent à travers la participation directe des parties prenantes et du public. Aux États-Unis, le réseau de formation scientifique informelle à l'échelle nanométrique (*Nanoscale Informal Science Education*, NISE) a fait de la participation du public l'un de ses principaux thèmes.

Encadré 8.5. **Gouvernance anticipative** (suite)

- Élaboration de scénarios et prospective pour aider à comprendre les dimensions sociales du changement scientifique et technique. Entre autres exemples de programme, on citera le programme *Scenarios of Converging Technologies* (Scénarios sur les technologies convergentes) à l'université d'Oxford et l'initiative d'élaboration de scénarios en accès libre menée dans le cadre du projet NanoFutures dans les centres sur les nanotechnologies et la société.
- Intégration de la participation et de la prospective dans les travaux scientifiques et techniques pour accroître la capacité des spécialistes des sciences naturelles à appréhender les aspects sociétaux de leur travail, et pour donner aux spécialistes des sciences sociales des perspectives plus claires sur les technologies de pointe (Guston, 2008).

Dans le prolongement des mesures évoquées plus haut – de l'examen des enjeux éthiques, juridiques et sociaux au débat public en passant par l'évaluation de la technologie –, une attention accrue a été accordée à la recherche et à l'innovation responsables (RRI) dans le cadre d'action de l'Union européenne. La notion de RRI combine plusieurs éléments : évaluation en amont, participation du public, accès libre, égalité entre les sexes, formation scientifique, éthique et gouvernance. Elle vise à élargir les questions relatives à l'innovation scientifique et technologique, à anticiper leurs conséquences et à associer la société au débat sur la façon dont la science et la technologie peuvent répondre aux préoccupations et aux objectifs sociétaux. Les RRI – le concept et l'ensemble d'outils – ont considérablement évolué depuis leur introduction dans le discours politique de l'Union européenne en 2011.

Encadré 8.6. **Comprendre la notion de recherche et d'innovation responsables (RRI)**

La définition d'une recherche et d'une innovation responsables varie selon les administrations et les cercles universitaires, et traite ce concept différemment, comme une stratégie de gouvernance, un cadre d'action et un processus. Les principales définitions sont les suivantes :

- Approche anticipant et évaluant les répercussions potentielles et les attentes de la société concernant la recherche et l'innovation, dans le but de favoriser la conception d'une recherche et d'une innovation inclusives et durables. Cette définition implique que les acteurs sociaux (chercheurs, citoyens, responsables de l'élaboration des politiques, entreprises et organisations du secteur associatif) travaillent ensemble tout au long du processus de recherche et d'innovation afin de mieux harmoniser le processus et ses résultats avec les valeurs, les besoins et les attentes de la société (CE, 2017).
- Cadre d'action dans le domaine des sciences, visant à importer des valeurs sociales générales dans les processus d'innovation technologique tout en étayant la prise de décision institutionnelle dans des conditions d'incertitude et d'ambiguïté. À cet égard, la recherche et l'innovation responsables recentrent la gouvernance technologique, des débats classiques sur les risques vers des discussions sur une gestion éthique de l'innovation (Schroeder et Ladikas, 2015).
- Processus transparent et interactif par lequel les acteurs sociaux et les innovateurs deviennent mutuellement réceptifs les uns aux autres, dans le but de parvenir à une acceptabilité (éthique), une durabilité et une désirabilité sociale du processus d'innovation et de ses produits commercialisables (pour permettre une bonne intégration des avancées technologiques dans notre société) (Schomberg, 2013).

L'une des idées maîtresses des RRI est le désir de « relier la pratique actuelle de la recherche et de l'innovation à l'avenir qu'elle promet et qu'elle contribue à façonner » (Owen, Bessant et Heintz, 2013). « La prédiction est impossible », comme l'a déclaré un universitaire, « mais l'anticipation d'avenirs possibles et pluriels est vitale » (Stilgoe, Bessant et Heintz, 2013).

Les RRI ne sont pas considérées comme une stratégie de mise en œuvre de mesures de responsabilité, de redevabilité, de renforcement de la réglementation ou d'une autre forme d'examen éthique. En revanche, les parties prenantes sont encouragées à étudier collectivement les moyens de faire avancer les objectifs sociétaux grâce à la technologie, en prenant en considération toute la palette d'implications morales, éthiques, juridiques et sociales de la recherche et de l'innovation (Owen et al., 2013). Dans le cadre du programme Horizon 2020 de l'Union européenne, les RRI sont une mesure essentielle pour atteindre l'objectif « Science avec et pour la société » de la Commission européenne. Les gouvernements doivent s'assurer que les politiques, les cadres réglementaires et les initiatives de financement intègrent les principes de RRI afin de concrétiser les promesses de solutions intelligentes, inclusives et durables aux problèmes sociaux examinés dans ce que l'on appelle la Déclaration de Rome (CE, 2014b).

Conclusion

La transformation en cours du système de production entraînera un grand nombre de choix en matière de recherche et de technologie dans l'ensemble des chaînes de valeur et des secteurs. Toutefois, les stratégies et les investissements nationaux peuvent et vont exercer une profonde influence sur l'orientation du changement technologique. Concernant l'adhésion du public, il existe d'importants précédents technologiques dont les responsables de l'élaboration des politiques, les entreprises et la société doivent tenir compte. Le cas des biotechnologies semble indiquer que les efforts déployés par les pouvoirs publics pour répondre aux inquiétudes de la population liées aux technologies de la prochaine révolution de la production en s'intéressant surtout aux risques physiques immédiats et non aux préoccupations sociales à plus long terme pourraient poser problème. Dans le cas des nanotechnologies, les mécènes de la science ont investi dans les sciences sociales et dans la concertation par la création de centres sur les nanotechnologies et la société, et la résistance du public a été faible. Les données massives et l'intelligence artificielle sont des domaines dans lesquels le dialogue social a vraiment été engagé, mais pour lesquels il existe peu de lieux institutionnalisés de communication et d'apprentissage.

Les travaux en sciences sociales publiés sur l'adhésion du public abordent certains points essentiels pour les responsables de l'élaboration des politiques :

- **Compréhension de la science par le public.** L'éducation et l'information sont importantes pour façonner et encadrer le discours public sur la technologie, mais l'attitude des citoyens dépend fortement du contexte social et politique ainsi que de la culture de la confiance entre ces mêmes citoyens, les organismes de réglementation et les entreprises.
- **Confiance.** La résistance du public aux technologies nouvelles et la perte de confiance dans les autorités chargées de la réglementation sont étroitement liées. La logique, les choix de valeurs et les incertitudes qui sous-tendent les méthodes d'analyse telles que l'analyse risques-bénéfices devraient être transparents. Le battage autour des avantages à court et long termes peut *in fine* nuire à la confiance dans les institutions gouvernementales, privées et scientifiques.

- **Avis scientifiques.** La confiance requiert en premier lieu des organismes réglementaires et consultatifs spécialisés crédibles, qui devraient se caractériser par leur ouverture, leur intégrité, leur transparence et leur capacité à rendre des comptes. Il n'existe pas de méthode universelle unique permettant de mettre en place un système solide et crédible de conseil technique et de surveillance réglementaire. Au bout du compte, les sociétés doivent s'appuyer sur le meilleur de leurs traditions institutionnelles de justification publique des questions techniques.

Les responsables de l'élaboration des politiques qui cherchent à éviter le rejet de la technologie par le public disposent d'un certain nombre de mécanismes et de bonnes pratiques.

- **Anticipation.** L'une des premières mesures efficaces consiste à entreprendre des activités d'anticipation, telles que la prospective, afin de détecter les tendances dans les domaines innovants, d'imaginer les avenir possibles et d'assurer une coordination aussi étroite que possible des acteurs sociaux pour parvenir à un éventail de résultats optimaux sur le plan social. Les exercices de prospective ne peuvent pas prédire l'avenir, mais ils peuvent aider à déterminer et à évaluer de manière systématique et transparente diverses conditions qui le façonnent.
- **Évaluation participative de la technologie.** Différentes formes d'évaluation participative de la technologie sont aujourd'hui menées par divers acteurs, parmi lesquels des comités d'éthique nationaux et d'autres organismes publics chargés d'évaluer, dans une perspective large, les effets sur la société en général et les risques pour la santé et la sécurité. Les questions à examiner doivent concerner : la répartition des avantages et des coûts potentiels associés à une technologie particulière ; les conséquences de la propriété intellectuelle sur le terrain ; l'existence éventuelle de voies permettant de tirer le meilleur avantage social possible ; et les sources d'incertitude dans l'évaluation de la technologie. Ces processus doivent aussi prendre en compte les avantages potentiels de l'innovation.
- **Participation du public.** La participation du public peut aider à orienter la science et l'innovation vers des objectifs socialement souhaitables, à renforcer le bagage scientifique des citoyens ainsi que leur soutien et leur implication, et à élargir l'éventail des possibilités envisagées dans le développement et la conduite des travaux de recherche. Cette participation a d'autant plus de chances d'avoir un effet que les technologies en sont à un stade peu avancée ou qu'elles ne sont pas verrouillées, et que de bonnes pratiques ont été élaborées.
- **Intégration des questions éthiques, juridiques et sociales plus en amont dans la R-D.** Il est essentiel de prendre ces questions en compte dans les décisions de financement de la recherche, la pratique de la science et le développement et la commercialisation des technologies. Des démarches telles que la « gouvernance anticipative » et « la recherche et l'innovation responsables » offrent des cadres possibles pour y parvenir, mais il faudra poursuivre le travail d'élaboration et d'expérimentation des mécanismes à utiliser.

Références

- Arnall, A.H. (2003), *Future Technologies, Today's Choices: Nanotechnology, Artificial Intelligence and Robotics: A Technical, Political and Institutional Map of Emerging Technologies*, Greenpeace Environmental Trust, Londres.
- Barben, D. et al. (2007), « Anticipatory governance of nanotechnology: Foresight, engagement, and integration », *The Handbook of Science and Technology Studies*, E. Hackett et al. (dir. pub.), MIT Press, Cambridge, MA.

- Bauer, M. (2009), « The evolution of public understanding of science – Discourse and comparative evidence », *Science Technology & Society*, vol. 14, n° 2, pp. 221-40.
- Bijker, W., T. Pinch et T. Hughes (dir. pub.) (2012), *The Social Construction of Technological Systems: New Directions in the Sociology and History of Technology* (Anniversary edition), MIT Press, Cambridge, MA.
- Blackburn-Starza, A. (2007), « HFEA launches public consultation on “hybrid” embryos », *BioNews*, vol. 405, 30 avril, www.bionews.org.uk/page_13053.asp (consulté le 17 janvier 2017).
- Bradbury, M. (2016) « There's an algorithm for that. Or there soon will be », Blog OECD Insights, <http://oecdinsights.org/2016/05/18/theres-an-algorithm-for-that-or-there-soon-will-be/> (consulté le 17 janvier 2017).
- British Science Association (2016), « One in three believe that the rise of artificial intelligence is a threat to humanity », *British Science Association News*, www.britishsociety.org/news/rise-of-artificial-intelligence-is-a-threat-to-humanity (consulté le 17 janvier 2017).
- Callaway, E. (2016), « UK scientists gain licence to edit genes in human embryos », *Nature*, vol. 530, n° 7588, p. 8.
- Calo, R. (2014), « The case for a federal robotics commission », Brookings Institute Project on Civilian Robotics, www.brookings.edu/research/the-case-for-a-federal-robotics-commission/ (consulté le 17 janvier 2017).
- CE (Commission européenne) (2017), « Horizon 2020 » site Internet, <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/responsible-research-innovation>.
- CE (2014a), « Special Eurobarometer 419: Public perceptions of science, research and innovation », Commission européenne, Bruxelles, http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_419_en.pdf.
- CE (2014b), *Rome Declaration on Responsible Research and Innovation in Europe*, Commission européenne, Bruxelles, https://ec.europa.eu/research/swafs/pdf/rome_declaration_RRI_final_21_novembre.pdf.
- CE (2013), « Options for strengthening responsible research and innovation », Commission européenne, Bruxelles, http://ec.europa.eu/research/science-society/document_library/pdf_06/options-for-strengthening_en.pdf.
- Cellan-Jones, R. (2014), « Stephen Hawking warns artificial intelligence could end mankind », BBC News, 2 décembre, www.bbc.com/news/technology-30290540 (consulté le 17 janvier 2017).
- Collingridge, D. (1980), *The Social Control of Technology*, Open University Press, Milton Keynes.
- Currall, S.C. et al. (2006), « What drives public acceptance of nanotechnology? », *Nature Nanotechnology*, vol. 1, n° 3, pp. 153-55, <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2006.155>.
- Davis, F.R. (2014), *Banned: A History of Pesticides and the Science of Toxicology*, Yale University Press, New Haven, <https://doi.org/10.1093/envhis/emv178>.
- Durant, J. (1999), « Participatory technology assessment and the democratic model of the public understanding of science », *Science and Public Policy*, vol. 26, n° 5, pp. 313-19, <http://dx.doi.org/10.3152/147154399781782329>.
- Ely, A., P. van Zwanenberg et A. Stirling (2011), « New models of technology assessment for development », <http://steps-centre.org/publication/new-models-of-technology-assessment-for-development/>.
- Epstein, S. (1996), *Impure Science: AIDS, Activism, and the Politics of Knowledge*, University of California Press, Berkeley.
- ETC (Erosion, Technology and Concentration) Group (2003), « The big down: From genomes to atoms – Atomtech: Technologies converging at the nano-scale », www.etcgroup.org/sites/www.etcgroup.org/files/thebigdown.pdf.
- Faden, R.R., T.L. Beauchamp et N.E. Kass (2014), « Informed Consent, Comparative Effectiveness and Learning Health Care », *New England Journal of Medicine*, vol. 370, 20 février, pp. 766-768, <http://dx.doi.org/10.1056/NEJMh1313674>.
- Fiorino, D.J. (1990), « Citizen participation and environmental risk: A survey of institutional mechanisms », *Science, Technology & Human Values*, vol. 15, n° 2, pp. 226-243.
- G7 (2016), « Communiqué », réunion des ministres de la Science et de la Technologie, Tsukuba, Ibaraki, Japon, www.g8.utoronto.ca/science/2016-tsukuba.html.
- Gaskell, G. et al. (1999), « Worlds apart? The reception of genetically modified foods in Europe and the US », *Science*, vol. 285, n° 5426, pp. 384-87, <http://dx.doi.org/10.1126/science.285.5426.384>.
- Gupta, N., A.R.H. Fischer et L.J. Frewer (2012), « Socio-psychological determinants of public acceptance of technologies: A review », *Public Understanding of Science*, vol. 21, n° 7, pp. 782-95, <http://dx.doi.org/10.1177/0963662510392485>.

- Guston, D.H. (2008), « Innovation policy: Not just a jumbo shrimp », *Nature*, vol. 454, n° 7207, pp. 940-41, <http://dx.doi.org/10.1038/454940a>.
- Guston, D.H. et D. Sarewitz (2002), « Real-time technology assessment », *Technology in Society*, vol. 24, n° 1, pp. 93-109.
- HFEA (Human Fertilisation and Embryology Authority) (2007), « Hybrids and chimeras: A report on the findings of the consultation », Human Fertilisation and Embryology Authority, www.hfea.gov.uk/docs/Hybrids_Report.pdf.
- Jasanoff, S. (2005), *Designs on Nature: Science and Democracy in Europe and the United States*, Princeton University Press, Princeton, NJ.
- Jasanoff, S. (1990), *The Fifth Branch: Science Advisers as Policymakers*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Joy, B. (2000), « Why the future doesn't need us », *Wired Magazine*, 1 avril, www.wired.com/2000/04/joy-2/.
- Kahan, D. (2015), « Climate science communication and the measurement problem », *Advances in Political Psychology*, vol. 36, pp. 1-43.
- Kamenova, K. et T. Caulfield (2015), « Stem cell hype: Media portrayal of therapy translation », *Science Translational Medicine*, vol. 7, n° 278, pp. 4-278, <http://dx.doi.org/10.1126/scitranslmed.3010496>.
- Kirby, T. (2014), « Controversy surrounds England's new NHS database », *The Lancet*, vol. 383, n° 9918, p. 681, [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)60230-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(14)60230-0).
- Long, J. et D. Scott (2013), « Vested Interests and Geoengineering Research », *Issues in Science and Technology*, n° 29, <http://issues.org/29-3/long-4/>.
- Lövbrand, E. et al. (2015), « Who speaks for the future of Earth?: How critical social science can extend the conversation on the anthropocene », *Global Environmental Change*, vol. 32, pp. 211-18.
- MacDonald, C. (2004), « Nanotechnology, privacy and shifting social conventions », *Health Law Review* vol. 12, n° 3, pp. 37-40.
- Marks, P. (2016), « AI needs oversight – Time to set standards for autonomous tech », *New Scientist*, 21 juillet, www.newscientist.com/article/2098277-ai-needs-oversight-time-to-set-standards-for-autonomous-tech/.
- « @nathanielkoloc (17 mai 2015), I think it's way too early for explicit AI policy/regulation, but check out futureoflife.org/home @bfeld », <https://twitter.com/amcafee/status/599937227834044416>.
- McNutt, M. (2015), « Breakthrough to genome editing », *Science*, vol. 350, n° 6267, pp. 1445-1445, <http://dx.doi.org/10.1126/science.aae0479>.
- Meridian Institute (2005), « Nanotechnology and the poor: Opportunities and risks », www.merid.org/~media/Files/Projects/nano-waterworkshop/NanoWaterPaperFinal.ashx.
- OCDE (2017), « Recommendation of the Council on Health Data Governance », OCDE, Paris, www.oecd.org/health/health-systems/Recommendation-of-OECD-Council-on-Health-Data-Governance-Booklet.pdf.
- OCDE (2016a), *Nanomaterials in Waste Streams: Current Knowledge on Risks and Impacts*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264249752-en>.
- OCDE (2018), *Science, technologie et innovation : Perspectives de l'OCDE 2016*, OECD Publishing, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_in_outlook-2016-fr
- OCDE (2015), « Scientific advice for policy making: The role and responsibility of expert bodies and individual scientists », *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, n° 21, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5js3311jcpwb-en>.
- OCDE (2013), « Responsible development of nanotechnology: Results from a survey activity », OCDE, Paris, [www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=dsti/stp/nano\(2013\)9/final&doclanguage=en](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=dsti/stp/nano(2013)9/final&doclanguage=en).
- Owen, R., J. Bessant et M. Heintz (dir. pub.) (2013), *Responsible Innovation: Managing the Emergence of Science and Innovation in Society*, John Wiley & Sons, Chichester, <http://doi.org/10.1002/9781118551424>.
- Owen, R., P. Macnaghten et J. Stilgoe (2012), « Responsible research and innovation: From science in society to science for society, with society », *Science and Public Policy*, vol. 39, n° 6, pp. 751-60, <http://dx.doi.org/10.1093/scipol/scs093>.
- Packer, J. (2008), *Mobility without maihem: Safety, Cars, and Citizenship*, Duke University Press, Durham, NC.
- Pfotenhauer, S.M. et al. (2012), « Learning from Fukushima », *Issues in Science and Technology*, vol. 28, n° 3, pp. 79-84.

- Pidgeon, N.F., R.E. Kasperson et P. Slovic (dir. pub.) (2003), *The Social Amplification of Risk*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Pollack, M.A. et G.C. Shaffer (2009), *When Cooperation Fails: The International Law and Politics of Genetically Modified Foods*, Oxford University Press, Oxford.
- Rayner, S. (2004), « The novelty trap: Why does institutional learning about new technologies seem so difficult? », *Industry and Higher Education*, vol. 18, n° 6, pp. 349-355.
- Reardon, S. (2015), « Global Summit Reveals Divergent Views on Human Gene Editing », *Nature*, vol. 528, n° 7581 (8 décembre 2015), p. 173, <http://dx.doi.org/10.1038/528173a>.
- Reith, S. et al. (2013), « Public acceptance of geothermal electricity production », GEOELEC, Deliverable n° 4.4, www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2014/03/D-4.4-GEOELEC-report-on-public-acceptance.pdf.
- Rodricks, J.V. (2006), *Calculated Risks: The Toxicity and Human Health Risks of Chemicals in Our Environment*, 2e édition, Cambridge University Press, Cambridge.
- Rowe, G. (2005), « A Typology of public engagement mechanisms », *Science, Technology & Human Values*, vol. 30, n° 2, pp. 251-90, <http://dx.doi.org/10.1177/0162243904271724>.
- Sarewitz, D. (2015), « CRISPR: Science can't solve it », *Nature*, vol. 522, n° 7557, www.nature.com/news/crispr-science-can-t-solve-it-1.17806.
- Schomberg, R. (2013), « A vision of responsible research and innovation », in R. Owen, J. Bessant et M. Heintz (dir. pub.), *Responsible innovation, Managing the responsible emergence of science and innovation in society*, John Wiley & Sons, Chichester, <http://doi.org/10.1002/9781118551424>.
- Schot, J. et A. Rip (1996), « The past and future of constructive technology assessment », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 54, pp. 251-68.
- Schroeder, D. et M. Ladikas (2015), « Towards principled Responsible Research and Innovation: Employing the difference principle in funding decisions », *Journal of Responsible Innovation*, vol. 2, n° 2, pp. 169-183, <http://dx.doi.org/10.1080/23299460.2015.1057798>.
- Slovic, P. (1987), « Perception of Risk », *Science*, vol. 236, n° 4799, pp. 280-85, <http://dx.doi.org/10.1126/science.3563507>.
- Smith, A. et J. Anderson (2014), « AI, robotics, and the future of jobs », Pew Research Center, Internet, Science & Tech, www.pewinternet.org/2014/08/06/future-of-jobs/
- Société européenne de l'énergie nucléaire (2009), ENS Nnews, numéro 25, www.euronuclear.org/e-news/e-news-25/forsmark.htm.
- Stilgoe, J., S.J. Lock et J. Wilsdon (2014), « Why should we promote public engagement with science? », *Public Understanding of Science*, vol. 23, n° 1, pp. 4-15.
- Stirling, A. (2007), « "Opening up" and "closing down": Power, participation, and pluralism in the social appraisal of technology », *Science, Technology & Human Values*, vol. 33, n° 2, pp. 262-94, <http://dx.doi.org/10.1177/0162243907311265>.
- Tenner, E. (2001), « Unintended consequences and nanotechnology », in *Social Implications of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 241-45, Arlington, National Science Foundation, VA.
- The Economist (2016), « Britain's manufacturing sector is changing beyond all recognition », *The Economist*, 5 novembre, www.economist.com/node/21709597/print.
- US EPA (United States Environmental Protection Agency) (2016), « Research on evaluating nanomaterials for chemical safety », US Environmental Protection Agency, www.epa.gov/chemical-research/research-evaluating-nanomaterials-chemical-safety (consulté le 4 février 2016).
- Winickoff, D.E. et al. (2005), « Adjudicating the GM food wars: Science, risk, and democracy in world trade law », *Yale Journal of International Law*, vol. 30, n° 1, pp. 81-123.
- Winickoff, D.E., J.A. Flegal et A. Asrat (2015), « Engaging the global south on climate engineering research », *Nature Climate Change*, vol. 5, n° 7, pp. 627-34, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2632>.
- Winner, L. (1977), *Autonomous Technology: Technics-out-of-Control as a Theme in Political Thought*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Wüstenhagen, R., M. Wolsink et M.J. Bürer (2007), « Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept », *Energy Policy*, vol. 35, n° 5, pp. 2683-91, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.001>.

PARTIE II

Chapitre 9

Influence de la prospective sur la prochaine révolution de la production

par

Attila Havas et K. Matthias Weber
Académie des sciences de Hongrie
Institut autrichien de technologie

La prospective peut constituer un instrument utile face aux opportunités et aux défis de la prochaine révolution de la production. Comme le montrent les différentes études de cas présentées dans ce chapitre, elle facilite le débat et la réflexion systémique sur des scénarios d'avenir multiples et contribue à modéliser le futur par la participation et l'engagement. De nature participative, elle mobilise les principaux acteurs et les invite à formuler des avis communs sur l'avenir, à débattre de leurs futurs objectifs et intérêts et à s'entendre sur des actions en accord avec leur vision collective. La prochaine révolution de la production exige des mesures rapides et proactives et une meilleure coordination entre les différents domaines d'action des politiques publiques. La prospective peut aider les responsables politiques en fournissant les fondements de politiques efficaces, en plaçant les enjeux de l'action publique dans un cadre nouveau et en traduisant les préoccupations à long terme en priorités communes. En outre, on peut avancer que la mise en œuvre des politiques est d'autant plus rapide et plus efficace que les principales parties prenantes sont associées précocement à leur élaboration. Cependant, la prospective est loin d'aboutir automatiquement à des résultats positifs : ce chapitre examine huit facteurs déterminants pour en tirer profit. En dernier ressort, face aux recommandations qui leur sont adressées, les responsables politiques doivent être prêts à agir.

Introduction

Les décisions quotidiennes prises par les responsables de l'action publique ou les dirigeants des organisations privées ou sociétales, guidées par une réflexion stratégique à long terme, conduisent en général à des résultats plus ciblés que les décisions ponctuelles. La réflexion stratégique suit des démarches diverses, mais celles qui reposent sur la prospective apparaissent plus solides car elles couvrent un large spectre de possibilités à long terme venant alimenter les stratégies à mettre en place. C'est le cas *a fortiori* des décisions qui visent à définir la position d'un pays, d'une région ou d'une entreprise face aux turbulences causées par la prochaine révolution de la production.

Parmi les différents modes d'analyse de l'avenir, ce chapitre se concentre sur la prospective, approche particulièrement pertinente pour étudier les opportunités à saisir et les défis à relever dans le cadre de la prochaine révolution de la production : outre qu'elle facilite le débat et la réflexion systémique sur les futurs possibles, la prospective contribue aussi à modéliser le monde de demain. Le processus prospectif, bien conçu et conduit, permet d'isoler et d'évaluer de façon systématique et transparente les facteurs et tendances d'ordre sociétal, technologique, économique, environnemental et stratégique susceptibles d'agir sur la compétitivité, la création de richesse et la qualité de la vie. Cette analyse peut aider les responsables de l'action publique à définir des enjeux et à concevoir des politiques. La prospective peut contribuer à transformer les préoccupations à long terme en priorités urgentes. Elle peut aussi améliorer la connaissance et la compréhension de ces facteurs par les parties prenantes, en les incitant à agir et à préparer le terrain pour des actions et stratégies complémentaires. Ainsi, elle peut faire naître des attentes et des stratégies plus cohérentes, pour une mise en œuvre plus efficace des politiques. En étudiant de multiples scénarios pour l'avenir (plutôt qu'un scénario unique) et en regroupant des acteurs importants d'horizons divers, la prospective peut aider les responsables de l'action publique à faire face à un avenir incertain et fournir les bases de politiques plus rigoureuses.

Pour tirer profit de la prospective, il faut être attentif aux processus qu'elle exige et aux propositions qu'elle produit. Il faudrait dans l'idéal qu'elle soit institutionnalisée, et qu'elle s'organise en cycles réguliers soutenus par des analyses prospectives continues. Pour donner des résultats satisfaisants, il est essentiel qu'elle s'adresse à un client motivé. La prospective doit être inscrite dans le système décisionnel. Le moment choisi, la pertinence de l'exercice par rapport aux grands enjeux et la coordination avec d'autres initiatives présentent tous une grande importance. En outre, il est primordial de trouver un mode d'organisation qui atténue la contradiction inhérente entre la nécessité pour la prospective de s'exercer suffisamment près des processus décisionnels (pour avoir de l'effet) et celle d'en assurer l'indépendance intellectuelle (pour produire des idées originales et une réflexion créative). Cette tension permanente ne peut trouver de solution qu'en fonction du contexte.

La section suivante passe rapidement en revue les types d'analyse prospective les plus importants et leur utilité pour l'action publique dans le contexte de la prochaine révolution de la production. Elle examine ensuite les avantages potentiels de la prospective et son

influence sur les politiques, là encore par comparaison avec d'autres types d'analyse de l'avenir. Elle met l'accent sur plusieurs facteurs qui peuvent aider les responsables politiques à optimiser les avantages de la prospective avant de résumer les principaux enseignements à retenir sur le plan de l'action publique et de l'organisation.

Pertinence de la prospective pour l'action des pouvoirs publics

Place de la prospective parmi les outils d'analyse

Les analyses prospectives peuvent prendre des formes diverses et poursuivre des objectifs différents. Les formes les plus connues sont la prévision, les exercices de type « technologies clés », la prospective, la planification stratégique dans le secteur privé et la planification nationale indicative. Ce chapitre est centré sur la prospective. Mais pour mieux comprendre son utilité pour l'action publique – ce qu'on peut et ce qu'on ne peut pas en attendre – il est intéressant de juxtaposer brièvement la prospective et d'autres types d'analyse orientée vers l'avenir, en particulier la prévision et l'analyse prospective réalisée par des experts (non participative)¹. Tout d'abord, deux approches systématiques fondamentalement différentes sont envisagées : la prévision et la prospective. Les prévisionnistes supposent que l'avenir est essentiellement déterminé par des paramètres structurels et institutionnels relativement stables, dont les principales caractéristiques peuvent être appelées « forces motrices ». La tâche consiste donc pour l'essentiel à définir ces forces motrices, à concevoir un modèle quantitatif fiable, à collecter les données utiles et à procéder à des simulations pour générer des extrapolations correspondant à différents moments dans l'avenir. Des experts doivent intervenir dans la réalisation de ces extrapolations, qui peuvent différer l'une de l'autre sur le plan quantitatif, mais pas sur le plan structurel (les mêmes variables sont utilisées systématiquement, même si leur valeur change d'une prévision à l'autre). La prévision peut être utilisée aussi bien dans le cadre d'exercices purement théoriques que comme instrument d'aide à la décision dans le secteur public ou privé.

L'exercice de prospective, en revanche, repose sur l'idée qu'il est possible d'agir sur l'avenir par des actions volontaires dans le présent : une partie au moins des tendances défavorables peut être dans une certaine mesure corrigée (réorientée, ralentie ou même stoppée) et de nouvelles tendances favorables peuvent s'y substituer sous l'effet de mesures privées et publiques. La prospective étudie donc différents scénarios possibles. Dans les périodes d'incertitude, il faut penser l'avenir comme un faisceau de possibilités pour concevoir des stratégies qui permettent de faire face à l'imprévu.

Pour tirer pleinement parti de la capacité de la prospective à influencer sur l'avenir, il faut y associer les acteurs importants, non seulement pour mettre en évidence, mais aussi pour évaluer les grandes tendances (en cours, naissantes et à venir), envisager les futurs possibles et choisir le plus favorable. Les valeurs et les intérêts jouent ainsi un rôle décisif dans les processus de prospective, de sorte qu'il est essentiel que l'ensemble du processus soit inclusif et transparent. Associée à des méthodes participatives, la prospective peut englober des perspectives différentes dans l'étude des scénarios possibles et faire apparaître diverses influences sur les enjeux en question et divers effets de ces mêmes enjeux. Le processus lui-même peut avoir des effets systémiques : le dialogue instauré, du fait de son intensité, peut renforcer les réseaux des principaux acteurs, en créer de nouveaux et donner plus de poids à une réflexion axée sur l'avenir. Les nouvelles méthodes participatives remodelent également toute la culture décisionnelle dans le domaine d'action visé.

En outre, la plupart des activités de prospective visent à faire émerger un consensus d'un futur souhaitable. Ces visions, et les feuilles de route opérationnelles qui les accompagnent, peuvent constituer des moyens efficaces de réunir les différentes parties prenantes intéressées autour d'un programme d'action commun. De telles visions, feuilles de route et initiatives stratégiques ont pour principal avantage d'atténuer les incertitudes concernant les ambitions des partenaires et concurrents et de contribuer ainsi à la prise de décision à long terme. De plus, les participants qui parviennent à une vision commune peuvent s'attendre à ce que leurs interlocuteurs prennent des mesures pour mettre en œuvre l'option retenue et alignent ainsi leurs actions futures en fonction de l'avenir favorable défini ensemble.

Il convient de bien distinguer la prospective des stratégies qu'elle doit alimenter. Dans le cadre de la prochaine révolution de la production, l'initiative « Industrie 4.0 » de l'Allemagne (PlattformIndustrie 4.0) apparaît comme un bon exemple de stratégie inspirée, au moins en partie, par des activités antérieures de prospective conduites dans le pays.

La prochaine révolution de la production déclenchera probablement des mutations complexes, compte tenu des interactions des nouvelles technologies (comme l'impression en 3D et la lecture optique, l'internet des objets, la communication et les interactions de machine à machine (M2M) et de personne à machine (P2M), et la robotique de pointe) ; des nouveaux matériaux (bio- et nanomatériaux en particulier) ; des processus novateurs (production fondée sur les données, intelligence artificielle, biologie de synthèse par exemple) ; et des nouveaux modèles économiques (exploitation du « sur-mesure de masse », partage et économie des plateformes) (OCDE, 2016a, 2016b). Ces changements peuvent toucher les activités de recherche, de développement technologique et d'innovation (orientation des recherches, attribution de fonds, commercialisation, préoccupations éthiques) ; le marché du travail (par la création et la suppression d'emplois) ; la distribution des revenus et le bien-être ; les besoins en personnel qualifié (et par conséquent la formation par le système d'enseignement, le recyclage, la formation tout au long de la vie) ; et plusieurs domaines de réglementation (comme les droits de propriété intellectuelle [DPI], la protection de la vie privée, la sécurité et les investissements à réaliser pour la garantir). En outre, le numérique peut contribuer largement au développement de l'économie circulaire (par le « sur-mesure de masse », la logistique intelligente, les villes intelligentes et les maisons intelligentes par exemple). Les conséquences de la prochaine révolution de la production sur les politiques sont si diverses qu'il serait difficile de mentionner un domaine important de l'action publique qui ne sera pas touché par les changements radicaux dont il est question plus haut.

C'est pourquoi la coordination des politiques correspond à un besoin bien réel. La prospective aiderait les décideurs politiques à faire face à ces changements et défis complexes de trois manières². En premier lieu, elle faciliterait une démarche systémique, envisagerait de nombreux scénarios d'avenir et tirerait parti de la diversité des connaissances et de l'expérience des participants. En outre, un fort sentiment d'appropriation parmi les participants pourrait contribuer à maintenir l'élan d'une bonne coordination de la conception et de la mise en œuvre des politiques. En deuxième lieu, la prochaine révolution de la production risque selon toute probabilité de renforcer l'incertitude. Cependant, une vision commune développée par les principales parties prenantes au processus de prospective, ainsi à même de se l'approprier, peut atténuer l'incertitude. En troisième lieu, la prochaine révolution de la production entraînera sans doute aussi des changements systémiques, par exemple avec l'apparition de nouveaux

écosystèmes d'innovation ou de systèmes d'innovation nationaux sectoriels et régionaux radicalement remaniés. Un processus prospectif porteur de transformation, visant à étudier et à soutenir ces changements systémiques, peut contribuer à redessiner les structures de pouvoir en place (qui peuvent freiner les changements souhaités), à renouveler la raison d'être des politiques, la culture et les méthodes de prise de décision dans leur ensemble, et par conséquent à assurer l'efficacité et l'efficience des politiques publiques.

Les exercices de prévision et de prospective reposent sur tout un arsenal de méthodes quantitatives et qualitatives, comme la simulation, l'extrapolation, les études Delphi, l'analyse prospective, les méthodes d'analyses PESTEL (politique, économique, sociale [socio-culturelle], technologique, environnementale et légale) et SWOT (forces, faiblesses, opportunités et menaces), et la mise au point de scénarios (encadré 9.1). Plusieurs d'entre elles, comme la simulation, l'analyse prospective, l'analyse SWOT et l'analyse de scénario, sont largement utilisées dans les processus d'aide à la décision au quotidien. Un processus prospectif donné repose sur un ensemble « sur mesure » d'outils et de méthodes permettant d'isoler et d'évaluer de façon systématique et transparente les facteurs et les tendances d'ordre sociétal, technologique, économique, environnemental et stratégique susceptibles d'influer sur la compétitivité, la création de richesse et la qualité de vie.

Encadré 9.1. Sélection de méthodes d'analyse prospective

Les facteurs et tendances **STEEP** (technologiques, économiques, environnementaux, politiques et de valeur) et l'analyse **PESTEL** offrent un cadre simple pour mettre en évidence les principales forces motrices et tendances. L'analyse **SWOT** sert à recenser et répartir en catégories les facteurs internes (forces et faiblesses) et externes (opportunités et menaces) auxquels doit faire face une organisation, une ville, une région, un pays ou une partie du monde.

L'analyse prospective vise à détecter les premiers signes d'évolutions qui pourraient avoir de l'importance. Il peut s'agir de signaux faibles (ou précoces), de tendances, d'événements ponctuels ou d'autres évolutions, de problèmes, risques et menaces persistants, y compris sur des aspects qui se trouvent à la marge de la pensée contemporaine et qui défient les hypothèses antérieures. Il peut s'agir d'une démarche entièrement exploratoire ou d'une recherche limitée d'information dans un domaine spécifique défini par les objectifs d'une tâche donnée. L'analyse prospective cherche à déterminer, à l'échéance choisie (court, moyen ou long terme), ce qui perdurera probablement, ce qui peut varier et ce qui change en permanence.

L'extrapolation de tendance commence par mettre en évidence une tendance qui se dégage au fil du temps et en fait une projection dans l'avenir au moyen de données sur les taux de variation. Les prévisions à court terme reposent sur le prolongement d'une courbe linéaire ou exponentielle (croissance économique ou diffusion d'une technologie par exemple). Pour utiliser l'extrapolation à long terme, il faut être certain que les éléments déterminants de la tendance persisteront.

La simulation consiste à créer et appliquer un modèle mathématique informatisé imitant le comportement d'un processus ou d'un système réel dans le temps. Elle décrit et analyse ce comportement en posant différentes questions sur le système réel. Elle peut ainsi contribuer à la mise au point de systèmes réels.

Une étude **Delphi** (ou selon la méthode de Delphes) est une étude conduite par des experts au moins deux « tours », les réponses obtenues au tour précédent étant présentées aux répondants du deuxième tour et aux suivants. À partir du deuxième tour, les experts sont ainsi informés des avis de leurs homologues lorsqu'ils donnent leurs réponses.

Encadré 9.1. **Sélection de méthodes d'analyse prospective (suite)**

C'est cette rétroaction qui distingue les études Delphi des sondages d'opinion ordinaires. L'idée est que les répondants peuvent tirer des enseignements des avis des autres experts, sans être soumis à des influences indues de la part de ceux qui parlent le plus fort dans un groupe ou qui ont le plus de prestige. En principe, ceux qui se démarquent fortement du consensus doivent expliquer pourquoi ils ont adopté cette position, et apportent ainsi des renseignements utiles aux autres experts.

Les différentes situations à envisager pour l'avenir peuvent être décrites et examinées de façon plus ou moins approfondie et à des fins assez diverses sous forme de « visions », de « scénarios d'avenir » et de « scénarios complets » :

Une **vision** est une brève description (un seul paragraphe) de l'avenir souhaité, visant à réunir et à mobiliser les personnes autour d'une vision particulière.

Un **scénario d'avenir** est une description détaillée d'une situation particulière à venir (résultat, principales caractéristiques et interactions des évolutions importantes). Par rapport à une vision, il présente un caractère plus précis, plus analytique et plus neutre. Pour résumer, une vision est normative, tandis qu'un scénario d'avenir est descriptif (il s'agit d'un outil d'exploration).

Un **scénario complet** (ou scénario de trajectoire) comporte un scénario d'avenir, ainsi que la trajectoire à suivre, c'est-à-dire les principales décisions et mesures à prendre pour parvenir à cet avenir particulier.

Pour être efficaces, les visions, scénarios d'avenir et scénarios complets doivent être plausibles, cohérents et offrir des éclairages intéressants sur l'avenir. Ils doivent présenter des structures différentes, c'est-à-dire ne pas se ressembler au point de constituer de simples variations d'un cas de base. Ils peuvent s'appuyer sur de nombreuses sources et méthodes différentes, en particulier toutes celles qui figurent ci-dessus, et sur des séances de « remue-ménages » et des ateliers spéciaux d'élaboration de scénarios. À l'inverse de la simulation, les scénarios d'avenir et les scénarios complets peuvent explorer des relations et des tendances, en incluant des crises et des ruptures, pour lesquelles peu ou pas de données existent; il est plus facile d'y intégrer des motivations, des valeurs et des comportements ; et ils peuvent se traduire par des images qui frappent l'imagination de ceux qu'elles visent. Ils peuvent aider les responsables de l'action publique à réfléchir à l'avenir de façon systématique en examinant un éventail de scénarios possibles. Ces outils permettent aussi de stimuler la créativité et de se libérer de l'obsession répandue du présent et du court terme.

Une **étude critique sur les technologies (clés)** vise à dégager les priorités à court terme (trois à dix ans) des politiques de recherche et développement. Elle se caractérise par un ensemble de critères d'évaluation du caractère « critique » (l'importance) de technologies particulières. Elle se fonde sur des entretiens avec des experts et dans certains cas sur une analyse comparative avec un pays ou une région.

Sources et lectures complémentaires : Cuhls, K. et al. (2015), « Models of horizon-scanning: How to integrate horizon-scanning into European research and innovation policies », www.isi.fraunhofer.de/isi-wAssets/docs/v/de/publikationen/CU_ERL_PW_Models-of-Horizon-Scanning.pdf ; Gavigan, J. et al. (2001), « A practical guide to regional foresight ».

En fonction de la démarche méthodologique adoptée, les exercices de prospective peuvent aboutir à des « produits » variés, tels que rapports thématiques de groupes d'experts, listes de priorités, recommandations pour l'action publique et feuilles de route. Il peut s'agir de produits intermédiaires générés au cours de l'exercice ou de produits finals. Ils constituent souvent les résultats les plus visibles du travail de prospective et

peuvent être largement utilisés dans le cadre de la planification des politiques, y compris par ceux qui n'ont pas été directement associés au processus prospectif.

La prospective est pratiquée dans de nombreux domaines aux niveaux sectoriel, local, régional, national et international. Plusieurs exercices prospectifs ont été consacrés exclusivement aux activités manufacturières et de production, parmi lesquels « Making Value for America : Embracing the Future of Manufacturing, Technology, and Work » (Donofrio et Whitefoot, 2015), « The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK » (Foresight, 2013), « The Future of Manufacturing in Europe 2015-2020: The Challenge for Sustainability (FutMan) » (voir Geyer et al., 2003) et « Manufacturing Visions – integrating diverse perspectives into pan-European foresight (ManVis) » (Arilla et al., 2005). D'autres exercices prospectifs couvrent des domaines divers, dont l'industrie manufacturière, en général dans le cadre d'efforts nationaux de grande envergure. Ils s'inscrivent dans les différents cycles des programmes de prospective chinois, finlandais, allemands, japonais, coréens, russes, et britanniques, ainsi que dans des programmes nationaux ponctuels, par exemple en Afrique du Sud, en Grèce, en Hongrie, en Italie, en Pologne, au Portugal, en Slovaquie et en Slovénie³. Le nombre élevé – et croissant – de ces programmes de prospective semble indiquer qu'ils peuvent être utiles à l'action publique dans des systèmes d'innovation assez différents.

Cela étant, les activités continues d'analyse prospective sont étroitement prises en charge par des organismes gouvernementaux dans plusieurs pays. Les exemples les plus pertinents sont ceux du programme britannique d'analyse prospective (*Horizon-Scanning Programme*), du Centre for Strategic Futures à Singapour et d'Horizons de politiques Canada, qui a conduit plusieurs projets « MetaScan » ces dernières années.

Quatre archétypes d'analyse prospective face aux enjeux de la prochaine révolution de la production

Les analyses prospectives peuvent prendre une multitude de formes, au gré des variations des objectifs précis, de la couverture thématique, de la portée géographique, du centre de gravité, de la méthode et de l'horizon temporel de l'analyse. L'ampleur de la couverture thématique varie aussi (selon que l'analyse est axée sur les enjeux scientifiques et technologiques ou plus largement sur les systèmes d'innovation et de production) ainsi que celle de la participation (limitée aux experts du domaine ou élargie à d'autres acteurs). La combinaison de ces paramètres permet de définir quatre archétypes différents d'analyse prospective (tableau 9.1). Ces archétypes⁴ font l'objet d'explications plus détaillées ci-dessous, illustrées de brèves descriptions de situations réelles.

Variété des modes de participation : projets fondés sur des experts et processus participatifs

Comme on l'a souligné plus haut, la prospective est un processus participatif, mais certains types d'analyse prospective peuvent aussi être conduits par des équipes d'experts de taille (plus) modeste, pouvant envisager un seul ou de multiples scénarios d'avenir. À l'inverse des exercices de prospective, les projets en question sont en général plus courts et moins coûteux, et peuvent avoir sur certaines décisions des effets plus directs, plus visibles et plus facilement identifiables. Les exercices de type « technologies clés » entrent dans cette catégorie ; il en est réalisé, par exemple, dans la République tchèque (Klusacek, 2004), en France – où les exercices « Technologies clés » reviennent tous les cinq ans – et aux États-Unis. Cependant, ce type de projet a peu de chances d'aboutir à une vision commune,

à une atténuation des incertitudes et à des effets systémiques et, en particulier, de modifier la culture décisionnelle en général. En outre, l'utilisation de cet instrument ne permet pas d'enrichir le dialogue sur l'action publique grâce aux avis des citoyens et des organisations non gouvernementales (ONG).

Tableau 9.1. **Quatre archétypes d'analyse prospective, accompagnés d'exemples**

		Ampleur de la couverture thématique →	
		Enjeux scientifiques et technologiques	Systèmes d'innovation et de production
Ampleur de la participation ↕	Experts	<i>Productive Nanosystems: A Technology Roadmap</i> , (États-Unis, 2007) Études Delphi en Corée (depuis 1994, dernière étude réalisée en 2015-16) ManVis (Union européenne, 2003-06)	<i>Making Value for America: Embracing the Future of Manufacturing, Technology, and Work</i> (États-Unis, 2015) FutMan (Union européenne, 2001-03)
	Large participation	<i>Exploiting the Electromagnetic Spectrum</i> , (UK Foresight, 2004) <i>Nanotechnology for Podlaskie 2020</i> (Pologne, 2009-13)	<i>FinnSight 2015</i> (Finlande, 2006) <i>BMBF Foresight</i> (Allemagne, 2007-09, 2012-14) <i>Advanced Manufacturing Partnership</i> (États-Unis, depuis 2011) <i>The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK</i> (2013) Programmes japonais de prospective les plus récents

Source : Analyse des auteurs.

Variété de la couverture thématique : focalisation sur les progrès scientifiques et technologiques ou sur les systèmes d'innovation et de production

Une analyse prospective donnée peut viser à créer des visions stratégiques pour guider les efforts en faveur du progrès technologique. Ainsi, le projet de prospective du Royaume-Uni sur l'exploitation du spectre électromagnétique (*Exploiting the Electromagnetic Spectrum – EEMS*), achevé en 2004, a permis de mettre en évidence dans ce champ particulier de la science et de la technologie quatre domaines au développement rapide qui devraient devenir d'importants secteurs d'activité dans les 10 à 20 prochaines années : le traitement de données entièrement optique, l'usinage au laser, l'électromagnétique en champ proche et l'imagerie non invasive. Un plan d'action a été établi pour chaque domaine par le groupe concerné, composé de représentants des entreprises, du monde universitaire, des communautés d'utilisateurs et d'organismes publics et autres. Après cinq ans, une étude a permis de constater que le projet EEMS avait tiré des conclusions justes sur les domaines scientifiques et techniques qui allaient compter pour les entreprises, toujours pertinentes cinq ans plus tard. À la suite du projet, de nombreuses actions ont encouragé le débat sur l'importance des quatre domaines mis en évidence, bien qu'il ait été difficile dans le cadre de l'étude réalisée d'établir une évaluation quantitative des conséquences de ces activités (DTI, 2004).

Plusieurs autres projets sont également axés sur la science et la technologie. Certains sont des travaux d'experts, comme l'étude intitulée « *Productive Nanosystems: A Technology Roadmap* » (États-Unis, 2007 ; voir UT-Battelle [2007]), et la série d'études Delphi réalisée en Corée tous les cinq ans depuis 1994. D'autres sont des projets plus participatifs comme celui de la Russie sur les nanotechnologies (Russie, 2005 ; voir Gaponenko [2008]) et celui de la Pologne sur les nanotechnologies pour la Podlachie à l'horizon 2020 (Pologne, 2009-13 ; voir Kononiuk et al. [2012])⁵.

D'autres projets de prospective, privilégiant une démarche plus systémique, cherchent à proposer des visions de l'industrie ou, plus généralement des systèmes d'innovation ou de production, nationaux, régionaux ou sectoriels. Ainsi, le projet britannique intitulé « The

Future of Manufacturing: A New Era of Opportunity and Challenge for the UK », achevé en 2013, a permis d'examiner les facteurs très divers influant sur l'avenir de la production manufacturière à l'horizon 2050 (encadré 9.2). D'une durée de deux ans, ce projet de grande envergure a abouti à la publication de 37 rapports de référence, mobilisé les principaux acteurs du Royaume-Uni et fait intervenir environ 300 experts de l'industrie et du monde universitaire, dirigeants d'entreprises et autres parties prenantes de 25 pays, au moyen d'ateliers organisés sur trois continents (GOS, 2013).

Le programme japonais de prospective, d'abord exclusivement consacré aux technologies, a adopté dans ses cycles récents une approche plus large, englobant par exemple le marché, la santé, l'environnement, les compétences et la prise de participation lors de la présentation du plan de « relance de l'industrie japonaise » (Bureau du Premier ministre du Japon, 2013, 2014).

Aux États-Unis, l'Académie nationale d'ingénierie (National Academy of Engineering, NAE) a publié en 2015 un important rapport donnant une vue d'ensemble de la production manufacturière : « Making Value for America: Embracing the Future of Manufacturing, Technology, and Work » (Donofrio et Whitefoot, 2015). À la différence de l'étude prospective britannique sur l'avenir de la production, cette étude des États-Unis se fonde sur les travaux d'un groupe d'experts plus restreint (comité mis en place par la NAE, membres du personnel et contributions d'autres experts de la science et de la technologie).

Encadré 9.2. **L'avenir de la production : une ère nouvelle d'opportunités et de défis pour le Royaume-Uni**

Contexte général

Le projet « The Future of Manufacturing: A New Era of Opportunity and Challenge for the UK » a été lancé en 2011, dans le cadre du troisième cycle de prospective du Royaume-Uni¹, sous le parrainage du ministre du Commerce, de l'Innovation et des Compétences.

Déroulement des travaux

Ce projet d'une durée de deux ans était placé sous la direction personnelle du conseiller scientifique principal du gouvernement. Le groupe de haut niveau d'acteurs de l'industrie (*Industry High Level Stakeholder Group*), composé de 34 représentants d'entreprises, d'administrations publiques, d'associations professionnelles, d'ONG et de syndicats et présidé par un secrétaire d'état, a fourni des conseils stratégiques. Le projet a été supervisé par un groupe pluridisciplinaire de neuf experts de haut niveau, présidé par le président d'une grande entreprise britannique, et composé essentiellement d'universitaires. Il a mobilisé non seulement les principaux acteurs du Royaume-Uni, mais aussi quelque 300 experts de l'industrie et du monde universitaire, dirigeants d'entreprises et autres parties prenantes de 25 pays, au moyen d'ateliers tenus en Asie, en Europe et aux États-Unis, tout en utilisant d'autres modes de consultation.

Résultats

Les productions écrites se répartissent en 37 documents techniques évalués par les pairs, un rapport final de 250 pages et un rapport de synthèse de 54 pages, tous mis en ligne. Plusieurs facteurs influant sur les principales caractéristiques de la production à l'horizon 2050 ont été examinés, notamment de nouveaux modèles économiques, comme la « servicisation » du secteur manufacturier, l'expansion des chaînes de valeur, les grandes tendances et opportunités du marché, la relocalisation de proximité de la production au Royaume-Uni et la part croissante de la participation étrangère. Les effets probables de

Encadré 9.2. **L'avenir de la production : une ère nouvelle d'opportunités et de défis pour le Royaume-Uni (suite)**

cinq technologies omniprésentes et de six technologies secondaires sont également décrits, ainsi que les caractéristiques des usines, des tendances environnementales et des compétences requises à l'avenir. Plusieurs types de déficits de financement sont également mis en évidence. Sur la base de cette vision systémique de l'avenir de la production manufacturière, le rapport final étudie en profondeur les conséquences de l'ensemble des facteurs et tendances à l'œuvre sur l'action publique. Plutôt que de formuler des propositions naïves reposant sur une simple extrapolation des tendances, il souligne la nécessité d'avoir une vue d'ensemble de la création de valeur dans le secteur manufacturier ; de mieux cibler le soutien apporté à certaines étapes de la production par une approche fondée sur les chaînes de valeur et une compréhension systémique des politiques scientifiques, technologiques et d'innovation, ainsi que des politiques industrielles ; et de renforcer la capacité des pouvoirs publics à évaluer et coordonner les politiques à long terme.

Impact

Ce projet n'a pas encore été évalué.

1. Le Royaume-Uni est l'un des premiers pays d'Europe à avoir utilisé la prospective, dès le début des années 90. Avec l'expérience acquise, les objectifs, les méthodes employées et l'organisation de ces activités ont évolué à chaque nouveau cycle. Le premier cycle (1993-98) visait à définir les priorités scientifiques et techniques pour l'ensemble du système de recherche britannique. Le deuxième (1999-2001) cherchait à encourager une plus large participation au dialogue sur les questions se rapportant aux entreprises, à mobiliser une plus grande variété de participants, et à élargir l'éventail des aspects pris en compte, notamment en accordant plus d'attention à la qualité de la vie. Dans le cadre du troisième cycle (2002 à aujourd'hui), le champ de l'analyse a considérablement évolué pour anticiper les changements de politiques et déterminer comment la science et la technologie peuvent répondre à des besoins directs et très ciblés (par exemple pour faire face aux inondations, à la cybercriminalité et à l'obésité). Le nombre de projets en cours simultanément a été ramené à trois ou quatre et leur durée d'exécution a également été réduite (à 12-18 mois). L'une des conditions préalables est désormais de disposer d'un parrainage solide, assuré par un homme politique ou un dirigeant de haut niveau déterminé à mettre en œuvre les recommandations émanant d'un projet donné. Voir Georghiou, Keenan et Miles (2010), Keenan et Miles (2008) et Miles (2005) pour une analyse en profondeur des cycles de prospective du Royaume-Uni.

Le Président des États-Unis a lancé en 2011 une autre initiative importante sous le nom d'*Advanced Manufacturing Partnership (AMP)*. Après un premier volet couronné de succès qui a conduit à plusieurs recommandations (PCAST, 2012), un deuxième volet (AMP2.0) a été lancé en septembre 2013, et a donné lieu à d'autres recommandations publiées dans un rapport de 2014 (PCAST, 2014). Un suivi est assuré dans le cadre d'une initiative financée par l'administration des États-Unis, « MForesight: Alliance for Manufacturing Foresight » (encadré 9.3).

Pour résumer, les pays ont appliqué une multitude d'approches et de méthodes pour définir les opportunités et les défis qui pourront résulter de la prochaine révolution de la production et s'y préparer. Compte tenu de l'interdépendance des technologies, des processus et des nouveaux modèles économiques, une approche systémique de la prospective semble plus appropriée qu'une focalisation plus étroite sur les questions scientifiques et technologiques. En outre, les approches participatives permettent à des acteurs du secteur de l'innovation et de la société d'apporter un ensemble beaucoup plus riche de connaissances, d'expérience, de valeurs, d'aspirations, de perspectives et de stratégies à l'appui de l'analyse des évolutions technologiques, économiques, sociales et éventuellement environnementales. Les projets plus limités exécutés par des experts présentent cependant un avantage important dans certains cas : ils donnent normalement des résultats plus rapides pour un coût plus faible.

Encadré 9.3. Initiatives des États-Unis : AMP et MFOresight: Alliance for Manufacturing Foresight

Contexte général

Les États-Unis ont lancé l'AMP en 2011, en chargeant des entreprises, des universités, l'administration fédérale et d'autres acteurs de recenser les technologies émergentes pouvant créer des emplois de qualité dans la production manufacturière intérieure et renforcer la compétitivité mondiale des États-Unis.

Déroulement des travaux

Le comité de direction de l'AMP a défini cinq axes de travail aux objectifs distincts : mise au point de technologies ; infrastructures et installations partagées ; éducation et développement des compétences de la main-d'œuvre ; politiques publiques ; et vulgarisation. Des rapports d'information ont été produits sur ces différents thèmes. De vastes consultations avec les parties prenantes ont été organisées de façon à recenser les possibilités d'investissement dans la production avancée de nature à transformer l'industrie des États-Unis. Quatre réunions régionales tenues dans différents États ont rassemblé 1 200 participants de l'industrie et du monde universitaire. Le sixième rapport d'information a fait la synthèse des principaux enseignements à tirer de ces réunions. La deuxième phase de l'AMP a commencé en septembre 2013.

Résultats

Deux grands rapports ont été publiés par le comité de direction de l'AMP. Le premier, intitulé « Capturing Domestic Competitive Advantage in Advanced Manufacturing » (PCAST, 2012) s'attache aux trois piliers sur lesquels s'appuyer afin de créer les conditions nécessaires pour que les États-Unis conservent leur place de chef de file des techniques de fabrication avancée : faciliter l'innovation (six recommandations) ; se doter d'un réservoir de talents (six recommandations), et améliorer le climat des affaires (quatre recommandations). Les recommandations formulées portent notamment sur les points suivants : mettre au point un modèle d'évaluation, de hiérarchisation et de recommandation concernant les investissements fédéraux à réaliser dans les technologies de production avancées ; s'appuyer sur des partenariats public-privé, en particulier sur le Réseau national d'innovation dans l'industrie manufacturière (National Network for Manufacturing Innovation, NNMI), pour faire avancer les technologies à fort impact et les modèles de collaboration englobant le développement des technologies, les infrastructures d'innovation et la valorisation des compétences de la main-d'œuvre ; et se servir de l'intervention publique pour accroître l'investissement privé dans la production avancée aux États-Unis.

Le deuxième rapport, « Accelerating US Advanced Manufacturing » (PCAST, 2014), utilise aussi les trois piliers définis au cours de la phase 1 pour organiser ses 11 recommandations. Celles-ci concernent : la gouvernance des politiques publiques (élaboration d'un plan national sur les technologies de production émergentes et création d'un consortium consultatif, et d'une structure commune de gouvernance du NNMI) ; de nouvelles infrastructures de recherche et développement (R-D) public-privé sur la production ; des procédures et normes (par exemple sur l'interopérabilité des technologies et la cybersécurité) ; la transformation de l'image de la production dans le but d'attirer les talents ; l'éducation et le développement des compétences, ainsi qu'un système d'attestations des compétences reconnues au niveau national, transférables et combinables ; l'amélioration des flux d'information sur les technologies, les marchés et les chaînes d'approvisionnement en direction des petites et moyennes entreprises (PME) ; l'atténuation du risque associé au développement des technologies avancées de production

Encadré 9.3. Initiatives des États-Unis : AMP et MForesight: Alliance for Manufacturing Foresight (suite)

par la création d'un fonds d'investissement public-privé à cette fin, ainsi que l'amélioration des échanges d'information entre les partenaires stratégiques, l'administration et les producteurs et la mise en place d'incitations fiscales destinées à encourager les investissements dans la production manufacturière. Le rapport comporte également une recommandation sur la mise en œuvre invitant le Conseil économique national (National Economic Council) et le Bureau de la politique scientifique et technologique (Office of Science and Technology Policy) à présenter au Président un ensemble de recommandations dans un délai de 60 jours.

Impact

Pour faire suite aux recommandations du premier rapport de l'AMP, un plan stratégique intitulé « A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing » a été publié en février 2012 ; une équipe interdisciplinaire formée sous le nom de *Advanced Manufacturing National Program Office (AMNPO)* a été chargée de coordonner les initiatives transversales et d'y collaborer ; les financements fédéraux destinés à la R-D en production avancée ont augmenté de près de 20 % au cours de l'exercice 2013 ; des instituts pilotes se consacrant à ces technologies ont été ouverts ; et le système de brevets a été réformé (d'autres impacts sont présentés dans le rapport PCAST [2014]).

Le suivi de l'AMP a été assuré par une initiative financée au moyen de fonds publics et appelée « MForesight: Alliance for Manufacturing Foresight ». Créée en 2015, celle-ci vise à représenter la communauté nationale de la production avancée, en communiquant aux pouvoirs publics des informations et des analyses sur les nouvelles technologies, la formation de la main-d'œuvre et les possibilités de partenariats public-privés qui renforcent la compétitivité des États-Unis. Elle s'est fixé six objectifs principaux :

- Recenser et hiérarchiser les technologies dont le développement et l'expansion sont intéressants.
- Préparer des rapports sur les nouvelles technologies dans la perspective d'investissements futurs.
- Recenser et partager les exemples de réussite en matière de commercialisation de technologies et de développement des compétences de la main-d'œuvre.
- Faire part aux entreprises, aux pouvoirs publics et aux établissements universitaires des possibilités et des défis qui se présentent dans la production avancée.
- Promouvoir les possibilités de carrière dans l'ingénierie et la production avancée.
- Diffuser les résultats des prévisions sur la technologie pour aider la communauté manufacturière des États-Unis à conserver une longueur d'avance.

Ces objectifs doivent être atteints au moyen d'ateliers publics interactifs, de petites réunions d'experts et de tables rondes virtuelles, de la publication de rapports, d'articles, de la présentation d'exposés à l'occasion de conférences et de l'utilisation des réseaux sociaux¹.

1. Pour plus d'informations, voir <http://mforesight.org/about-us/>.

Avantages potentiels de la prospective et contribution à la conception des politiques

Cette section présente les avantages potentiels de la prospective – en envisageant ses effets attendus et inattendus – et analyse six possibilités différentes de contribution de l'exercice prospectif à la formulation et à la mise en œuvre des politiques.

Avantages potentiels de la prospective

Comme le montrent diverses études (Havas, Schartinger et Weber [2010] et Cassingena Harper [2016], par exemple), la prospective peut aider les décideurs à faire face aux incertitudes de l'avenir. Elle peut faciliter la formulation des politiques grâce à la production de rapports analysant la dynamique du changement, les défis à venir et les solutions à envisager sur le plan de l'action publique. Ces analyses aident les responsables des politiques à définir les questions à traiter et à concevoir les politiques. Elles peuvent ainsi fournir l'assise de politiques plus efficaces, encourager la pensée systémique, donner un nouveau cadre aux enjeux de l'action publique et transformer les préoccupations à long terme en priorités urgentes. La prospective peut aussi renforcer l'efficacité de la mise en œuvre des politiques en facilitant la mobilisation et l'entente des principaux acteurs et en soutenant la coordination des politiques. Elle peut ainsi compléter les instruments traditionnels qui abordent l'action publique selon une approche descendante, en influant sur l'état d'esprit des parties prenantes au processus et en préparant ainsi le terrain pour des actions et stratégies complémentaires.

Pour que ces avantages se matérialisent, la prospective doit agir sur différents plans :

- sur le plan cognitif, pour contribuer à préparer les populations aux changements possibles (nouveaux contextes, nouveaux processus socio-économiques), ce qui fait intervenir de nouveaux modes de réflexion
- sur le plan procédural, pour contribuer à l'évolution des processus de préparation des décisions, par exemple en y associant des acteurs plus nombreux et plus divers
- sur le fond, pour transformer réellement le contenu des politiques
- sur le plan des changements structurels et/ou organisationnels.

Il s'agit là des effets attendus de la prospective, mais il n'est pas du tout certain qu'ils se concrétiseront. Les facteurs et conditions essentiels pour tirer parti de la prospective sont examinés dans une autre section.

Il faut aussi envisager les effets attendus en tenant compte du cadre de gouvernance dans lequel s'inscrit la prospective. Par essence, l'exercice de prospective peut renforcer le système de gouvernance des politiques en place ou contribuer à le transformer. La perception des problèmes préliminaires influe ainsi sur la conception de l'exercice prospectif. En particulier, le cadre de référence est essentiel, c'est-à-dire la façon dont le problème est circonscrit et la nécessité ou non de renforcer ou de transformer le système de gouvernance des politiques en place ou d'autres parties du système d'innovation.

Aux effets attendus peuvent aussi s'ajouter des effets imprévus, positifs et négatifs. Par nature, ceux-ci sont rarement anticipés : ils résultent souvent d'influences indirectes ou inconnues. L'évolution de l'état d'esprit des responsables de l'action publique et d'autres parties prenantes sous l'effet de l'activité de prospective peut contribuer par exemple à accroître ou développer des capacités de réflexion stratégique qui peuvent être utiles également dans d'autres domaines d'action. C'est aussi le cas des nouveaux réseaux constitués et des connaissances créées.

Le recensement et l'interprétation des effets de la prospective soulève le problème bien connu de l'attribution. Il est possible que d'autres facteurs que la prospective agissent aussi sur les politiques et que la prospective ne fasse que consolider et intégrer des initiatives isolées déjà en place depuis un moment, de sorte que ses effets réels sont souvent difficiles à observer et à mesurer avec précision. Le problème de l'attribution se

pose tout particulièrement dans le cas des effets de grande envergure, par exemple sur les résultats économiques. L'influence s'exerce par des voies multiples et indirectes, et de nombreux autres facteurs entrent en jeu. Le moment où se font sentir les effets attendus présente aussi beaucoup d'importance : si certains sont presque immédiats, d'autres peuvent mettre beaucoup de temps à se manifester⁶.

Il est difficile de déterminer comment s'exercent les impacts observés (Georghiou et Keenan, 2006). Dans la littérature consacrée à la prospective, le « processus » est souvent présenté comme (au moins) aussi important que les « produits », c'est-à-dire les rapports, listes de priorités, recommandations ou feuilles de route (Amanatidou et Guy, 2008). En effet, le processus est plus à même que tout rapport de modifier l'état d'esprit des décideurs et de contribuer à la constitution de nouveaux réseaux (même s'il ne faut pas nier l'influence des rapports et recommandations bien écrits)⁷.

Possibilités de contribution de la prospective à la formulation et à la mise en œuvre des politiques

Fournir l'assise de politiques plus efficaces

La prospective consiste à explorer différents scénarios possibles pour l'avenir. En période d'incertitudes, il faut penser l'avenir comme un faisceau de possibilités pour concevoir des politiques qui permettront de faire face à l'imprévu. L'expérience de Shell au début des années 70 en est un exemple bien connu : ayant envisagé une crise pétrolière parmi les scénarios possibles, l'entreprise était mieux préparée que ses concurrents à faire face à cette situation lorsqu'elle s'est produite (Jefferson, 2012 ; Shell, 2013). La prospective peut aussi contribuer à une plus grande efficacité des politiques en associant au dialogue sur l'action publique des participants d'horizons divers, de façon à exploiter leurs vastes connaissances, leurs expériences complémentaires, leurs aspirations et leurs idées. Les pouvoirs publics finlandais, par exemple, ont établi leur rapport de prospective, « Long-term Climate and Energy Policy: Towards a Low-carbon Finland » (2009) sur la base d'un processus participatif, en invitant des acteurs aux horizons et aux intérêts divers à étudier quatre scénarios différents qui proposaient des solutions diverses pour une Finlande sobre en carbone, présentant des conséquences différentes pour l'industrie, les consommateurs et l'administration. Le projet a abouti en définitive à un dialogue entre le gouvernement et le Parlement sur l'avenir du pays et a fourni les fondements de stratégies applicables au-delà des cycles parlementaires.

Encourager la pensée systémique

Dans un monde complexe, les phénomènes ne peuvent être compris isolément, mais doivent être envisagés dans leur contexte, compte tenu de différents points de vue. La prospective, de par sa nature participative, offre un moyen d'intégrer différentes perspectives dans l'étude des scénarios d'avenir possibles et de mettre en évidence les influences qui s'exercent et les conséquences des aspects étudiés. Le projet prospectif britannique, « The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK » en a donné récemment un bon exemple, en examinant plusieurs facteurs qui influent sur l'avenir de la production à l'horizon 2050 (encadré 9.2). Le rapport étudie les effets de ces facteurs et tendances sur l'action publique. Il souligne la nécessité d'adopter une vision intégrée de la création de valeur dans le secteur manufacturier ; de mieux cibler le soutien apporté à certaines étapes de la production par une approche fondée sur les chaînes de valeur et une compréhension systémique des politiques scientifiques, technologiques et

d'innovation, et des politiques industrielles ; et de renforcer la capacité des pouvoirs publics à évaluer et coordonner les politiques à long terme. Le processus lui-même peut avoir des effets systémiques, dans la mesure où le dialogue renforce les réseaux d'acteurs en place ou en crée de nouveaux, et accentue l'orientation prospective de la réflexion. Les méthodes participatives utilisées dans la prospective peuvent aussi transformer toute la culture décisionnelle, en particulier pour ce qui est des politiques d'enseignement, de production industrielle et d'innovation.

Le projet AMP des États-Unis adopte aussi une démarche systémique en soulignant l'importance des structures, processus et normes de gouvernance, de l'acquisition et de la reconnaissance des compétences, des facteurs financiers et autres qui limitent les investissements dans les technologies avancées, des capacités d'élaboration de stratégies des PME et de la constitution de réseaux entre les partenaires stratégiques (encadré 9.3). De même, le rapport « Making Value for America: Embracing the Future of Manufacturing, Technology, and Work » (Donofrio et Whitefoot, 2015), ainsi que l'étude sur la relance de l'industrie japonaise (« Revitalization of Japanese Industry », Bureau du Premier ministre du Japon, 2013, 2014), envisagent la production manufacturière dans un contexte général.

Un cadre nouveau pour les grands enjeux de l'action publique

Les administrations ont tendance à s'organiser en fonction de domaines de compétences bien établis et strictement délimités. Il est souvent difficile dans un tel environnement de trouver une place pour des domaines de recherche pluridisciplinaires ou de nouvelles modalités de délimitation entre eux (par exemple en passant de la recherche à visée scientifique et technologique à des projets de recherche et d'innovation axés sur des problèmes de société). Les processus de prospective peuvent aider non seulement à encadrer différemment les enjeux de l'action publique, mais aussi à susciter des innovations sur le plan de l'organisation. Ceux qui y prennent part pourraient conclure par exemple que le cloisonnement des domaines de réflexion qui prédominent dans les cercles gouvernementaux gêne la coordination des diverses mesures publiques qui doivent être alignées pour apporter une réponse efficace face à ces grands enjeux.

Le programme de prospective du ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche (BMBF) constitue un exemple intéressant à cet égard (encadré 9.4) : il cherche à recenser de nouveaux domaines d'intervention de la recherche et à définir des questions transversales et des sujets interdisciplinaires qui méritent l'attention. Deux de ces nouveaux domaines d'avenir, « Coopération en matière de technologies humaines » et « Production-consommation 2.0 », ont acquis une grande visibilité dans le débat public, déclenché d'intenses discussions sur l'avenir de l'industrie manufacturière en Allemagne, et finalement contribué à l'apparition et à la formulation de la notion désormais connue sous le nom de « Industrie 4.0 ». L'un d'eux a par la suite donné naissance, en 2010, à une nouvelle division du BMBF appelé « Évolution démographique et coopération en matière de technologie humaine ».

Transformer les préoccupations à long terme en priorités urgentes

Définir les actions à mener amène à décider quels sont les aspects de l'action publique qui méritent le plus d'attention. Il faut recenser, choisir et préciser les priorités. L'inscription d'un problème donné parmi les priorités dépend du caractère d'urgence qui lui est conféré.

Encadré 9.4. Programme de prospective du BMBF, Allemagne

Contexte général

Le programme allemand de prospective du BMBF (*BMBF Foresight*) a été lancé en 2007, et des travaux de suivi ont eu lieu en 2012. Il reposait sur les activités antérieures de prospective du BMBF et utilisait différentes méthodes (technologies clés, Delphi, Processus FUTUR). Il doit être envisagé dans le cadre de la stratégie allemande en matière de technologies de pointe (visant à concentrer les efforts de recherche sur les domaines prometteurs) et de l'Initiative Excellence (qui octroie des financements complémentaires aux universités et centres de recherche de premier plan). Les principaux objectifs de l'exercice 2007 étaient les suivants :

- Recenser les nouveaux domaines d'intervention de la recherche et de la technologie auxquels le BMBF devrait s'intéresser.
- Définir des questions transversales et des sujets interdisciplinaires appelant davantage d'attention.
- Contribuer à former des partenariats stratégiques entre différents services du ministère et différents groupes d'acteurs du système d'innovation, pour qu'ils puissent étudier ensemble les questions et sujets retenus de façon stratégique.
- Proposer des mesures concrètes prioritaires à adopter pour promouvoir les domaines en question.

Déroulement des travaux

BMBF Foresight, coordonné par une équipe d'experts extérieurs, a eu recours à des méthodes d'analyse et d'étude très diverses, telles que : enquêtes d'experts, participation à des cycles de réflexion critique ou formulation conjointe de conseils pour l'action publique. Une première phase largement analytique a conduit à la réalisation d'un panorama des sujets émergents. Une étude Delphi en ligne est venue ensuite le consolider, suivie d'une série d'ateliers destinés à en assurer l'interprétation nécessaire. Le processus a fait apparaître 14 thèmes de recherche et d'innovation à venir et sept domaines transversaux. En outre, des propositions ont été faites sur les acteurs à prendre en compte, les partenariats à former et les mesures à prendre.

Résultats

Les résultats du programme ont été rassemblés dans deux rapports principaux : Warnke (2009a), Cuhls, Ganz et Warnke (2009a) et Cuhls, Ganz et Warnke (2009b).

Impact

L'un des domaines transversaux les plus visibles, nommé Production/Consommation 2.0, regroupe les évolutions technologiques et sociales à venir dans toute la chaîne production-consommation. Si les thèmes de recherche pour l'avenir ont pu s'intégrer assez facilement dans la stratégie et les politiques du ministère, en particulier la stratégie sur les technologies de pointe, il a été beaucoup plus difficile d'intégrer les domaines transversaux. En effet, il n'est pas aisé d'aborder des questions transversales alors que les terrains d'action des disciplines scientifiques et techniques sont clairement délimités et qu'une culture assez monolithique limite l'ouverture aux démarches interdisciplinaires.

Cependant, l'intégration des futurs domaines transversaux à forte teneur en innovation dans un processus qui permet aussi d'obtenir certains résultats rapides sur des thèmes de recherche et d'innovation plus traditionnels constitue probablement une approche judicieuse. Certains enseignements non conventionnels se sont ainsi dégagés dans un contexte qui favorisait plutôt les thèmes de recherche et d'innovation conventionnels.

Encadré 9.4. Programme de prospective du BMBF, Allemagne (suite)

Facteurs déterminants

Le programme BMBF Foresight a réussi à éviter le destin de plusieurs projets de prospective mis en place dans d'autres pays où les changements de gouvernement ont beaucoup réduit la probabilité que les résultats obtenus soient pris en compte par les nouveaux responsables en poste. En mettant l'accent sur des thèmes émergents présentant un potentiel d'exploitation important, il a laissé suffisamment de place à des choix politiques correspondant à différents types de processus d'élaboration de stratégies.

En outre, les échanges étroits instaurés avec les organes de tutelle de BMBF Foresight faisaient partie intégrante du projet dès la conception. Il était prévu que l'équipe de prospective engage un dialogue approfondi avec les différents services intéressés du BMBF. Ces interactions auraient pu donner lieu à la recherche et la découverte laborieuses de nouveaux sujets, mais elle a renforcé la concertation et le débat dans et entre les services gouvernementaux.

Enfin, même les résultats les moins exploités de BMBF Foresight se sont révélés utiles à l'élaboration des politiques par la suite, en constituant un « réservoir d'informations » à l'appui de changements systémiques ultérieurs. Dans l'intervalle, l'administration a acquis de l'expérience sur la bonne utilisation de la prospective.

La prospective peut être utile à différents égards pour définir les actions à mener, en montrant pourquoi une question qui semble se poser à long terme peut nécessiter une attention immédiate. Tout d'abord, elle contribue à modifier la perception des enjeux à long terme, en les transformant parfois en problèmes urgents. Elle peut ainsi servir à expliquer pourquoi des questions qui se posent à longue échéance doivent être mises d'urgence à l'ordre du jour des programmes d'action d'aujourd'hui.

En outre, en rapport avec les perspectives à long terme inhérentes à la prospective, de nouvelles explications destinées à soutenir et justifier les interventions à venir peuvent être mises au point dans le cadre de la prospective pour fournir des arguments à l'appui de l'intervention des pouvoirs publics. Dans le cas des rapports de prospective finlandais, cet effet a été obtenu et renforcé par le dialogue instauré entre le Parlement et les pouvoirs publics au moment de l'élaboration des rapports. Les enjeux à longue échéance (changement climatique, compétitivité et bien-être social par exemple) ont été placés au premier rang des priorités, en partie du fait de l'attention portée aux rapports de prospective correspondants.

Enfin, les visions d'avenir contribuent souvent largement à rendre les enjeux à long terme plus tangibles, dans la mesure où elles servent de source d'inspiration et d'orientation pour l'établissement des priorités et les argumentations correspondantes (voir les exemples présentés dans l'encadré 9.5).

Faciliter la mobilisation et l'entente des principales parties prenantes

En dehors de l'exploration des scénarios possibles pour l'avenir, la plupart des activités de prospective visent à faire émerger une communauté de vues autour d'un scénario souhaitable. Ces visions, et les feuilles de routes qui les accompagnent, peuvent être le moyen de réunir les principales parties intéressées autour d'un programme d'action commun. Leur principal intérêt est de contribuer à réduire les incertitudes concernant les ambitions des partenaires et concurrents, et de faciliter ainsi les décisions d'investissement à long terme. En outre, lorsque les participants aboutissent à une vision commune, chacun

peut s'attendre à ce que la plus grande partie des autres intervenants prenne des mesures pour parvenir aux objectifs retenus, et par conséquent fassent coïncider leur actions futures avec le scénario qu'ils ont conjointement désigné comme souhaitable. La première tentative de mise en place de telles visions communes de l'industrie manufacturière au niveau de l'UE est le projet FutMan (*Future of manufacturing in Europe 2015-2020 – the*

Encadré 9.5. Visions d'avenir pour l'industrie manufacturière

Royaume-Uni

« Une adaptabilité constante dominera tous les aspects de l'industrie manufacturière, de la recherche-développement à l'innovation en passant par les processus de production, l'interdépendance entre fournisseur et consommateur, et l'entretien/la réparation pendant toute la durée de vie du produit. Les produits et processus seront durables, et la réutilisation, le remanufacturage et le recyclage des produits arrivant au terme de leur durée de vie utile seront intégrés au départ. Des systèmes en circuits fermés permettront d'éliminer le gaspillage d'énergie et d'eau et de recycler les déchets ». (Extrait de « A new vision for UK manufacturing » présenté dans GOS [2013], p. 6.)

États-Unis

« Une nouvelle génération de technologies d'information de réseaux, d'analyses de données et de modélisation prédictive offre des capacités sans précédent et permet d'accéder à des possibilités, inimaginables jusqu'à présent, d'utilisation de données et d'information, non seulement pour l'avancement de technologies, matériaux et produits nouveaux, mais aussi la mise en place de modalités de production nouvelles porteuses d'améliorations radicales. (...) Nous pensons que cette intégration grâce à l'ASCPM [*Advanced Sensing, Control, and Platforms for Manufacturing*] améliorera la productivité, la souplesse au niveau des produits et des processus, la viabilité de l'environnement, l'utilisation de l'énergie et des matières premières, les performances en matière de sécurité et les résultats économiques – et renforcera ainsi la compétitivité des usines des États-Unis, petites ou grandes, simples ou complexes. En particulier, l'application généralisée des technologies ASCPM présente un grand potentiel pour la production à forte intensité énergétique et l'utilisation de l'analyse de données massives à l'appui des décisions de l'industrie manufacturière. (...) »

« La visualisation, l'informatique et la fabrication numérique (VIFN) forment au niveau de l'entreprise un ensemble de méthodes de fabrication intelligente intégrées et transversales qui s'appuient sur les avancées en cours des systèmes et outils des technologies de l'information ; elles amélioreront la compétitivité de la production des États-Unis en assurant l'efficacité de la chaîne d'approvisionnement de bout en bout, une flexibilité sans précédent et une gestion optimisée de l'énergie, pour la fabrication « zéro défaut » de produits et composants personnalisés à partir de modèles numériques, au moment et à l'endroit voulus. (...) Nous pensons que la VIFN (...) va modifier rapidement la manière dont l'industrie manufacturière utilise et échange l'information pour prévoir, soutenir, acquérir, livrer et fabriquer des produits commerciaux aux États-Unis. (...) »

« Notre ambition pour l'avenir est que les États-Unis forment une main-d'œuvre capable d'inventer, d'adapter, d'entretenir et de recycler des matériaux essentiels aux infrastructures, à la défense, aux soins médicaux et à la qualité de vie dans le pays. Cette ambition accélérera aussi la transition vers une plus grande maturité de la technologie et de la fabrication, pour une intégration plus rapide et plus large dans l'industrie ». (Extraits de PCAST [2014] p. 67-70.)

challenge for sustainable development), mis en œuvre de 2001 à 2003 (Geyer et al., 2003). Celui-ci consistait à élaborer et étudier différents scénarios d'avenir pour l'industrie manufacturière, ainsi que les principaux éléments d'une vision commune de l'UE. Il est intéressant de constater que le projet a correctement anticipé certaines évolutions technologiques, comme la fabrication additive (impression 3D). Les résultats obtenus ont contribué à la création de la plateforme technologique européenne MANUFUTURE, qui rassemble les principales parties prenantes du monde universitaire et de l'industrie. La vision et le programme de recherche stratégique de MANUFUTURE ont été étayés par la suite par le projet de suivi de FutMan, appelé ManVis.

Soutenir la coordination des politiques

La prospective vise en général à mettre en évidence des enjeux à venir souvent communs aux domaines d'intérêt public établis. L'implication de participants appartenant à des domaines d'action publique différents susceptibles d'être touchés par ces évolutions nouvelles peut passer par un dialogue qui transcende les frontières des domaines en question. Ce dialogue peut contribuer à une perception commune des nouveaux défis et à des stratégies complémentaires, sinon conjointes, pour y faire face. La coordination des politiques peut être encouragée sur un plan horizontal (c'est-à-dire entre les domaines d'intervention ou entre la représentation parlementaire et le gouvernement) aussi bien que vertical (entre les ministères et les organes d'exécution). Le projet FinnSight 2015, conduit en 2006, illustre ces deux aspects (encadré 9.6). Il s'intéressait aux facteurs influant fortement sur les entreprises et la société finlandaises, et au recensement des domaines d'expertise pouvant favoriser le bien-être et la compétitivité, et a enrichi le dialogue entre les pouvoirs publics et le Parlement sur ces questions. En outre, ses résultats ont non seulement aidé les deux organisations chargées de la mise en œuvre, l'Académie de Finlande et l'Agence nationale de technologie (Tekes), à mettre au point leurs stratégies respectives, mais ont aussi contribué par la suite à la création des Centres stratégiques pour la science, la technologie et l'innovation (comme CLEEN Oy, le pôle environnement et énergie).

Encadré 9.6. Rapports de prospective des autorités finlandaises : FinnSight 2015

Contexte général

Les rapports de prospective publiés par la Finlande sont établis depuis 1992 par le bureau du Premier ministre et un groupe de réflexion spécial. Ils font l'objet de débats dans les services gouvernementaux, puis sont présentés et examinés par le Parlement finlandais la deuxième année de chaque législature. L'édition 2006 du rapport de prospective – FinnSight 2015 – était consacrée à l'avenir de l'industrie. FinnSight 2015 visait à mettre en évidence les facteurs de changement et les défis à relever dans la recherche et l'innovation, en analysant les domaines d'expertise favorisant le bien-être dans la société et la compétitivité des entreprises au moyen d'activités de recherche scientifique et d'innovation (Académie de Finlande et Tekes, 2006).

Déroulement des travaux

Le projet FinnSight 2015 a été mis en œuvre conjointement par l'Académie de Finlande et la Tekes. Centré sur les facteurs de changement pouvant influencer sur les entreprises et l'industrie ainsi que sur la société finlandaise à l'horizon 2015, il les a recensés en les rapprochant des domaines de compétence en Finlande, et a proposé des domaines dans

Encadré 9.6. **Rapports de prospective des autorités finlandaises : Finnsight 2015 (suite)**

lesquels des compétences particulières devaient être développées. Il s'est appuyé essentiellement sur les travaux de dix groupes sectoriels d'experts représentant des organisations professionnelles et de la société civile. Les groupes d'experts ont réalisé une étude qualitative des facteurs de changement ainsi que des évaluations en ligne semi-quantitatives. Les interactions entre groupes ont permis de mettre en évidence les domaines transversaux.

Résultats

L'important rapport adressé au Parlement (Académie de Finlande et Tekes, 2006), principale production du projet, a alimenté les débats parlementaires, mais aussi déclenché des débats publics et une réflexion stratégique dans les entreprises et les pôles d'activité finlandais.

Impact

Ces rapports de prospective des pouvoirs publics permettent de placer des questions d'avenir parmi les priorités de l'action publique. Ce processus s'accomplit directement lorsque les rapports sont pris en compte dans les débats parlementaires et/ou publics (et indirectement lorsque les experts de la prospective contribuent à l'élaboration des rapports). Bien qu'il soit difficile de confirmer leur influence directe sur la formulation des politiques, certains éléments indiquent que les récents rapports finlandais ont renforcé la connaissance et l'importance de la réflexion prospective dans le pays. Leur caractère institutionnel, le soutien qui leur est accordé au plus haut niveau par le gouvernement et le Parlement, leur solidité méthodologique et leur grande ouverture aux meilleures connaissances disponibles dans le pays contribuent à renforcer leur influence sur la définition des priorités. Établis à haut niveau, ces rapports contribuent également à assurer la continuité des programmes d'action d'un gouvernement à l'autre.

Les rapports de prospective des pouvoirs publics exercent aussi une influence au-delà de la sphère publique. FinnSight 2015, par exemple, a joué un rôle important dans la création des Centres stratégiques pour la science, la technologie et l'innovation. Les résultats obtenus ont aussi servi à renforcer les travaux stratégiques de l'Académie de Finlande et de la Tekes.

Facteurs déterminants

La Finlande possède une culture bien développée de la prospective et une capacité d'absorption élevée dans ce domaine. Un réseau gouvernemental de prospective relie les nombreux services et organismes publics dotés d'unités de prospective qui réalisent régulièrement des études. En outre, les acteurs concernés sont bien conscients des principaux obstacles et pièges associés aux exercices de prospective conduits par les pouvoirs publics, et y accordent une grande attention. Il s'agit notamment des obstacles suivants :

- surabondance d'informations du fait de l'ouverture et du partage de l'information
- réticence à publier les données résultant des travaux de prospective
- bureaucratie excessive décourageant la participation
- échec de la recherche d'experts compétents avec lesquels travailler
- médiocre qualité des informations et analyses de base
- manque de cohérence de la conception du processus
- manque de continuité des interactions avec les utilisateurs des résultats de la prospective
- prospective perçue comme inutile par la société.

Avantages et impacts : synthèse

En résumé, la prospective peut avoir toutes sortes d'impacts directs et indirects sur les activités d'innovation et par conséquent sur les performances économiques. Par les avantages et les produits qui résultent du processus (rapports, visions d'avenir, recommandations, feuilles de route par exemple), elle est appelée à agir sur la formulation des politiques. Cependant, compte tenu de la complexité des modes d'influence – dont témoignent le simple nombre et la diversité des parties prenantes aux processus de prospective puis à l'élaboration des politiques – il apparaît difficile d'établir un lien clair et direct entre un processus de prospective donné et son impact sur les politiques.

En outre, l'influence possible et les impacts attendus de la prospective varient selon le type d'analyse réalisée. Les processus participatifs mobilisent un ensemble plus vaste de connaissances, d'expériences, d'aspirations et de visions du monde qu'un projet fondé sur des experts. On peut s'attendre à ce qu'ils produisent des idées plus nouvelles et originales, mieux étayées compte tenu de la diversité des points de vue, dans la mesure où elles sont mises à l'épreuve et examinées de façon approfondie sous différents angles. De plus, les processus participatifs sont plus susceptibles d'aboutir à une meilleure compréhension des défis à long terme et de leurs répercussions sociales, environnementales et économiques. Les politiques se trouvent ainsi mieux étayées tandis que leur crédibilité et leur légitimité sont renforcées. Il est alors possible de coordonner en connaissance de cause un plus vaste ensemble de politiques et d'en accroître l'efficacité.

De toute évidence, l'analyse prospective axée sur l'innovation et les systèmes de fabrication est amenée à envisager un éventail plus large de questions que les projets centrés sur la science et la technologie, et à avoir des répercussions bénéfiques sur l'élaboration comme sur la mise en œuvre des politiques. Compte tenu de la complexité des enjeux – du fait de l'interdépendance des opportunités et défis technologiques, économique, sociétaux et environnementaux – de la prochaine révolution de la production, il semble plus adapté de se fonder sur une approche systémique pour l'élaboration des mesures à prendre face à ces changements radicaux et profonds. Les études de cas présentées dans les encadrés de ce chapitre le confirment. Dans certains contextes, une analyse prospective centrée sur la science et la technologie peut néanmoins être utile également. Il doit cependant être clair dès le départ que les avantages et les impacts mis en évidence par cette approche seront différents et nécessairement plus limités.

Facteurs et conditions essentiels à prendre en compte pour tirer profit de la prospective

Cette section est consacrée aux principaux facteurs à prendre en compte pour tirer profit de la prospective. Il s'agit surtout de facteurs politiques et stratégiques ainsi que de considérations méthodologiques diverses.

Un client motivé et des objectifs clairs

L'une des conditions fondamentales de l'efficacité de la prospective est de s'adresser à un client motivé, c'est-à-dire à une organisation ou un ensemble d'organisations détenant des compétences décisionnelles, ouvertes aux recommandations résultant de l'exercice de prospective et prêtes à y donner suite (y compris en jouant le rôle de « champion de la prospective » si d'autres entités doivent être associées à la prise de décision). Si cet engagement n'existe pas, l'essentiel du temps et des efforts consacrés au processus de

prospective sera gaspillé, de même que l'argent public dépensé pour faire face aux coûts d'organisation et autres frais. À titre d'exemple, le deuxième cycle du programme de prospective du Royaume-Uni (1999-2001) n'a pas eu beaucoup de retombées, pour deux raisons principales : il comportait trop de projets sans objectifs clairs ; et il manquait de clients – ou « propriétaires » de projets – ayant expressément besoin de régler un problème de politique publique au moyen d'un exercice prospectif. Ayant tiré les leçons de l'expérience, le troisième cycle, lancé en 2002 (et toujours en cours au moment de la rédaction de cet article), ne compte plus que trois ou quatre projets en cours simultanément, et tous sont « parrainés » par un ministre qui préside en général le groupe de parties prenantes chargé de la supervision des travaux. Ce ministre s'approprie ainsi le projet et se trouve prêt à appliquer les propositions qui en résultent. S'il n'était pas activement associé à leur formulation, des idées tout aussi valables pourraient être perçues comme des recommandations provenant « d'étrangers », et auraient probablement moins de chances d'être mises en œuvre (encadré 9.2).

Il convient aussi de mettre au point un plan cohérent en coopération étroite avec le(s) client(s) pour déterminer l'axe général, les principaux objectifs, l'échéance et la portée géographique du projet de prospective, ainsi que les participants et méthodes à retenir.

Maintien du soutien et des efforts dans le temps

Les activités de prospective ont besoin d'un soutien durable pour porter leurs fruits : il faut du temps en effet – souvent plusieurs cycles de travaux – pour influencer sur les politiques, les modes de pensée, la culture décisionnelle et les systèmes de gouvernance. Le projet « The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK », par exemple, a duré deux ans et exigé d'importantes ressources (encadré 9.2). Dans d'autres cas, une succession de projets a été nécessaire : la plate-forme technologique européenne MANUFUTURE s'est appuyée sur les résultats de FutMan et ManVis (tous deux mentionnés plus haut) pour définir sa vision et son programme stratégique de recherche. Elle a apporté des informations à l'appui des éléments des programmes-cadres de recherche et de développement technologique de l'Union européenne en rapport avec la production, pour la mise en place d'un nouveau paradigme dans ce domaine. Le septième programme-cadre et Horizon 2020 auraient évolué différemment s'ils n'avaient pas été précédés des projets ManVis et FutMan. Ces dialogues stratégiques sont désormais facilités par le projet sur les systèmes de production intelligents (*Intelligent Manufacturing Systems*) qui s'étend sur trois continents (www.ims.org ; voir aussi Cagnin et Könnölä [2014]).

Dans les pays qui n'appliquent de programmes nationaux de prospective que de façon ponctuelle (la Grèce et la Hongrie par exemple), les possibilités d'en tirer profit restent limitées. Ce n'est pas le cas des pays qui ont à leur actif plusieurs cycles de prospective s'étendant sur une longue période (l'Allemagne, le Japon ou le Royaume-Uni par exemple, voir les encadrés 9.2 et 9.4)⁸.

Apprendre par la pratique pour assimiler les connaissances acquises

La prospective reste dans de nombreux pays un moyen nouveau et inhabituel de réfléchir, de communiquer et de préparer des actions stratégiques, de sorte que l'apprentissage est essentiel dans ce domaine. Les rapports disponibles sur des cas réels, ainsi que les directives méthodologiques, aideraient certainement les responsables politiques, les professionnels de la prospective, les parties prenantes (en tant que participants potentiels) et les relais d'opinion à mieux comprendre et évaluer l'intérêt de la

prospective, mais une connaissance approfondie passe nécessairement par la pratique. Étant donné que l'exercice de prospective ne peut s'appuyer sur un modèle unique qui en garantisse le succès, d'une part, et que les défis à relever et les opportunités à exploiter ne cessent d'évoluer, d'autre part, le processus d'apprentissage revêt une importance particulière. Les changements de grande envergure apportés au troisième cycle du programme de prospective du Royaume-Uni le montrent bien (encadré 9.2). Autre exemple parlant, celui du programme de prospective du Japon, dont l'objectif exclusivement technologique des années 70 et 80 a évolué dans les derniers cycles vers une approche sociotechnique plus large. Ce changement d'orientation témoigne de l'évolution de la perception des relations entre technologie et société au Japon.

Des cultures organisationnelles et politiques favorables

La dernière condition pour une prospective utile et de qualité est l'existence d'une culture de la prospective profondément enracinée. La mise en place d'une culture de la prospective est un processus long et exigeant, qui ne peut être planifié à l'avance au moyen d'échéances et d'étapes intermédiaires. Il faut pour cela soutenir en permanence la prospective ainsi que le processus d'apprentissage qui suit. Depuis 1992, par exemple, le gouvernement finlandais, sous la responsabilité du Premier ministre et avec l'aide de partenaires extérieurs, prépare une fois par législature un rapport de prospective destiné au Parlement national. Ces rapports renforcent la réflexion à long terme en Finlande, instaurent un dialogue entre le gouvernement et le Parlement sur les questions d'avenir présentant un intérêt au niveau national et fournit à l'action publique un cadre stratégique qui va bien au-delà des cycles électoraux (encadré 9.6). Dans des pays comme la Grèce, la Hongrie et la Turquie, en revanche, les changements de gouvernement empêchent la poursuite des programmes nationaux de prospective, et donc la création d'une culture de la prospective.

Des liens étroits avec la prise de décision – mais en toute indépendance intellectuelle

Pour être utile, la prospective doit faire partie intégrante du système de prise de décision (encadrés 9.2 et 9.6). Son calendrier, sa pertinence par rapport aux grands enjeux d'une société donnée et la coordination à assurer avec les autres politiques sont déterminants. Le programme allemand de prospective du BMBF (2007-09) s'est consacré aux enjeux et défis à venir, afin de soutenir les politiques scientifiques et technologiques du pays, en relation étroite avec sa stratégie en matière de haute technologie. Cette coordination a permis de mettre en évidence de nouveaux domaines de recherche et de technologie, de définir des enjeux transversaux et des thématiques interdisciplinaires auxquels prêter attention. Elle a aussi contribué à la mise en place de partenariats stratégiques à l'intérieur du BMBF et avec les acteurs du système national d'innovation (encadré 9.4).

Il est important également de trouver un mode d'organisation qui puisse atténuer la contradiction inhérente à la double nécessité d'intégrer la prospective dans le processus décisionnel (pour obtenir un soutien politique), et d'en assurer l'indépendance intellectuelle (pour faciliter une réflexion créatrice). Il est difficile de concilier ces impératifs, et cette tension ne peut trouver de solution qu'en fonction du contexte. En Hongrie par exemple, compte tenu de l'héritage de la planification centrale, en particulier de ses éléments hiérarchiques, le gouvernement hongrois a décidé que le programme national de prospective technologique (TEP) (1998-2000) devait être dirigé par ses participants plutôt que par l'organe gouvernemental qui l'avait mis en place et financé, et bénéficier d'une grande autonomie. Le programme n'a donc pas été intégré dans les structures décisionnelles. En outre, l'organe

gouvernemental qui l'avait établi n'avait pas le poids politique nécessaire pour convaincre les grands ministères de prendre des mesures en application des recommandations formulées par le TEP. Quelques-unes seulement ont été mises en œuvre, par un processus « lent et non linéaire » (Georghiou et al., 2004).

Le type de prospective choisi et ses principaux objectifs doivent être adaptés à sa finalité

Pour que la prospective soit efficace, il est important d'étudier la relation entre sa conception (thématique principale, méthode et niveau de participation), et les caractéristiques du système de gouvernance de l'action publique dans lequel elle doit s'inscrire (en particulier la culture et les méthodes décisionnelle en vigueur, la détermination des décideurs à s'appuyer sur les résultats, l'existence de compétences et de pratique méthodologique et le niveau des capacités de réflexion stratégique). Souvent, l'exercice de prospective doit résonner avec le système de politique de gouvernance en place pour donner de bons résultats. La prospective doit être compatible avec la culture de la participation et respecter les limites institutionnelles et organisationnelles fondamentales. C'est habituellement le cas des activités de prospective destinées à fixer des priorités thématiques sans remettre en question les conditions structurelles et institutionnelles qui prévalent dans un domaine donné.

Cependant, il faut établir une distinction claire entre les activités de prospective visant à définir des priorités thématiques et celles qui visent à entraîner des changements systémiques (Havas et Weber, 2017). Cette distinction est déterminante dans le contexte de la prochaine révolution de la production, compte tenu de la nécessité d'apporter des modifications de fond aux structures organisationnelles, aux institutions et aux relations. Dans de tels cas, il convient plutôt de concevoir des modes de prospective porteurs de transformation qui contribuent à faire évoluer le système de gouvernance de l'action publique.

Cet argument montre aussi qu'il faut se faire une idée réaliste de l'ampleur des défis à relever avant de définir la portée et l'objet d'un exercice de prospective.

Faciliter l'utilisation des recommandations résultant de la prospective

Les produits de la prospective doivent être adaptés aux besoins et aux modes de communication des publics visés. Aux documents de synthèse rapides et concis destinés aux décideurs de haut niveau doivent par exemple s'ajouter de solides rapports d'étude préliminaire et d'analyse. Il peut être important également de se servir des réseaux sociaux pour diffuser les résultats de la prospective s'ils visent principalement le grand public. L'adaptation des résultats de la prospective à des publics particuliers exige des compétences spéciales, par exemple pour la présentation de ces résultats sous forme de documents de synthèse.

On souligne souvent l'importance du processus de prospective en mettant l'accent sur les avantages complémentaires qu'il apporte grâce à la constitution de réseaux, à la mobilisation et à la coordination stratégique entre les participants, mais il offre aussi un excellent moyen de faciliter l'utilisation et l'adoption des recommandations formulées à l'issue de l'exercice de prospective. Ceux qui y ont participé sont les mieux à même d'en promouvoir les résultats (Jarmai, 2015).

Pour que la prospective soit utilisée avec succès dans la prise de décision, il faut qu'elle soit bien intégrée dans l'organisation (EFFLA, 2012). Cette condition comporte plusieurs facettes importantes, concernant notamment les structures et responsabilités dans

l'organisation (qui est responsable ?), le rôle de la prospective dans les procédures de prise de décision (quand présente-t-elle une importance pour la prise de décision ?), les compétences du personnel dans le traitement et l'interprétation des activités de prospective (qui est compétent ?) et l'accès aux réseaux/pôles internes et externes de connaissances sur la prospective et les échanges qui s'effectuent avec eux (comment obtenir des connaissances en matière de prospective ?).

Gestion de l'exercice de prospective

La conception et la gestion de l'exercice de prospective doivent tenir compte de tous les aspects mentionnés plus haut, mais en particulier : i) des moyens à utiliser pour intégrer la prospective dans les structures décisionnelles tout en assurant son indépendance intellectuelle ; et ii) du choix de l'approche, des participants et des méthodes à privilégier. En outre, il est essentiel de concevoir et de mettre en œuvre une stratégie de communication adaptée à l'objectif général et au public visé en premier lieu (responsables politiques uniquement ou principales parties prenantes, organisations de la société civile et grand public).

Le contexte général – en particulier la culture et les méthodes de prise de décision, ainsi que les compétences et l'expérience méthodologiques disponibles – détermine : i) où implanter l'unité de gestion ; et ii) quels rôles et responsabilités conférer aux experts extérieurs, facilitateurs et professionnels de la prospective.

Comme dans tout projet financé par des fonds publics, les aspects opérationnels – préparation du budget et respect des limites financières, indication des échéances et observation des délais – sont déterminants. Ce qui est propre à l'exercice de prospective, c'est la nécessité de maintenir en outre une certaine souplesse. Souvent, les besoins définis au départ, et par conséquent les objectifs à atteindre, évoluent sous l'effet du processus lui-même : les participants acquièrent une meilleure compréhension de la situation et des besoins, opportunités et défis à venir du simple fait de leur participation. Il faut ainsi trouver un équilibre subtil entre deux exigences quelque peu contradictoires : fixer des objectifs clairs d'une part et conserver une marge de manœuvre d'autre part, sans compromettre l'achèvement de l'exercice prospectif dans les délais.

Principaux enseignements à pour l'action des pouvoirs publics et sur le plan organisationnel

Les processus d'innovation couronnés de succès exploitent différents types de connaissances. Ces éléments de savoir, produits par divers acteurs et activités, sont donc rarement disponibles dans une organisation unique – voire jamais. Les pouvoirs publics doivent par conséquent soutenir la production, la diffusion et l'exploitation de tous les types de connaissances, ainsi que diverses formes de collaboration entre partenaires, secteurs et pays, conclusion d'autant plus pertinente dans un contexte d'atténuation du cloisonnement entre production et services.

Les exemples examinés plus haut montrent que la prospective, si elle est appliquée et exploitée correctement, peut appuyer l'élaboration des politiques pendant les périodes de mutation technologique et socioéconomique rapide, non seulement parce qu'elle étudie les évolutions possibles dans l'avenir, mais aussi parce qu'elle constitue en elle-même une intervention. Grâce à des méthodes participatives, les principaux acteurs et parties prenantes sont mobilisés et invités à formuler des points de vue communs sur l'avenir, à

débatte de leurs futurs objectifs et intérêts et à s'entendre sur des actions conjointes et cohérentes. Ces avantages concernent aussi les pouvoirs publics, dans la mesure où l'apparition de nouveaux défis nécessite des ajustements plus fins et une meilleure coordination entre les différents domaines d'action.

Pour que ces avantages potentiels de la prospective se concrétisent, il faut satisfaire à plusieurs conditions préalables :

- L'efficacité de la prospective dépend de sa bonne intégration dans les processus décisionnels. Il faut pour cela modifier à la fois les structures organisationnelles et les processus d'élaboration de stratégies (encadré 9.2).
- Il faut lier les processus prospectifs aux cycles de l'action publique pour s'assurer de disposer des informations nécessaires au moment voulu.
- La production d'un rapport n'est pas l'unique finalité de la prospective. Les éléments participatifs de la prospective exigent beaucoup de temps et de ressources, mais les interactions ainsi créées entre parties prenantes et décideurs sont essentielles pour déclencher des évolutions de la gouvernance, de la société et de l'économie.
- L'acquisition des compétences nécessaires et la création d'un environnement favorable à l'exercice d'une prospective efficace et efficiente nécessitent des efforts soutenus. Des actions ponctuelles sont peu susceptibles d'avoir les effets espérés sur la formulation des politiques. Il faut du temps, et parfois des mesures spécifiques, pour favoriser et diffuser une réflexion prospective.
- Une certaine forme d'institutionnalisation – au moyen de programmes réguliers et/ou par la mise en place d'organisations spécialisées – est également nécessaire pour créer une culture de la prospective et en exploiter durablement les avantages. Les cycles électoraux étant sensiblement plus courts que les échéances envisagées par la prospective, cette condition présente une importance particulière.
- Si l'indépendance intellectuelle ne préside pas à l'élaboration de réflexions nouvelles, la prospective ne peut remplir sa fonction essentielle, c'est-à-dire mettre en évidence les grands défis et opportunités à venir et les moyens nouveaux d'y faire face.

Notes

1. Les principales différences entre prospective (participative) et analyse prospective (non participative) réalisée par des experts, pour ce qui est des enjeux de la prochaine révolution de la production, sont examinées dans la section suivante.
2. La prospective peut aussi aider les décideurs du secteur privé, au niveau de l'entreprise et du secteur, à faire face à l'évolution des possibilités d'investissement résultant de la prochaine révolution de la production ; à coordonner les innovations en matière de technologie, d'organisation, de modèle économique, de finances, de gestion et de commercialisation ; et à réorganiser et coordonner les réseaux internationaux d'innovation et de production.
3. Des analyses détaillées de ces études de cas figurent par exemple dans : Amanatidou (2013, 2014) ; Cuhls (2004) ; Cuhls (2013) ; Cuhls et Georghiou (2004) ; Cuhls et al. (2008) ; Georghiou, Keenan et Miles (2010) ; Georghiou et Keenan (2006) ; Havas (2003), Keenan et Miles (2009) ; Könnölä, Salo et Brummer (2009) ; Kuwahara (1999) ; Martin et Johnston (1999) ; Miles (2005) ; NISTEP (2005) ; OCDE (1996) ; Salo et al. (2009) ; Shin, Hong et Grupp (1999) ; Stanovnik et Kos (2007) ; et Yokoo et Okuwada (2012).
4. Les archétypes sont utiles à des fins d'analyse pour soutenir les processus d'élaboration de stratégies, mais les situations réelles s'en éloignent souvent. La stratégie robotique du Japon (2015), par exemple, est fortement axée sur la science et la technologie, mais s'intéresse aussi explicitement à diverses questions transversales, comme les ressources humaines, le développement, la

réglementation, ainsi qu'aux caractéristiques propres à certains secteurs comme la production, les services, les applications de soins médicaux et infirmiers, les infrastructures, les interventions en cas de catastrophe et la construction, ainsi qu'à diverses branches de l'agro-alimentaire. Le programme polonais de nanotechnologie pour la région de Podlachie à l'horizon 2020 (*Nanotechnology for Podlaskie 2020*) privilégiait lui aussi les aspects scientifiques et technologiques, mais prêtait aussi beaucoup d'attention à la constitution de réseaux et à la coopération au niveau régional. Aux États-Unis, le programme *Advance Manufacturing Partnership* comporte également des caractéristiques essentielles de deux archétypes : ses rapports ont été produits par des groupes d'experts, mais 1 200 participants de l'industrie, du monde universitaire et des administrations publiques ont été associés au projet au moyen de consultations régionales, et leurs points de vue et propositions sont pris en compte dans le rapport final.

5. Compte tenu de la quantité de projets sur les technologies de l'information et de la communication (TIC), la biotechnologie industrielle, les produits chimiques et pharmaceutiques conduits dans de nombreux pays, il est impossible d'établir une liste de ces analyses prospectives qui tende à l'exhaustivité.
6. Pour une étude plus détaillée des effets intermédiaires et finals possibles, voir par exemple Havas, Schartinger et Weber (2010).
7. Les avantages de l'exercice prospectif peuvent aussi porter sur l'amélioration des processus de préparation des décisions et de l'efficacité des dispositifs structurels et/ou organisationnels.
8. Pour un aperçu rapide de ces études de cas par pays, voir par exemple Havas et Weber (2017). Pour une analyse plus détaillée, consulter en particulier Amanatidou (2013, 2014) ; Cuhls (2013) ; Cuhls et Georghiou (2004) ; Cuhls et al. (2008) ; Georghiou, Keenan et Miles (2010), Georghiou et Keenan (2006) ; Havas (2003), Kuwahara (1999) ; Martin et Johnston (1999) ; Miles (2005) ; NISTEP (2005) ; OCDE (1996) ; et Yokoo et Okuwada (2012).

Références

- Agence finlandaise pour la technologie et l'innovation (2006), « FinnSight 2015: The outlook for science, technology and society », Agence finlandaise pour la technologie et l'innovation (TEKES), Helsinki, www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/finnsight_2015_en.pdf.
- Amanatidou, E. (2014), « Beyond the veil – The real value of foresight », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 87, pp. 274-291.
- Amanatidou, E. (2013), « The Greek National Technology Foresight Programme: Success is in the eye of the beholder », *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 9, n° 1, pp. 67-92.
- Amanatidou, E. et K. Guy (2008), « Interpreting foresight process impacts: Steps towards the development of a framework conceptualising the dynamics of "foresight systems" », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 75, n° 4, pp. 539-557.
- Arilla, C. et al. (2005), *Manufacturing Visions – Integrating Diverse Perspectives into Pan-European Foresight (ManVis)*, rapport final, http://cordis.europa.eu/project/rcn/74424_en.html.
- Bureau du Premier ministre du Japon (2014), « Japan revitalization strategy: Japan's challenge for the future », www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/honbunEN.pdf.
- Bureau du Premier ministre du Japon (2013), « Japan revitalization strategy: Japan is back », www.maff.go.jp/j/kokusai/renkei/fta_kanren/pdf/en_saikou_jpn_hon.pdf.
- Cassingena Harper, J. (2016), « The impact of technology foresight on innovation and innovation policy », in J. Edler et al. (dir. pub.), *Handbook of Innovation Policy Impact*, pp. 483-504, Edward Elgar, Cheltenham.
- Cuhls, K. (2013), « Foresight in Germany: Implications for policy making », in D. Meissner et al. (dir. pub.), *Science, Technology and Innovation Policy for the Future*, Springer, Heidelberg, pp. 199-217.
- Cuhls, K., W. Ganz et Warnke (dir. pub.) (2009a), *Foresight-Prozess im Auftrag des BMBF, Etablierte Zukunftsfelder und ihre Zukunftsthemen* [Processus de prospective – au nom du ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche (BMBF), nouveaux domaines d'avenir et thématiques futures], IRB, Karlsruhe, Stuttgart.
- Cuhls, K., W. Ganz et P. Warnke (dir. pub.) (2009b), *Foresight-Prozess im Auftrag des BMBF, Zukunftsfelder neuen Zuschnitts*, [Processus de prospective – au nom du ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche (BMBF), nouveaux domaines d'avenir], IRB, Karlsruhe, Stuttgart.

- Cuhls, K. et al. (2008), « The BMBF Foresight Process », Third International Seville Seminar on Future-Oriented Technology Analysis: Impacts and implications for policy and decision making, Séville, 16-17 octobre.
- Cuhls, K. (2004), « Futur – Foresight for priority-setting in Germany », *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 1, n° 3/4, pp. 183-194.
- Cuhls, K. et L. Georghiou (2004), « Evaluating a participative foresight process: “FUTUR – the German research dialogue” », *Research Evaluation*, vol. 13, n° 3, pp. 143-153.
- Donofrio, N.M. et K.S. Whitefoot (dir. pub.) (2015), *Making Value for America: Embracing the Future of Manufacturing, Technology, and Work*, The National Academies Press, Washington, DC.
- DTI (2004), *Exploiting the Electromagnetic Spectrum: Findings and Analysis*, DTI, Londres, www.gov.uk/government/collections/exploiting-the-electromagnetic-spectrum.
- EFFLA (Forum européen des activités prospectives) (2012), « Enhancing strategic decision making in the EC with the help of strategic foresight », EFFLA Policy Brief n° 1, Forum européen des activités prospectives, Bruxelles, https://ec.europa.eu/research/innovation-union/pdf/expert-groups/effla-reports/effla_pb1_-_enhancing_strategic_decision-making_in_the_ec_with_the_help_of_strategic_foresight.pdf.
- Foresight (2013), *The Future of Manufacturing: A New Era of Opportunity and Challenge for the UK*, Government Office for Science, Londres.
- Gaponenko, N. (2008), « Russian nanotechnology 2020 », EFMN Foresight Brief n° 75, in S. Giesecke, P. Crehan et S. Elkins (dir. pub.), *The European Foresight Monitoring Network: Collection of EFMN Briefs – Part 1*, pp. 297-300, Office des publications officielles des communautés européennes, Luxembourg.
- Gavigan, J. et al. (dir. pub.) (2001), « A practical guide to regional foresight », EUR 20128 EN, FOREN Network, EC STRATA Programme.
- Georghiou, L., M. Keenan et I. Miles (2010), « Assessing the impact of the UK's evolving national foresight programme », *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 6, n° 1/2/3, pp. 131-150.
- Georghiou, L. et al. (dir. pub.) (2008), *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*, Edward Elgar, Cheltenham.
- Georghiou, L. et M. Keenan (2006): « Evaluation of national foresight activities: Assessing rationale, process and impact », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 73, n° 7, pp. 761-777.
- Georghiou, L. et al. (2004), « Evaluation of the Hungarian technology foresight programme », Office national hongrois pour la recherche et la technologie, Budapest, <http://pdc.ceu.hu/archive/00002690/>.
- Geyer, A. et al. (2003), *The Future of Manufacturing in Europe 2015-2020: The Challenge for Sustainability*, Institut de prospective technologique, série de rapports techniques, EUR 20705 EN, Commission européenne, Centre commun de recherche.
- Havas, A. et M. Weber (2017), « The “fit” between forward-looking activities and the innovation policy governance sub-system: A framework to explore potential impacts », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 115, pp. 327-337, <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2016.07.016>.
- Havas, A., D. Schartinger et M. Weber (2010), « The impact of foresight on innovation policy making: Recent experiences and future perspectives », *Research Evaluation*, vol. 19, n° 2, pp. 91-104.
- Havas, A. (2003), « Evolving foresight in a small transition economy: The design, use and relevance of foresight methods in Hungary », *Journal of Forecasting*, vol. 22, n° 2-3, pp. 179-201.
- Jarmai, K. (2015), « Impact of foresight processes on the European research and innovation system », thèse de doctorat, Wirtschaftsuniversität, Vienne.
- Jefferson, M. (2012), « Shell scenarios: What really happened in the 1970s and what may be learned for current world prospects », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 79, n° 1, pp. 186-197.
- Keenan, M. et I. Miles (2008), « Foresight in the United Kingdom », in L. Georghiou et al. (dir. pub.), *The Handbook of Technology Foresight: Concepts and Practice*, Edward Elgar, Cheltenham, pp. 91-111.
- Klusacek, K. (2004), « Technology foresight in the Czech Republic », *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 1, n° 1/2, pp. 89-105.
- Kononiuk, A. et al. (2012), « Nanotechnology for Podlaskie 2020 », EFP Brief n° 235, www.foresight-platform.eu/wp-content/uploads/2012/12/EFP-Brief-No.-235_Nanotechnology-for-Podlaskie-2020.pdf.
- Könnölä, T., A. Salo et V. Brummer (2009), « FinnSight 2015 – A national joint foresight exercise », Foresight Brief n° 164, www.foresight-platform.eu/wp-content/uploads/2010/03/EFP_Brief_No._164_FinnSight_2015_2_.pdf.

- Kuwahara, T. (1999), « Technology forecasting activities in Japan », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 60, n° 1, pp. 5-14.
- Martin, B. et R. Johnston (1999), « Technology foresight for wiring up the national innovation system: Experiences in Britain, Australia, and New Zealand », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 60, n° 1, pp. 37-54.
- Miles, I. (2005), « UK Foresight: Three cycles on a highway », *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 2, n° 1, pp. 1-34.
- NISTEP (Institut national des politiques des sciences et des technologies) (2005), « Comprehensive analysis of science and technology benchmarking and foresight », *NISTEP Report n° 99*, Institut national des politiques des sciences et des technologies, Tokyo.
- OCDE (2016a), « The next production revolution – An interim report », document interne, OCDE, Paris.
- OCDE (2016b), « Créer les conditions de la prochaine révolution de la production : l'avenir des industries manufacturières et des services – Rapport intermédiaire », établi en vue de la Réunion du Conseil de l'OCDE au niveau des Ministres, Paris, 1-2 juin, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/fr/rcm/documents/Creer-les-conditions-de-la-prochaine-revolution-de-la-production-l-avenir-des-industries-manufacturieres-et-des-services-rapport-intermediaire.pdf.
- OCDE (1996), « Government technology foresight exercises », *STI Review*, n° 17, Éditions OCDE, Paris.
- PCAST (President's Council of Advisors on Science and Technology) (2014), « Report to the President on accelerating US advanced manufacturing », *Advanced Manufacturing Partnership 2.0 Steering Committee*, President's Council of Advisors on Science and Technology, octobre, Washington, DC, pp.108, www.broadinstitute.org/files/sections/about/PCAST/2014%20amp%20report_final.pdf.
- PCAST (2012), « Report to the President on capturing domestic competitive advantage in advanced manufacturing », *Advanced Manufacturing Partnership Steering Committee*, President's Council of Advisors on Science and Technology, Washington, DC, pp. 70, www.broadinstitute.org/files/sections/about/PCAST/2012%20pcast_amp_steering_committee_report.pdf.
- Shell (2013), « 40 years of Shell scenarios », <http://s05.static-shell.com/content/dam/shell-new/local/corporate/corporate/downloads/pdf/shell-scenarios-40yearsbook080213.pdf>.
- Shin, T., S-K. Hong et H. Grupp (1999), « Technology foresight activities in Korea and in countries closing the technology gap », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 60, n° 1, pp. 71-84.
- Stanovnik, P. et M. Kos (2007), « Technology foresighting in an emerging economy: The case of Slovenia », *Economic and Business Review for Central and South-Eastern Europe*, vol. 9, n° 2, pp. 165-181.
- UT-Battelle (2007), « Productive nanosystems: A technology roadmap », www.foresight.org/roadmaps/Nanotech_Roadmap_2007_main.pdf.
- Warnke, P. (dir. pub.) (2009a), *Foresight-Prozess im Auftrag des BMBF*, Zukunftsfelder neuen Zuschnitts [Processus de prospective – au nom du ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche (BMBF), nouveaux domaines d'avenir], Fraunhofer ISI, Fraunhofer IAO, Karlsruhe, Stuttgart.
- Yokoo, Y. et K. Okuwada (2012), « Validity of foresight derived from the evaluation of past activities in Japan », *International Journal of Foresight and Innovation Policy*, vol. 8, n° 4, 296-310.

PARTIE II

Chapitre 10

Tour d'horizon international des nouvelles priorités et politiques pour la R-D industrielle en vue de la prochaine révolution de la production

par

Eoin O'Sullivan et Carlos López-Gómez

Directeur au Centre for Science, Technology & Innovation Policy (CSTI),
de l'Institute for Manufacturing (IfM), Université de Cambridge
Chef de l'Unité Policy Links, à l'Institute for Manufacturing (IfM),
Education and Consulting Services, Université de Cambridge

Le présent chapitre propose une vue d'ensemble des tendances qui voient le jour, dans le domaine de la recherche-développement (R-D) industrielle, en relation avec la prochaine révolution de la production. Il s'appuie sur un travail d'analyse réalisé sur le document des politiques publiques nationales, des exercices de prospective et des stratégies de recherche de différents pays de l'OCDE ainsi que d'autres grandes économies. De ce tour d'horizon, il ressort que la convergence (des disciplines de recherche, des technologies et des systèmes), le changement d'échelle (des technologies émergentes) et la capture de la valeur économique nationale (de l'innovation industrielle) sont des thèmes qui attirent une attention croissante des pouvoirs publics. Ce qui a permis d'élargir le périmètre et des programmes de recherche industrielle et à la mission dévolue aux établissements de recherche et d'innovation, au-delà de la recherche fondamentale. Pour les mêmes raisons, les principaux acteurs des systèmes d'innovation resserrent leurs liens et se dotent d'infrastructures nouvelles (outils, technologies génériques et installations) à l'appui de la convergence et du changement d'échelle. Des études de cas portant sur un certain nombre d'initiatives choisies viendront rendre compte de la diversité des lignes d'action adoptées par les pays mais également des contextes nationaux. Ce chapitre veut tout à la fois éclairer et stimuler le débat sur la manière dont il convient de concevoir et gérer les institutions et programmes de recherche industrielle pour servir à la prochaine révolution de la production.

Introduction

Le présent chapitre propose un examen des dernières tendances observées sur le plan des initiatives publiques de soutien à la R-D industrielle. Ces tendances sont appréciées à l'aune des priorités de la recherche technologique, des grands thèmes qui influent sur la formulation des politiques et de l'évolution des établissements et programmes de recherche quant à leurs fonctionnement et modalités. Notre propos s'appuie sur une analyse systématique d'un certain nombre de politiques publiques nationales, d'exercices de prospective et de stratégies suivies par des organismes de recherche.

Les pages qui suivent révèlent que, formulant des stratégies de R-D industrielle ajustées à la prochaine révolution de la production, les décideurs non seulement fixent l'ordre des priorités de la recherche technologique dans les domaines concernés mais encore mettent en place des institutions, programmes et initiatives pour veiller au développement, à la démonstration et à l'application des résultats de la recherche dans les systèmes industriels. Nous verrons dans ce chapitre que la convergence (des disciplines de recherche, des technologies et des systèmes), le changement d'échelle (des technologies émergentes) et la capture de la valeur économique nationale (de l'innovation dans l'industrie) sont des thèmes qui retiennent de leur part une attention croissante dans ce contexte. D'où le périmètre élargi, au-delà de la recherche fondamentale, donné aux programmes de recherche industrielle et à la mission dévolue aux établissements de recherche et d'innovation, lesquels, par ailleurs et pour les mêmes raisons, resserrent leurs liens avec les principaux acteurs des systèmes d'innovation et se dotent d'infrastructures nouvelles (outils, technologies génériques et installations) à l'appui de la convergence et du changement d'échelle.

Les décideurs s'aperçoivent qu'il faut mieux appréhender les forces qui façonnent l'avenir des industries manufacturières, avec ce qu'elles emportent comme conséquences pour la compétitivité nationale et, dans le champ politique, pour le soutien à une croissance économique tirée par ces industries (O'Sullivan et al., 2013). On constate notamment, à travers les pays de l'OCDE, une volonté renouvelée de mieux saisir comment les investissements, institutions et initiatives de R-D industrielle portés par les pouvoirs publics stimulent l'innovation avec le plus d'effet dans le contexte de la prochaine révolution de la production. Les activités de fabrication font l'objet d'un net regain d'intérêt dans les stratégies de recherche et d'innovation de pays comme les États-Unis (NEC et OSTP, 2015), l'Allemagne (BMBF, 2014a, 2014b), le Japon, (CSTI, 2015) et la République populaire de Chine (ci-après, « la Chine » ; République populaire de Chine, 2016) et d'organisations multilatérales comme la Commission européenne (CE, 2011). En outre, des études prospectives et des stratégies nationales leur ont été consacrées dernièrement par la Suède (MEI, 2016 ; Teknikföretagen, 2013), l'Australie (CSIRO, 2016) et le Royaume-Uni (Foresight, 2013 ; BIS, 2012) pour ne citer que ces quelques exemples. Certains pays encore, dont le Japon (CRDS, 2015), le Royaume-Uni (AMSG, 2016), les États-Unis (PCAST, 2014), les Pays-Bas (Holland High Tech, 2015a, 2015b, 2016) et la Chine (MIIT, 2016), ont établi des plans d'action et des stratégies détaillés à l'égard de technologies de fabrication ayant reçu un rang

de priorité élevé. Des initiatives nationales de premier plan sont par ailleurs l'objet d'une attention soutenue de la part des autorités, ainsi du programme « Industrie 4.0 », en Allemagne (Acatech, 2013), du Réseau national d'innovation industrielle (National Network for Manufacturing Innovation), aux États-Unis (AMNPO, 2013), de la stratégie Robot du Japon et du plan d'action *Made in China 2025* (Conseil des Affaires d'État, 2015).

Les priorités de la recherche en technologies de fabrication pour la prochaine révolution de la production

Les technologies susceptibles de révolutionner les activités de fabrication sont nombreuses et variées, et les effets que l'on peut attendre de chacune d'elles demeurent mal déterminés (OCDE, 2016). Il existe cependant un relatif consensus, à l'échelle internationale, quant aux grandes catégories de technologies émergentes à même de transformer radicalement l'industrie telle que nous la connaissons (IDA, 2012 ; Dickens, Keely et Williams, 2013 ; López-Gómez et al., 2013). La bioproduction, la nanofabrication, la fabrication avancée, les technologies de l'information et des communications (TIC), les matériaux avancés et les nouvelles techniques de production (par exemple, l'impression 3D) occupent aujourd'hui une large place dans les études et stratégies publiques. Définir les priorités et modalités d'exécution propres des initiatives et programmes de recherche publics se révèle toutefois être un exercice ardu en raison de la convergence des technologies et de la complexité de l'industrie moderne. Bon nombre des familles de technologies que nous venons de citer ont de vastes ramifications, font appel à des disciplines très diverses et peuvent trouver toutes sortes d'applications industrielles. Non seulement certains des grands domaines qui s'ouvrent aujourd'hui à la recherche sont par essence pluridisciplinaires mais, en plus, les nouvelles percées de la science et de l'ingénierie promettent de bouleverser les chaînes de valeur sur toute leur longueur. Comme le montrent les exemples donnés plus loin dans ce chapitre, il s'ensuit que l'action des pouvoirs publics peut porter sur une multitude de technologies de fabrication diverses et étroitement unies les unes aux autres.

Les priorités de la recherche publique liée aux activités manufacturières et la configuration de l'architecture institutionnelle varient de pays à pays selon les points forts de chacun dans les domaines de l'industrie et de la recherche (O'Sullivan, 2011, 2016). En Allemagne, par exemple, l'accent est mis sur l'intégration des technologies numériques dans les équipements de production industrielle et les « usines intelligentes », et plus particulièrement sur les systèmes embarqués, les systèmes cyberphysiques¹ et l'internet des objets (IdO), dans le cadre du programme « Industrie 4.0 » dont on a beaucoup parlé (Acatech, 2013). Au Japon, l'administration centrale a récemment insisté sur l'importance d'intégrer les applications de la robotique avancée et de l'intelligence artificielle dans l'ensemble des chaînes d'approvisionnement spécialisées (METI, 2015a, 2015b ; CSTI, 2015). Aux États-Unis, c'est le déploiement accéléré de la fabrication avancée, produits et procédés confondus, qui occupe depuis peu une place de choix dans les documents d'orientation nationaux, où l'on souligne fréquemment l'importance des nouvelles technologies nées de la recherche scientifique (PCAST, 2011, 2014).

Les grands axes des politiques industrielles orientant les priorités de la R-D

Le paysage industriel qui sert de cadre au développement et à l'application de nouvelles technologies va lui aussi en se complexifiant. De multiples relations d'interdépendance s'y nouent entre les activités, les entreprises, les technologies, les composants et les sous-systèmes, et c'est de l'interaction de ces différents éléments que procède la production de

biens et de services (PCAST, 2011 ; Tassej, 2010 ; Brecher, 2012). Il est de ce fait difficile de prédire quelle influence les nouvelles technologies (et la convergence des technologies) exerceront sur les dynamiques de création et de capture de valeur dans les différents secteurs de l'industrie. Les systèmes embarqués, par exemple, renferment une part toujours plus importante de la valeur créée dans des domaines allant de l'automobile à l'aérospatiale en passant par la fabrication de matériel médical (ARTEMIS, 2011).

Il faut compter d'autre part que diverses « mégatendances » – comme la mondialisation des chaînes de valeur, le raccourcissement du cycle de vie des produits, le numérique et l'évolution des habitudes de consommation – agissent sur les systèmes de fabrication, ne cessant de modifier les gisements de productivité (Dickens, Kelly et Williams, 2013 ; López-Gómez et al., 2013). À titre d'exemple, le développement de la demande mondiale de produits personnalisés confère un avantage commercial aux entreprises manufacturières qui, grâce à la souplesse de leur appareil productif, sont en mesure de satisfaire aux exigences de marchés de masse comme à celles de marchés de petits volumes tout en restant compétitives au niveau des coûts (Brecher, 2012, 2015).

Dans ce tissu industriel complexe et en pleine mutation, l'attention des pouvoirs publics tend de plus en plus à se cristalliser sur les thèmes de la convergence, du changement d'échelle et du maintien de la production dans des économies où les salaires sont élevés. Ces thèmes ont à leur tour une influence sur les programmes publics de R-D, les partenariats public-privé et les missions confiées aux nouvelles institutions de R-D.

Comment les pouvoirs publics adaptent-ils leur action à la prochaine révolution de la production ?

Les nouveaux programmes, institutions et initiatives de soutien à la R-D industrielle financé par les gouvernements étudiés dans le présent chapitre ont notamment ceci en commun que leur périmètre s'étend au-delà de la R-D fondamentale (pour englober, par exemple, la démonstration de prototypes, le développement des compétences et celui de la chaîne d'approvisionnement) et qu'ils accordent davantage de place à de « grands enjeux » (liés, entre autres, à la production durable, à la nanofabrication et au stockage de l'énergie). La conclusion de nouveaux partenariats de recherche et le rapprochement, au sein du système d'innovation, des programmes et initiatives de R-D, sont également mis à l'honneur, puisque l'interdisciplinarité et la collaboration interinstitutionnelle deviennent désormais une exigence explicite. De même, des efforts grandissants sont faits pour assurer une bonne coordination et une collaboration entre les institutions.

La suite du chapitre renferme plusieurs études de cas permettant à la fois d'apprécier la diversité des thématiques et des approches choisies et de mettre en lumière telle ou telle caractéristique des initiatives à grand retentissement engagées dans certains des pays considérés. Ces études de cas sont consacrées au pôle d'excellence sur la technologie de production d'intégration pour les pays à salaires élevés (*Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*, Allemagne), au réseau HVM Catapult (High Value Manufacturing Catapult) sur les activités de fabrication à forte valeur ajoutée (Royaume-Uni), à l'Institut des technologies industrielles SIMTech (Singapore Institute of Manufacturing Technologies, Singapour), à l'initiative *It's OWL* (*Intelligent Technische Systeme OstWestfalenLippe*) sur les systèmes techniques intelligents (Allemagne), au programme interministériel de promotion de l'innovation stratégique (*Strategic Innovation Promotion Programme*) du Japon et, enfin, à l'initiative sur les lignes pilotes pour les technologies clés génériques de l'Union européenne (avec les exemples de la Suède et d'un consortium belge).

La dernière partie récapitulera les principales thématiques et lignes d'action choisies par les pouvoirs publics ainsi que les grandes leçons à retenir. Il est bien précisé à cet égard que bon nombre des défis auxquels la recherche doit impérativement répondre dans la perspective de la prochaine révolution de la production présentent un caractère pluridisciplinaire et systémique toujours plus marqué. Les décideurs doivent, en conséquence, tenir compte du fait que les frontières entre les différentes disciplines de la recherche industrielle tendent à s'estomper. Ainsi, dans bien des cas, il faudra, pour relever les grands défis rencontrés, s'appuyer sur des domaines traditionnellement distincts (matériaux avancés, outils de production, TIC ou gestion des opérations, par exemple), si bien qu'il y aurait lieu de mettre en place des mécanismes propres à favoriser les projets transversaux ad hoc. Les établissements de recherche publics doivent avoir la liberté, sinon la mission, d'entreprendre des activités complémentaires en rapport avec l'innovation ou de se rapprocher d'autres acteurs du domaine.

Quelques-unes des nouvelles approches, d'ordre politique ou institutionnel, suscitées par la prochaine révolution de la production ont pris corps il y a moins cinq ans et n'ont pas encore fait l'objet d'une évaluation (ou les résultats de cette évaluation n'ont pas été rendus publics). Il y aurait lieu pour les décideurs de définir des indicateurs clés permettant d'apprécier l'efficacité des programmes de R-D industrielle et de procéder à des évaluations systémiques. Le changement d'échelle des technologies, la convergence des technologies et des activités de recherche et la complexité des systèmes rendent, à cet égard, singulièrement ardu le choix d'une grille d'appréciation. Il est possible en effet que les indicateurs traditionnels ne rendent pas justice des efforts consentis en vue de permettre des rapprochements entre institutions, consolider l'interdisciplinarité et encourager l'application de la recherche. Pour mieux évaluer les institutions et les programmes, il conviendrait peut-être de recourir à de nouveaux indicateurs, en complément de ceux déjà utilisés (comme le nombre de publications et de brevets) et en particulier dans les domaines suivants : démonstration de lignes pilotes et bancs d'essai réussis, développement des compétences des techniciens et ingénieurs, renouvellement d'adhésion à des consortiums, présence des petites et moyennes entreprises (PME) dans de nouvelles chaînes d'approvisionnement, et attraction d'investissement direct étranger (IDE).

De plus, les décideurs doivent, au surplus, être au fait des enjeux de faisabilité industrielle qui vont de pair avec le changement d'échelle des technologies issues de la science. Il est souvent indispensable d'investir dans des centres de recherche appliquée et des installations dédiées à la production de pilotes pour que les innovations passent du laboratoire à l'usine. Il est par ailleurs crucial de tisser des liens et faire naître des partenariats entre les différents acteurs de la R-D industrielle, ce en raison de l'ampleur et de la complexité des défis que la prochaine révolution de la production lance au monde de l'innovation, défis qui ne pourront être relevés que par la mobilisation de capacités et d'infrastructures disséminées entre de nombreux acteurs ; certains peuvent ainsi nécessiter de recourir aux compétences techniques et aux connaissances des ingénieurs de fabrication et chercheurs industriels, mais aussi à celles des concepteurs, des fournisseurs, des équipementiers, des techniciens d'atelier et des utilisateurs.

Par ailleurs, l'infrastructure de R-D industrielle doit judicieusement combiner outils et installations pour gérer les défis de la convergence et du changement d'échelle, ainsi que pour tirer profit des potentialités qui en découlent. Métrologie avancée, technologies de mesure en temps réel, technologies de caractérisation, d'analyse et d'essai, bases de données partagées, mais aussi outils de modélisation et de simulation n'en sont que

quelques exemples parmi d'autres. Il faut y ajouter les installations de démonstration – telles que les bancs d'essai, les lignes pilotes et les démonstrateurs d'usine, qui fournissent un environnement de recherche propice, car pourvu de la panoplie idoine d'outils et de technologies génériques – sans oublier non plus les techniciens indispensables à leur bon fonctionnement. Le programme de lignes pilotes pour les technologies clés génériques, financé par la Commission européenne, est un exemple d'initiative visant à offrir de nouvelles infrastructures d'innovation en réponses à ces défis particuliers.

Avec la prochaine révolution de la production, de nouvelles priorités se dessinent vis-à-vis des technologies de fabrication

Il existe un relatif consensus, à l'échelle internationale, quant aux grandes catégories de technologies clés émergentes susceptibles de transformer radicalement l'industrie manufacturière telle que nous la connaissons (IDA, 2012 ; Dickens, Keely et Williams, 2013 ; López-Gómez et al., 2013). La bioproduction, la nanofabrication, les TIC avancées, les matériaux avancés et les nouvelles technologies de production (ainsi l'impression 3D) occupent aujourd'hui une place à part dans les études et stratégies voulues par les gouvernements des pays de l'OCDE. Dans le contexte de la prochaine révolution de la production, donner des priorités plus précises aux programmes et initiatives financés par l'État tient de la gageure du fait de la convergence des technologies et de la complexité grandissante de nos systèmes de fabrication modernes.

Non seulement certains des grands domaines qui s'ouvrent aujourd'hui à la recherche industrielle sont par essence pluridisciplinaires, mais, en plus, les nouvelles percées de la science et de l'ingénierie pourraient bien modifier la dynamique de la compétitivité dans l'industrie et jusqu'au sein de ses secteurs d'activité. (OCDE, 2016). Les solutions aux problèmes de productivité et de compétitivité rencontrés par l'industrie se trouveront de plus en plus souvent dans la combinaison de technologies et au carrefour de multiples domaines de recherche (OCDE, 2016 ; O'Sullivan, 2011). À titre d'exemple, la production, demain, d'avions plus légers, plus silencieux et plus sobres en carburant, suppose que des efforts concertés de R-D soient fournis dans des domaines comme la modélisation aérodynamique haute-fidélité, l'usinage additif, les matériaux composites avancés, les systèmes avancés de production haute cadence de cellules d'aéronef, l'intégration des systèmes avancés, la mise au point de batteries et de réservoirs plus performants, et bien d'autres encore (AGP, 2013 ; NASA, 2016).

À cela s'ajoute que les grandes avancées de la R-D à l'égard de telle ou telle technologie sont susceptibles d'avoir de larges répercussions sur l'industrie et l'innovation, leurs activités, secteurs et domaines d'application. Pour prendre un exemple, les thématiques de la recherche sur les TIC intéressent tous les niveaux des systèmes de fabrication à travers la modélisation et la simulation de matériaux et de composants intelligents, les usines intelligentes et la fabrication additive, l'internet industriel et la planification avancée des ressources des entreprises, la fabrication et la conception numériques, et l'analytique de données massives. De même, les activités de R-D consacrées à la fabrication additive pourraient offrir une plateforme au développement d'autres technologies émergentes (tels le génie tissulaire ou les nouveaux appareils électroniques imprimés) et déboucher sur des applications dans les domaines les plus divers, de la santé à l'aérospatiale, en passant par l'automobile et les industries créatives (AMSG, 2016).

Facteur de complexité supplémentaire, la plupart des familles de technologies que nous venons d'énumérer recouvrent plusieurs sous-domaines et s'appuient sur diverses

disciplines universitaires. C'est ainsi que la recherche en matériaux avancés, domaine transversal s'il en est, bénéficie des apports de la physique de la matière condensée, de la chimie, de la biologie et de l'ingénierie des méthodes. Elle peut avoir des objets très variés, en fonction du type de matériau (alliage, semi-conducteur, céramique, etc.), de ses propriétés (optiques, magnétiques, électriques, mécaniques, etc.), de l'échelle à laquelle il est mis en œuvre (nanoscopique, microscopique, etc.) et des applications ou secteurs auxquels on le destine (par exemple l'industrie aérospatiale).

Assez naturellement, les priorités données à la recherche industrielle changent selon les pays (et les organismes nationaux de R-D) et sont le reflet des points forts et préférences stratégiques de chacun dans les domaines de l'industrie et de la recherche (O'Sullivan, 2011 ; 2016)². Pour donner une idée des différences de typologie, de terminologie et de hiérarchie que l'on peut rencontrer, les encadrés 10.1 et 10.2 reviennent sur les orientations données à l'industrie nationale dans différents pays. Plusieurs études de cas portant sur des programmes et initiatives mis en œuvre dernièrement au niveau national seront présentées en fin de chapitre.

Aux États-Unis, le débat sur les activités manufacturières se cristallise en grande partie, ces derniers temps, autour de la question de « l'industrie avancée », et l'on ne manque pas d'y souligner régulièrement l'importance des systèmes informatiques de production ou des technologies émergentes fondées sur la science (O'Sullivan et Mitchell, 2012). On insiste également sur les applications des matériaux de prochaine génération (et du génie des matériaux innovants) dans les activités de fabrication. De même, la nanofabrication et la modélisation multiéchelle du « génome des matériaux » figurent en bonne place dans les stratégies nationales. Soucieux de renforcer la coordination entre les organismes fédéraux et de définir un socle de priorités pour les activités appelant une collaboration entre secteur public et secteur privé, le gouvernement des États-Unis a voulu dresser un état des lieux de la recherche publique dans les domaines en relation avec les technologies industrielles avancées, dont l'encadré 10.1 fournit un aperçu (NTSC, 2016). L'idée était notamment de procéder à une analyse systématique des défis et opportunités techniques et de constituer un échantillon d'initiatives et de programmes fédéraux, en cours ou en projet, la priorité allant aux technologies prometteuses, c'est-à-dire celles pour lesquelles un soutien insuffisant est apporté aux activités de R-D pré-concurrentielle indispensables à l'émergence de nouvelles industries (NTSC, 2016). On trouvera un examen et une analyse plus approfondis des technologies de production considérées d'importance stratégique aux États-Unis dans différents rapports du Conseil du Président sur la science et la technologie (*President's Council of Advisors on Science and Technology*, PCAST) (par exemple, PCAST [2012, 2014]) (voir également le chapitre 11).

Au Royaume-Uni, une étude, réalisée à la demande du gouvernement, a mis en évidence les domaines techniques liés à l'industrie autour desquels il serait possible de structurer les activités de recherche conduites dans le pays (IfM, 2016). Cette étude a été précédée de la consultation de nombreuses parties prenantes, appartenant aussi bien aux milieux universitaires, qu'à la sphère publique (y compris les centres de R-D publics) ou à l'industrie elle-même. Une nouvelle typologie des domaines de recherche prioritaires a été employée, qui établit une distinction entre : i) les technologies de produit ; ii) les matériaux ; iii) la gestion/chaîne d'approvisionnement opérationnelle ; iv) les technologies génériques ; v) les techniques de production ; et vi) l'ingénierie et l'intégration des systèmes (encadré 10.2). Un examen et une analyse complémentaires des domaines technologiques importants pour l'avenir des activités manufacturières au Royaume-Uni ont été réalisés dans le cadre d'un

exercice de prospective sur l'industrie de demain (baptisé *Future of Manufacturing*) mené par le Government Office for Science, administration nationale en charge des sciences (Foresight, 2013).

Encadré 10.1. **Priorités de la R-D industrielle aux États-Unis**

Le rapport intitulé *A Snapshot of Priority Technology Areas Across the Federal Government* présente un aperçu des domaines prioritaires, au sein de l'administration fédérale, en ce qui concerne les technologies industrielles avancées. Ces domaines sont les suivants :

Domaines technologiques industriels d'importance croissante :

- fabrication de matériaux avancés
- bio-ingénierie au service des progrès de la biofabrication
- biofabrication appliquée à la médecine régénérative
- fabrication de bioproduits avancés
- production en continu de produits pharmaceutiques.

Domaines technologiques industriels dont l'importance est confirmée, y compris ceux couverts par les mandats délivrés aux instituts nationaux d'innovation industrielle :

- fabrication additive
- matériaux composites avancés
- fabrication et conception numériques
- électronique hybride flexible
- photonique intégrée
- métaux légers
- fabrication intelligente
- fibres et textiles révolutionnaires
- électronique à large bande interdite.

Autres domaines technologiques présentant un intérêt pour le Département de la Défense :

- machines-outils et systèmes de contrôle avancés
- robotique d'assistance et robotique molle
- bio-ingénierie appliquée à la médecine régénérative
- bio-impression appliquée à différents secteurs technologiques
- certification, évaluation et qualification
- protection de la filière industrielle numérique – cybersécuriser l'industrie.

Domaines technologiques présentant un intérêt pour le Département de l'Énergie :

- intensification des procédés chimiques et thermiques
- durabilité dans l'industrie
- procédés, à forte valeur ajoutée, de fabrication en bobine
- matériaux destinés à un emploi en conditions extrêmes.

Source : NSTC (2016), « Advanced manufacturing: A snapshot of priority technology areas across the federal government ».

Encadré 10.2. **Priorités de la R-D industrielle au Royaume-Uni**

Les auteurs du rapport *High Value Manufacturing Landscape 2016*, rédigé à la demande du gouvernement pour brosser une vue d'ensemble de l'industrie à forte valeur ajoutée, ont voulu inscrire dans un cadre harmonisé les activités de recherche industrielle menées dans le pays. Les thèmes transversaux et technologies de fabrication ci-après sont présentés comme prioritaires :

Technologies de produit :

- électronique
- photonique et électronique de puissance
- technologies de production d'énergie
- technologies des capteurs
- robotique avancée et autonome.

Matériaux :

- nanomatériaux et nanotechnologies
- nouveaux matériaux composites
- matériaux légers
- biomatériaux, autres matériaux nouveaux et science des matériaux.

Gestion/chaîne d'approvisionnement opérationnelle :

- innovation au niveau des chaînes d'approvisionnement et des modèles d'activité.

Technologies génériques :

- développement et gestion de logiciels
- gestion et analytique des données (massives)
- IdO
- autonomie
- mesure, métrologie, assurance et normes.

Techniques de production :

- fabrication additive/impression 3D
- techniques d'assemblage avancées
- outillage et accessoires
- ingénierie des surfaces (finition et enduction)
- rénovation
- fabrication de produits composites en grands volumes
- procédés biologiques et biosynthétiques
- génie des procédés, développement des capacités et de l'efficacité ; systèmes de contrôle.

Ingénierie et intégration des systèmes :

- conception et fabrication intégrées
- modélisation et simulation des systèmes
- interface homme-machine.

Source : IfM (2016), *HVM Landscape 2016*.

Au Japon, le gouvernement central a choisi, dans ses derniers documents d'orientation, de privilégier l'intégration de la robotique avancée et de l'intelligence artificielle (METI, 2015a ; RRRRC, 2015). Il lui est en effet apparu que le pays était bien placé pour accéder à la position de leader mondial de la robotique à l'heure de l'IdO, et il a par conséquent axé ses politiques en faveur de l'innovation industrielle sur les points suivants : la définition de normes mondiales en vue de la mise en place d'une infrastructure commune (par exemple au niveau des systèmes d'exploitation) pour l'utilisation de robots dans les ateliers de production ; l'utilisation des robots et l'accumulation de données dans divers domaines, dont celui de l'infrastructure ; et les techniques d'intelligence artificielle présentant un intérêt dans le domaine de la robotique et susceptibles de permettre la valorisation des données accumulées (RRRC, 2015). L'accent a également été mis sur les méthodes de conception et de production innovantes qui se traduisent par une plus grande satisfaction du consommateur (CSTI, 2015). La fabrication de produits destinés à une population vieillissante a par ailleurs été signalée comme pourvoyeuse potentielle d'opportunités pour les entreprises japonaises (METI, 2015b). L'encadré 10.3 donne à voir les principaux domaines prioritaires pour la R-D industrielle tels que le gouvernement les a définis dernièrement. On trouvera un complément d'information et d'analyse au sujet de ces domaines technologiques stratégiques dans les rapports sur l'industrie (*Monozukuri*) publiés chaque année par le ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie et les documents d'analyses de l'Agence japonaise de la science et de la technologie (voir, par exemple, METI [2015a] ; CRDS [2015a]).

Encadré 10.3. **Priorités de la R-D industrielle au Japon**

L'un des piliers du programme interministériel SIP est un projet appelé « technologies de conception/fabrication innovantes » qui donne la priorité aux pôles et thèmes suivants pour ce qui est de la R-D industrielle :

Optimisation des activités de conception/fabrication :

- outils de gestion de l'information au service de la conception de produits
- conception en amont fondée sur l'optimisation topologique
- dessins et modèles bio-innovants
- conception de produits personnalisés et leur fabrication par impression 3D de matériaux anisotropes
- impression 3D de pièces en caoutchouc et co-création de valeur.

Conception en amont dans un souci d'agrément du consommateur¹/fabrication :

- plateformes de modélisation 3D avancée
- plateformes de conception dans un souci d'agrément du consommateur
- gestion interactive des activités de conception en amont
- nouvelles techniques de production basées sur la fabrication additive.

Matériaux innovants et moulage 3D :

- agents adhésifs moléculaires
- impression 3D à base de gel modelable
- impression 3D à base de matériau fluide.

Moulages complexes innovants :

- nanoassemblage de matériaux avancés

Encadré 10.3. **Priorités de la R-D industrielle au Japon** (suite)

- fabrication à échelles multiples et à partir de matériaux multiples
- techniques de moulage céramique à forte valeur ajoutée
- revêtements laser à forte valeur ajoutée
- techniques de traitement avancé des éléments en verre.

Technologies d'usinage combiné et intelligent :

- machines-outils intelligentes grâce à l'intégration FAO-CN
- usinage électrochimique de prochaine génération
- tours de production à tourelle multiple.

R-D à orientation pratique :

- fusion de l'exploration des données, de la géométrie algébrique et du prototypage rapide
- application de la chimie informatique à la fabrication de matériel de sport d'hiver
- traitement des surfaces métalliques, sur la base de travaux réalisés en conditions réelles.

1. Les recherches dans ce domaine portent sur des méthodes de conception et de fabrication souples donnant des produits et des services qui offrent au consommateur un niveau de qualité et de performance supérieur (agrément).

Source : CSTI (2015), « What is the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program? », www8.cao.go.jp/cstp/panhu/sip_english/46-49.pdf.

Initiative majeure dévoilée par le Conseil des Affaires d'État de la Chine, le plan national *Made in China 2025* a pour finalité l'intégration de l'informatique et de l'industrie dans dix secteurs clés (Conseil des Affaires d'État, 2015). Y sont prévues des mesures destinées à éliminer les activités manufacturières archaïques et promouvoir l'efficacité énergétique, la protection de l'environnement et la bonne gestion des ressources (Wübbecke et al., 2016).

La stratégie *Made in China 2025* est très largement inspiré de l'initiative Industrie 4.0, engagée en l'Allemagne, et le gouvernement chinois envisage d'ailleurs la possibilité d'une coopération avec des institutions allemandes pour parvenir aux buts fixés (Wübbecke et al., 2016). *Made in China 2025* prévoit, entre autres choses, la création de centres nationaux pour l'innovation industrielle calqués sur le modèle du réseau NNMI (National Network for Manufacturing Innovation), constitué aux États-Unis. L'encadré 10.4 contient la liste des principaux secteurs et domaines technologiques industriels prioritaires. On trouvera d'autres informations et analyses au sujet de ces domaines technologiques qui revêtent une importance stratégique en Chine dans les rapports établis par l'Académie chinoise des sciences et le ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information (MIIT, 2016) (voir également le chapitre 12).

Encadré 10.4. **Priorités de la R-D industrielle en Chine**

Made in China 2025 définit dix domaines technologiques clés, élevés au rang de priorités :

Informatique de nouvelle génération :

- circuits intégrés
- équipements TIC
- systèmes d'exploitation et logiciels industriels
- équipements informatiques indispensables à la fabrication intelligente.

Encadré 10.4. **Priorités de la R-D industrielle en Chine** (suite)**Machines informatisées et robots haut de gamme :**

- machines-outils à commande numérique avancée
- robotique.

Aérospatiale et aéronautique :

- aéronefs
- moteurs
- équipements et systèmes aéroportés
- infrastructures/équipements aérospatiaux.

Équipements maritimes et navires de haute technologie :

- équipements de génie océanologique et navires de haute technologie
- systèmes et composants critiques.

Équipements avancés de transport ferroviaire :

- équipements avancés de transport ferroviaire.

Véhicules à énergies nouvelles et véhicules économes :

- véhicules économes
- véhicules à énergies nouvelles, y compris les batteries et moteurs innovants
- véhicules intelligents.

Équipements énergétiques :

- génératrices
- équipements de transport et de transformation de l'électricité.

Machines agricoles :

- équipements agricoles.

Nouveaux matériaux :

- matériaux de base avancés, par exemple, textiles et acier
- matériaux stratégiques essentiels, par exemple, alliages spéciaux, fibres et composites haute performance
- nouveaux matériaux de pointe, par exemple, matériaux et métamatériaux obtenus par impression 3D.

Biopharmacie et équipements médicaux sophistiqués :

- équipements médicaux de gamme intermédiaire et supérieure.

Source : Conseil des Affaires d'État (2015), 中国制造 2025 [Made in China 2025].

Grands axes des politiques industrielles orientant les priorités et programmes de R-D dans la perspective de la prochaine révolution de la production

Au-delà des orientations de la R-D industrielle dont nous avons parlé plus haut, et avec en toile de fond la complexité croissante des systèmes de production modernes, les politiques nationales de recherche associées à la prochaine révolution de la production sont façonnées par un certain nombre de thématiques communes. Citons, parmi celles-ci, la convergence des domaines de recherche, des technologies et des systèmes ; le

changement d'échelle des technologies émergentes ; et le maintien d'une activité manufacturière dans les économies à salaires élevés.

Le paysage industriel qui sert de cadre au développement et à l'application de nouvelles technologies va lui aussi en se complexifiant. À la différence du modèle d'intégration verticale qui prévalait au XX^e siècle, de multiples relations d'interdépendance se nouent aujourd'hui entre les activités, les entreprises, les technologies, les composants et les sous-systèmes, l'interaction de ces différents éléments permettant la production de biens et de services (PCAST, 2011 ; Tasse, 2010 ; Brecher, 2012). Aussi devient-il de plus en plus difficile de délimiter les contours du secteur manufacturier³. Cette complexité grandissante amène un élargissement du champ ouvert à l'innovation industrielle et une diversification des modes de capture de la valeur issue des activités de fabrication. Prenons l'exemple de l'automobile : de nos jours, celle-ci tend à devenir un système électronique complexe qui compte des dizaines de microprocesseurs et autres éléments empruntés aux TIC (Kurfess, 2011), ainsi que plusieurs millions de lignes de code (METI, 2010). Il s'ensuit que des fournisseurs de technologies non traditionnelles, comme les systèmes embarqués, captent une part croissante de la valeur créée, non seulement dans le secteur automobile mais dans d'autres également (ARTEMIS, 2011).

Plusieurs mégatendances agissent sur ces systèmes, modifiant constamment les gisements de compétitivité des entreprises manufacturières (Dickens, Kelly et Williams, 2013 ; López-Gómez et al., 2013). Certaines parmi elles affectent l'activité industrielle dans son ensemble, ainsi de la complexification et de la mondialisation de la production ; du raccourcissement phénoménal des cycles de fabrication sous l'effet de l'accélération de l'innovation technologique ; et de la production durable, procédant d'un usage efficient des ressources, qui tend à devenir un impératif. Comme nous l'avons dit plus haut, et comme la suite du chapitre en donnera l'illustration, la progression de la demande de produits manufacturés personnalisés confère un avantage, sur le plan commercial, aux entreprises qui se montrent capables de mettre en place des systèmes de production souples, aptes à alimenter des marchés de masse comme de petits volumes (Brecher, 2012, 2015).

Cette complexité systémique, conjuguée au relatif manque de maturité de différentes technologies génériques, suscite des problèmes inédits lorsqu'il s'agit de procéder au changement d'échelle et à l'industrialisation de nouveaux produits et des services connexes. Les décideurs doivent former des institutions, programmes et initiatives propres à autoriser le développement, la démonstration et l'application des produits de la recherche dans des systèmes industriels toujours plus complexes. L'enjeu n'est pas seulement d'exploiter les généreux filons de valeur ajoutée que l'on devrait trouver à la convergence des technologies et des systèmes mais aussi de faire en sorte que ces produits soient déployés sur une grande échelle et appliqués aux systèmes industriels, tout en veillant, au niveau national, à ce que ceux-ci soient en mesure de capter la valeur créée.

La convergence

Des technologies de première importance, comme les TIC avancées (systèmes cyberphysiques, données massives, IdO), les biotechnologies industrielles et les nanotechnologies, pourraient bien transformer du tout au tout les systèmes mondiaux de fabrication dans les décennies à venir (OCDE, 2015, 2016). C'est vraisemblablement la convergence de ces technologies et des systèmes qui en sont issus qui sera le moteur de la prochaine révolution de la production.

Les politiques et stratégies nationales de recherche et d'innovation en production témoignent d'une attention plus marquée portée au rôle de la convergence. Cette notion, toutefois, sert à désigner un phénomène qui concerne une multitude d'éléments différents, puisqu'il s'applique, entre autres, aux domaines de recherche, aux technologies émergentes, aux éléments de l'appareil industriel dans son ensemble ainsi qu'aux mondes numérique et physique. L'encadré 10.5 revient sur ces diverses formes de « convergence » qui se manifestent dans le contexte de la prochaine révolution de la production et en indique brièvement les implications pour les décideurs.

Encadré 10.5. La « convergence » à l'heure de la prochaine révolution de la production

La **convergence des disciplines de recherche**, et tout particulièrement à l'égard des travaux menés à l'échelle nanoscopique en science des matériaux, physique de la matière condensée et biologie, a fait l'objet d'une attention soutenue de la part des responsables de la politique d'innovation (Roco et al., 2002). La **convergence des technologies**, notamment des technologies clés génériques, telles que les nanotechnologies, les biotechnologies, les matériaux avancés et les TIC, a débouché sur l'intégration, au niveau des appareils, de technologies dont l'association offre de nouvelles fonctionnalités et applications (Roco et al., 2013 ; CE, 2015a). La **convergence des systèmes**, avec notamment les nouveaux modes de mise en réseau et l'intégration de différentes composantes des systèmes industriels et d'infrastructure (transports, réseaux de distribution d'électricité, usines et réseaux de production), résulte quant à elle de la **convergence des technologies de l'information et des communications**. Si la convergence fait partie intégrante du discours politique général sur la science, la technologie et l'innovation (G20, 2016 ; Midest, 2016; OCDE, 2015), ce n'est que tout récemment que l'on a commencé à s'intéresser à son rôle dans la prochaine révolution de la production. Dans cette optique, ses aspects ci-après ne sont pas sans conséquence pour les priorités et programmes des pouvoirs publics dans le domaine de la R-D industrielle.

- **La convergence des technologies clés génériques (et les défis associés à l'application de ces technologies à l'échelle industrielle).** Bon nombre de produits et systèmes de fabrication à forte valeur ajoutée reposeront demain sur toute une gamme de technologies (par exemple, les matériaux, avancés, les nanotechnologies, les biotechnologies et les TIC avancées) dont la combinaison et l'intégration pourrait bien susciter une multitude de nouvelles applications et de nouveaux marchés. Certaines des technologies au plus fort potentiel révolutionnaire sont fondées sur la convergence, comme les technologies quantiques (au carrefour du numérique et des matériaux avancés) ou la biologie synthétique (à la confluence du numérique et des sciences du vivant). La complexité du système et le manque de maturité de ces technologies mettent des obstacles inédits à l'industrialisation de nouveaux produits. Si les technologies convergentes peuvent offrir des fonctionnalités originales, il n'est pas exclu que celles-ci se révèlent difficilement compatibles avec des procédés de fabrication traditionnels ou des cadences de production élevées. Les politiques (et études) technologiques et les investissements dans l'infrastructure d'innovation (avec, par exemple, la création de lignes pilotes) en relation avec la prochaine révolution de la production devront répondre à ces problèmes de complexité, de changement d'échelle et de maturité industrielle.
- **La convergence des technologies de production (au sein de systèmes hybrides de production)** serait en mesure de soutenir des activités manufacturières à forte valeur ajoutée dans les pays où les salaires sont élevés. C'est le cas notamment des systèmes avancés, qui combinent de multiples procédés au cours d'une même étape de fabrication

Encadré 10.5. La « convergence » à l'heure de la prochaine révolution de la production (suite)

ou mettent en œuvre différentes technologies de production et qui peuvent être utilisés pour élaborer des produits destinés aussi bien à des marchés de niche à forte valeur ajoutée qu'à des marchés de masse grâce aux économies d'échelle et à une planification simplifiée. Ces systèmes hybrides peuvent aller de pair avec un raccourcissement des chaînes de valeur du fait du remplacement de diverses étapes de fabrication par des procédés uniques, facilitant par là même l'organisation de la production. Ils superposent des domaines techniques différents, par exemple le génie matériel (coupe, tournage, formage, pressage) et les TIC, la mécatronique, les technologies de mesure et les technologies de détection. Dans le cas des économies avancées, il conviendrait de garder à l'esprit, au moment d'arrêter les politiques industrielles et les priorités de la R-D, que les investissements de R-D peuvent soutenir le développement de tels systèmes de fabrication, susceptibles d'être compétitifs même là où les salaires sont élevés.

- **La convergence des systèmes de fabrication (grâce aux TIC avancées et aux systèmes cyberphysiques)** ouvre la possibilité d'une association plus étroite et d'une meilleure mise en relation des systèmes de production, des fournisseurs et des consommateurs. Cette convergence permettra un développement plus rapide de nouveaux produits (souvent plus « intelligents »), une organisation plus efficace de la logistique et un élargissement de l'offre de produits et services personnalisables. Les TIC avancées rendent possibles l'intégration et la convergence des activités de fabrication au regard de trois dimensions : i) verticale – par l'intégration, entre autres, des outils, cellules de travail et lignes de production (que recouvre souvent la notion « d'usines intelligentes ») ; ii) horizontale – par l'intégration des chaînes de valeurs et réseaux interentreprises (ou « chaînes de valeur intelligentes ») ; iii) au long du cycle de vie des produits – par l'intégration d'activités d'ingénierie numérique de bout en bout sur toute la chaîne de valeur. Ces problématiques liées à la convergence des systèmes devront être prises en considération, dans les politiques de R-D au service de la prochaine révolution de la production, lorsqu'il s'agira d'apprécier les opportunités qui s'ouvrent à l'industrie nationale, les points forts et points faibles des capacités d'innovation dans ces domaines et les conséquences à en tirer sur le plan des priorités de la recherche.

L'un des principaux aspects de la convergence qu'il y a lieu de retenir de ce tour d'horizon a trait aux technologies et systèmes issus des TIC. Une place de choix est réservée à l'intégration des systèmes cyberphysiques (logiciels et capteurs embarqués, systèmes de mesure et de contrôle avancés) et de l'IdO aux niveaux des opérations et systèmes de fabrication. De nouveaux systèmes de « fabrication intelligente » peuvent être coordonnés, via l'internet, tout au long des chaînes de valeur, avec à la clé un développement rapide de nouveaux produits, des gains d'efficacité sur le plan de la logistique et un essor des produits et services personnalisés.

La transformation numérique des activités de fabrication ne se limite pas à l'introduction de nouvelles technologies liées aux TIC dans le milieu industriel. Il s'agit bien davantage d'un phénomène transversal qui bouleverse les systèmes industriels à tous les niveaux tandis qu'il rapproche les entreprises, les technologies et les capacités de production. L'essor du numérique dans les systèmes de fabrication donne accès à un volume croissant de données et ouvre de nouveaux débouchés commerciaux aux fabricants. La recherche industrielle bénéficie quant à elle des outils mis à sa disposition par les nouvelles applications TIC.

Le changement d'échelle des technologies innovantes

L'un des grands thèmes abordés dans les documents d'orientation internationaux sur l'industrie (et l'innovation industrielle) que l'on s'est proposé de passer en revue dans le présent chapitre est celui du changement d'échelle et de l'industrialisation des technologies innovantes (PCAST, 2014 ; CE, 2015b). La notion de « changement d'échelle » comprend des incidences stratégiques sur diverses activités d'innovation puisque cette mutation peut concerner, entre autres, une technologie nouvelle, un produit technologique, les activités et la structure d'une entreprise manufacturière, voire les chaînes de valeur ou les marchés associés à un produit. Qui plus est, les politiques en relation avec les différents aspects du phénomène sont d'ordinaire traitées séparément, les programmes s'y rapportant étant confiés à des organismes distincts. L'une des caractéristiques les plus frappantes des nouveaux programmes consacrés au changement d'échelle (illustrée dans plusieurs des études de cas qui suivront) est qu'ils manifestent une volonté de fournir un soutien intégré aux différentes activités d'innovation, et de faciliter l'interconnexion et la coordination de celles-ci.

La notion de « changement d'échelle » est employée de façon polysémique dans les différents documents d'orientation étudiés aux fins du présent chapitre, l'accent étant mis sur telles ou telles activités d'innovation ou de production. On revient plus longuement sur cet aspect sémantique dans l'encadré 10.6, où il est du reste proposé d'adopter une acception plus large et uniforme à même de faciliter la formulation de politiques dans ce domaine. Le rapport sur l'accélération de l'industrie avancée (*Accelerating US Advanced Manufacturing*) publié aux États-Unis offre une définition utile et concise de ce qu'est le « changement d'échelle » (PCAST, 2014) :

Le changement d'échelle peut se définir comme le processus par lequel une innovation se mue en un marché. Cette phase n'est pas sans comporter d'importants risques, techniques et commerciaux, pour les nouvelles technologies industrielles. Leur succès commercial suppose que leur application à grande échelle donne des résultats satisfaisants et que des marchés se développent pour permettre l'écoulement des produits fabriqués en série. C'est alors qu'il faut établir des chaînes d'approvisionnement, susciter une demande et déployer des capitaux.

Le changement d'échelle des technologies émergentes (matériaux avancés, biotechnologies, nanotechnologies, etc.) est une priorité des politiques de recherche industrielle qui se retrouve dans l'ensemble des pays couverts par la présente étude. Nombre des programmes adoptés dernièrement par les pouvoirs publics pour accompagner ce processus à l'égard de technologies révolutionnaires fondées sur les sciences mettent en vedette la faisabilité industrielle, laquelle peut réclamer de nouvelles solutions à la R-D, et nécessiter des outils, des technologies de production et des installations nouvelles pour servir au développement, à la mise à l'essai et à la démonstration d'applications émergentes. Plusieurs pays notamment ont choisi d'investir dans des centres de recherche appliquée et des sites pilotes de production dont la mission est de faire passer les innovations du laboratoire à l'usine. C'est le cas par exemple des établissements liés aux instituts pour l'innovation dans l'industrie avancée, aux États-Unis (*Manufacturing USA*), du réseau HVM Catapult, au Royaume-Uni, et de l'initiative des lignes pilotes pour les technologies clés génériques (TCG), financée par la Commission européenne. Nous reviendrons plus longuement sur les caractéristiques de certains de ces instituts et programmes dans les études de cas qui leur sont consacrées dans la section suivante.

Encadré 10.6. Le « changement d'échelle » à l'heure de la prochaine révolution de la production

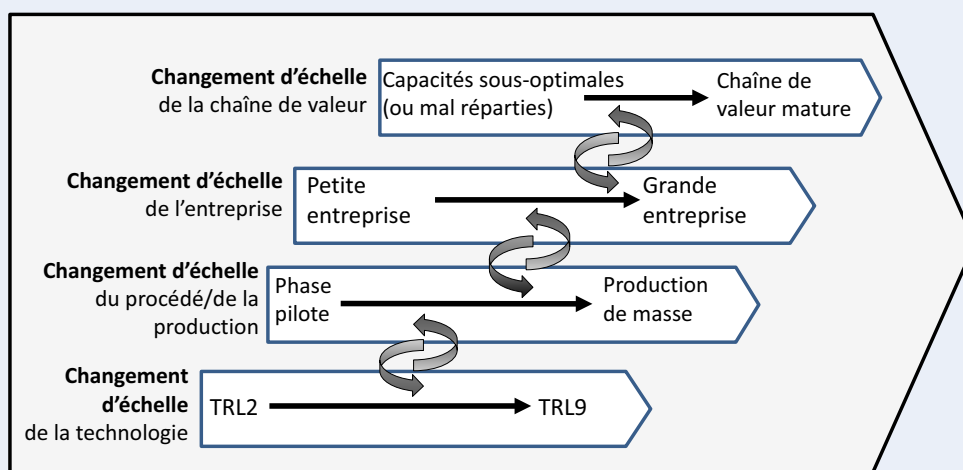
À dresser l'état des lieux des politiques et programmes récents dans le domaine de la R-D industrielle, on s'aperçoit que la notion de « changement d'échelle » doit se concevoir de manière plus large et qu'il y a lieu de mieux coordonner et synchroniser l'action menée par les pouvoirs publics au regard de ses différentes dimensions. Parmi celles-ci, il apparaît notamment judicieux de distinguer les suivantes, figurées au graphique 10.1 :

- **Changement d'échelle du développement de technologies.** Pour beaucoup des technologies émergentes prometteuses mises à l'honneur dans les stratégies internationales de recherche industrielle (biologie de synthèse, technologies quantiques, graphène, etc.), la mise au point de produits novateurs s'accompagne, au plan technique, de fortes incertitudes et de sérieux risques car il s'agit de transformer un prototype de laboratoire en un article de démonstration intégré et conditionné, apte à la production en série. Il faut notamment franchir différents niveaux de maturité technologique¹. Un tel processus de développement peut donner beaucoup de fil à retordre lorsqu'il est appliqué à des appareils reposant sur des technologies convergentes : il arrive en effet qu'un procédé de fabrication adapté à l'une de ces technologies soit préjudiciable au bon fonctionnement d'une autre.
- **Changement d'échelle du procédé ou de la production.** Les activités de R-D en relation avec le changement d'échelle ne se cantonnent pas à l'innovation en technologies de produit ; une part importante d'entre elles doit être consacrée à l'élaboration de nouveaux procédés de fabrication (par exemple, la fabrication additive et les procédés laser) ou à l'adaptation de techniques et procédés existants à la production de nouvelles technologies clés génériques. Les technologies et procédés nouveaux, pour beaucoup d'entre eux, doivent faire la preuve de leur fonctionnalité, de leur applicabilité et de leur efficacité par rapport aux coûts avec des volumes et cadences de production importants et dans des conditions proches de celles d'une ligne de fabrication industrielle. Les programmes de lignes pilotes, les infrastructures de démonstration et d'essai et les institutions de R-D intermédiaire sont susceptibles de jouer un rôle clé de ce point de vue.
- **Changement d'échelle de l'entreprise.** À mesure que l'innovation technologique évolue de la mise au point de prototypes, destinés à des applications de niches ou à des applications spécialisées, vers des marchés de plus en plus larges, les entreprises doivent renforcer leurs moyens techniques et opérationnels, ainsi que leur structure administrative, ce qui n'est pas une mince affaire pour les petites entreprises innovantes. Une entreprise qui change d'échelle a été définie (Coutu, 2014) comme une entreprise dont le taux moyen annualisé de croissance ou de rotation des effectifs est supérieur à 20 % au cours des trois dernières années (et qui comptait plus de dix salariés au début de la période considérée). Trouver des recrues qui leur apportent les compétences dont elles ont besoin, se rendre à même de prétendre à la première place, accéder aux consommateurs sur le marché national et les marchés étrangers, obtenir une solution de financement adéquate et se familiariser avec les structures en place sont au nombre des défis que doivent relever les petites entreprises industrielles en plein essor (Coutu, 2014).
- **Changement d'échelle de la chaîne de valeur.** L'application effective d'une technologie émergente en milieu industriel nécessite également la mise en place de nouvelles chaînes de valeur – soit le développement et la redistribution des capacités liées à la fabrication d'une manière adaptée aux nouveaux produits, modèles économiques et marchés. Dans le cadre de la prochaine révolution de la production, le changement d'échelle des innovations dans les secteurs manufacturiers supposera probablement une coopération de tous les acteurs de la chaîne de valeur industrielle : les fournisseurs

Encadré 10.6. Le « changement d'échelle » à l'heure de la prochaine révolution de la production (suite)

de matériaux (et de composants/sous-systèmes) mis en œuvre dans le processus de production et les équipementiers/fournisseurs d'outillage doivent en effet synchroniser leurs activités d'innovation et entretenir des liens étroits avec les utilisateurs finaux. Un rôle clé peut revenir à cet égard aux programmes de mise en relation, aux institutions et aux mécanismes de diffusion (par exemple, aux établissements de R-D intermédiaire, aux organismes de diffusion et aux plans d'action technologiques).

Graphique 10.1. Le changement d'échelle et ses multiples dimensions



Source : Analyses des auteurs.

1. L'échelle dite des TRL (*technology readiness level*) est fréquemment employée pour exprimer le niveau de maturité d'une technologie (CE, 2015). Ses niveaux 4 à 7 intéressent tout particulièrement le changement d'échelle, puisqu'ils recouvrent des activités de R-D consistant notamment en la validation d'une technologie dans un environnement représentatif, la démonstration d'un prototype dans un environnement représentatif et la démonstration d'un prototype de système dans un environnement opérationnel.

L'attention portée au changement d'échelle pourrait bien croître encore du fait de la concurrence et du progrès technologique soutenus amenés par la prochaine révolution de la production, qui met les décideurs dans l'urgence de réduire l'écart qui existe entre la R-D et le déploiement des innovations liées à l'industrie avancée et de faciliter un changement d'échelle et une mise sur le marché rapides des technologies connexes (PCAST, 2012). Cela suppose, du même coup, que l'on rende plus efficiente la démonstration de la faisabilité technique et industrielle des produits incorporant des technologies nouvelles. Comblar le fossé entre l'accumulation de connaissances et la mise sur le marché de produits avancés et de procédés de fabrication innovants est un objectif qui figure en bonne place à l'ordre du jour des politiques internationales. Au Royaume-Uni, par exemple, plusieurs des centres Catapult institués dans le pays ont pour mission de répondre aux défis que le changement d'échelle peut présenter dans des domaines comme la production à forte valeur ajoutée, les thérapies cellulaires et les applications satellites, et de trouver des solutions qui permettent une prompte commercialisation, sur de vastes marchés, d'une large gamme de produits (Innovate UK, 2015 ; Hauser, 2010, 2014).

L'activité manufacturière dans les économies à salaires élevés

Les auteurs de récentes analyses de l'activité manufacturière au niveau national s'attachent à dégager les éléments qui, au sein des systèmes industriels modernes, sont à même de capturer une valeur significative pour l'économie du pays. Dans la zone OCDE plus qu'ailleurs, on a débattu des caractéristiques qui doivent être celles des technologies et systèmes de production pour que l'activité manufacturière demeure compétitive dans des économies où les salaires sont élevés.

Outre l'automatisation et l'application des TIC avancées dans l'ensemble des systèmes de fabrication, le phénomène de convergence des technologies associé à la prochaine révolution de la production ouvre de nouvelles possibilités d'accroître considérablement la productivité industrielle et de réduire non moins considérablement la longueur des chaînes d'approvisionnement (Schuh et al., 2014). Ainsi certaines technologies novatrices permettant de combiner plusieurs étapes de fabrication laissent présager un raccourcissement sensible des temps de production. C'est le cas des centres d'usinage hybride : le traitement thermique par laser s'y effectue concomitamment à une autre opération d'usinage, d'où un très appréciable gain de temps lors des changements de séries (RWTH, 2015). Les applications de la fusion sélective par laser (SLM, *selective laser melting*), alliées aux outils de conception avancée, autorisent des productions en petits volumes et leur épargnent les coûts élevés traditionnellement liés aux temps de mise en course et de changement de séries. Ces solutions présentent un intérêt indéniable à l'heure où la demande de produits personnalisés suit une pente ascendante (Brecher, 2015 ; Klocke, 2009) et l'on veut croire qu'elles rendront possible le maintien de certaines activités de production dans les pays à salaires élevés. Comme nous le verrons plus loin dans le présent chapitre, l'une des principales raisons d'être du pôle d'excellence allemand dédié aux technologies de production intégrative est justement le développement de solutions grâce auxquelles les opérations à forte valeur ajoutée puissent continuer de s'effectuer dans ces pays, dont l'Allemagne fait partie (RWTH, 2015).

Le potentiel disruptif de certaines technologies émergentes à l'égard du mode de distribution de leurs produits par les fabricants, des relations avec la clientèle et des modalités des transactions est une autre thématique mise en avant dans quelques documents d'orientation. Les entreprises reposant sur des plateformes numériques (telles celles fournies par Google ou Amazon), en particulier, devraient, selon toute vraisemblance, jouer un rôle important dans la capture de la valeur créée par les activités manufacturières. Il n'est pas exclu qu'elles se révèlent être des concurrentes ou des partenaires potentielles pour les entreprises de production traditionnelles (CRDS, 2015b). Le gouvernement du Japon s'est employé à identifier les domaines dans lesquels des recherches pluridisciplinaires devront être menées pour appréhender et caractériser les entreprises-plateformes permettant aux fabricants japonais de capturer la valeur issue de leurs activités sur le territoire national (CRDS, 2015a).

Il importe de noter que divers documents d'orientation soulignent que les percées technologiques associées à la prochaine révolution de la production sont susceptibles de permettre la capture de valeur non seulement dans les secteurs dits de pointe mais aussi dans d'autres industries plus traditionnelles (IDA, 2012). On escompte que, par leur conversion aux nouvelles technologies, certaines de ces industries trouvent le moyen de conserver leur viabilité dans les pays à salaires élevés, même face à une concurrence internationale plus intense. Le consortium *It's OWL*, dont nous reparlerons plus loin, nous

donne une bonne illustration des travaux de recherche menés dans le but de favoriser l'utilisation de ces technologies liées à la prochaine révolution de la production dans de telles branches d'activité.

Nouvelles formes et modalités de l'action publique face à la prochaine révolution de la production

Le passage en revue des mesures adoptées par les pouvoirs publics face à la prochaine révolution de la production permet d'observer des tendances nouvelles dans la manière de concevoir certains programmes, institutions et initiatives de premier plan censés répondre aux défis de plus en plus complexes associés à la R-D industrielle. On remarque ainsi que le périmètre de la mission d'innovation tend à s'élargir (pour inclure des activités au-delà de la recherche fondamentale en technologie) ; que l'on insiste davantage sur les nouveaux partenariats et liens noués en matière de recherche (pour créer des synergies entre les acteurs de la recherche et établir des relations avec les parties prenantes industrielles les plus diverses) ; et qu'un surcroît d'attention est porté aux nouvelles infrastructures d'innovation (l'objectif étant de disposer de tous les outils, équipements et installations nécessaires à la prochaine révolution de la production). Après un bref exposé de ces différentes tendances, les exemples d'études de cas seront présentés dans la suite du chapitre rendront compte de la diversité des approches nationales et des contextes dans lesquels ces approches s'inscrivent. Nous voulons croire qu'ils contribueront à alimenter les discussions et à encourager au débat à propos de la forme et du mode de gestion qu'il convient de donner aux institutions et programmes relatifs à l'industrie dans le contexte de la prochaine révolution de la production.

Les fonctions dévolues aux instituts de R-D industrielle, au-delà de la recherche fondamentale

L'une des caractéristiques les plus marquantes des politiques et stratégies nationales d'adoption récente dans le champ de la R-D industrielle est la mise en place de programmes et d'institutions dont les fonctions ne se limitent pas au domaine de la recherche fondamentale. Parmi ces fonctions, on citera les suivantes : le développement de compétences avancées ; l'accès à des équipements spécialisés et aux conseils d'experts (en particulier pour les PME) ; la mise à disposition de bancs d'essai pour éprouver les nouveaux produits et procédés de production ; la mobilisation des parties prenantes et la création de réseaux. Au surplus, certaines de ces institutions, avec le concours d'agences de développement économique, mettent leurs capacités techniques au service de l'attraction d'IDE et du développement régional.

Le choix et l'articulation de leurs nouvelles fonctions et activités par les institutions nationales de R-D industrielle dépendent des missions qui leur sont confiées. La tendance étant aujourd'hui aux missions dictées par des enjeux spécifiques, le champ d'action des institutions déborde de plus en plus souvent celui des seules recherches nécessaires en réponse à ces enjeux. De fait, face à certains défis socioéconomiques en rapport, par exemple, avec le vieillissement, la durabilité, l'énergie et la mobilité – aujourd'hui points de mire de certaines stratégies d'innovation et institutions de R-D industrielle⁴ – il faut avoir recours non seulement à la recherche mais aussi à un vaste ensemble d'activités d'innovation complémentaires.

On prend également de plus en plus garde à ce que la recherche liée aux activités manufacturières vise à répondre à des problèmes intéressant l'industrie dont la recherche

pure ne saurait fournir la clé à elle seule. Un exemple de ce genre nous est donné par l'ATI (Aerospace Technology Institute), créé depuis peu au Royaume-Uni. Comme indiqué dans l'encadré 10.7, afin de contribuer à répondre aux défis de l'innovation dans le secteur aérospatial, l'ATI a été investi d'une mission qui va au-delà du simple financement de la R-D (BIS, 2016 ; ATI, 2016).

Encadré 10.7. **L'Aerospace Technology Institute (ATI) au Royaume-Uni**

L'ATI a été créé en 2013 en application de la stratégie nationale de développement industriel d'alors (BIS, 2016 ; ATI, 2016), stratégie qui faisant de l'aérospatiale l'un des principaux bénéficiaires d'une aide publique coordonnée portant sur la R-D, les compétences, l'accès aux moyens de financement et les marchés publics. Centre virtuel auquel appartiennent des chercheurs issus du monde universitaire et des experts du secteur de l'aérospatiale, épaulés par un petit noyau administratif, l'ATI a pour mission de faire du Royaume-Uni l'un des principaux acteurs de l'innovation dans les domaines clés que sont l'aérodynamique, la propulsion, les aérostructures et les systèmes avancés. Il mène un programme axé sur la recherche et la technologie (programme ATI R&T), couplé à un investissement conjoint de l'État et du secteur privé en faveur de la compétitivité du pays dans les domaines de la conception et de la production aérospatiales, qui porte essentiellement sur des défis de grande envergure, à relever à moyen et long termes, concernant la technologie et les capacités. Il a aussi pour rôle de fournir à l'industrie aérospatiale et aux pouvoirs publics des analyses techniques de haut niveau. Le programme ATI R&T recouvre également le subventionnement de projets de recherche jusqu'à hauteur de 50 % de leur valeur totale et de projets d'investissement en capital, jusqu'à hauteur de 100 % des sommes investies.

Source : ATI (2016), « Raising ambition: Technology strategy and portfolio update 2016 ».

Il va de soi que l'éventail des fonctions adoptées par les institutions nationales dépend de la situation de l'innovation dans le pays et des enjeux technologiques et industriels propres à celui-ci. À titre d'exemple, dans les pays dépourvus de grands laboratoires de métrologie, il faudra dans doute que de nouvelles institutions développent leurs propres fonctions avancées de mesure et d'essai. De même, les pays où il n'existe pas d'organisme de conseil aux industries – comme le partenariat de vulgarisation industrielle (*Manufacturing Extension Partnership*) aux États-Unis – devront probablement, aux fins de leur mission générale d'innovation, désigner qui se chargera de ce rôle vis-à-vis des petites entreprises manufacturières (par exemple en ce qui concerne les stratégies d'innovation, l'amélioration des procédés, la valorisation de la main-d'œuvre et les normes à respecter).

Exemple de ces nouvelles fonctions dévolues aux institutions nationales, le développement des compétences industrielles fait de plus en plus fréquemment l'objet d'une attention toute particulière de la part des centres publics de recherche, ainsi des centres Catapult au Royaume-Uni ou des établissements du réseau Manufacturing USA. Cela se traduit, entre autres, par l'organisation de formations à destination de jeunes scientifiques et de salariés du privé. Des programmes sont parfois définis de telle sorte que, dans des domaines scientifiques et techniques émergents de quelque importance, la formation dispensée se rapproche par certains aspects de celle d'une école doctorale (ainsi les *Centres for Doctoral Training*, au Royaume-Uni et l'initiative allemande en faveur de l'excellence dans les écoles doctorales).

Liens et partenariats entre parties prenantes de la R-D industrielle

Si les décideurs en matière de recherche et d'innovation s'intéressent aux partenariats public-privé depuis bien des années, les programmes et initiatives publics de recherche industrielle insistent aujourd'hui plus qu'hier sur la nécessité de faciliter les rapprochements entre les acteurs intéressés dans l'ensemble des systèmes de production.

Considérant l'ampleur et à la complexité des défis de la prochaine révolution de la production, les diverses capacités et infrastructures dont on aura besoin pour relever chacun d'eux risquent d'être disséminées parmi un large éventail d'acteurs. Plusieurs domaines technologiques sont, individuellement, d'importants moteurs de cette révolution, mais celle-ci n'en sera pas moins portée également par la convergence de bon nombre d'entre eux (OCDE, 2016). C'est pourquoi les responsables des politiques de recherche industrielle s'attachent désormais à renouveler les programmes et institutions dans le but de réunir une panoplie idoine de capacités et d'installations de recherche et d'innovation et de nouer des partenariats judicieux.

Certains des défis auxquels la R-D industrielle se heurte nécessiteront d'avoir recours aux compétences techniques et aux connaissances d'acteurs très divers, non seulement celles des ingénieurs de fabrication et des chercheurs industriels, mais aussi celles des concepteurs, des fournisseurs, des équipementiers, des techniciens d'atelier et des utilisateurs. De la même manière, les défis rencontrés par la recherche pourront réclamer la mobilisation d'installations, d'outils et de connaissances spécialisées au-delà de ce que chaque groupe ou institut est capable de fournir individuellement, mais qu'une large collaboration – par exemple entre les centres de recherche universitaires, les laboratoires nationaux, les organismes technologiques de recherche (OTR) et les laboratoires de métrologie – doit permettre d'obtenir. Ainsi au Royaume-Uni, le réseau HVM Catapult est constitué de centres aux domaines de spécialisation distincts qui collaborent autour de problèmes graves et complexes nécessitant l'emploi conjoint de technologies et de capacités variées.

Au demeurant, la conclusion de vastes partenariats qui, en plus de couvrir les sciences de l'ingénieur et les sciences physiques, s'étendent aussi aux écoles de commerce et aux sciences sociales de manière à bien éclairer les incidences que peuvent avoir, dans les deux domaines en question, les innovations technologiques, ne manquerait pas d'apporter de la valeur ajoutée à la recherche industrielle. Des études japonaises ont d'ailleurs souligné dernièrement l'importance de la coopération entre les spécialistes de différentes disciplines, parmi lesquelles les sciences de l'ingénieur, les sciences humaines et les sciences sociales, en ce qu'elle aide à conceptualiser et développer les entreprises-plateformes qui fourniront demain des produits manufacturés et des services connexes (CRDS, 2015a). Diverses initiatives d'introduction récente, telle celle des centres d'innovation au Japon, sont censées donner lieu à la formulation de programmes de recherche pluridisciplinaire au titre de leur volet socioéconomique, sinon conformément aux objectifs qui leur sont associés, l'idée étant de favoriser les relations de collaboration avec des chercheurs en sciences sociales ou humaines (JST, 2014).

On observe de même un redoublement des efforts consentis pour améliorer la collaboration et la coordination entre les organismes et entre les institutions. Divers programmes de financement de centres de recherche universitaire, par exemple celui des Centres pour l'industrie innovante (Centres for Innovative Manufacturing), au Royaume-Uni, exigent de leurs bénéficiaires qu'ils travaillent de façon collégiale avec d'autres institutions

de premier plan (des instituts de R-D industrielle, comme les centres Catapult, des laboratoires nationaux et des organismes nationaux de normalisation) et usent de leur influence auprès d'autres parties prenantes, en plus de coopérer avec elles, pour donner à leurs travaux des répercussions plus immédiates (EPSRC, 2014, 2015). D'autres programmes encore, c'est le cas de l'initiative allemande relative aux campus de recherche, ont été spécialement conçus afin que des chercheurs universitaires se joignent à ceux d'établissements publics de recherche et à des acteurs de l'industrie autour de projets communs ayant une « masse critique »⁵ (Koschatzky et Stahlecker, 2016).

L'infrastructure de R-D industrielle : outils, technologies génériques et installations

L'une des préoccupations grandissantes, en ce qui concerne les programmes et établissements de R-D industrielle, est de combiner outils et installations d'une manière judicieuse qui permette de gérer les défis de la convergence et du changement d'échelle, et de saisir les potentialités qui en découlent. Métrologie avancée, technologies de mesure en temps réel, protocoles de caractérisation, technologies d'analyse et d'essai, bases de données ouvertes (par exemple, sur les propriétés des matériaux), mais aussi outils de modélisation et de simulation ne sont que quelques exemples parmi d'autres des outils et technologies génériques nécessaires au changement d'échelle de technologies émergentes, comme les matériaux avancés et la biologie de synthèse, et à celui des nouveaux systèmes de fabrication issus des TIC. Il importe aussi de s'employer, via la R-D, à perfectionner certains de ces outils car la recherche a besoin désormais de fonctionnalités évoluées et de niveaux de précision supérieurs. On se souviendra ainsi que quelques-uns des grands domaines de R-D industrielle tenus pour prioritaires au Royaume-Uni et présentés à ce titre dans l'encadré 10.2 sont réunis sous une rubrique intitulée « technologies génériques ».

Dans la même veine, l'initiative « Usines du futur », soutenue par la Commission européenne (EFFRA, 2013) insiste sur la mise au point de méthodes et d'outils d'un genre nouveau dans les domaines de la métrologie et de la modélisation, de la simulation et de la prévision. Priorité est donnée, entre autres, aux modèles virtuels s'étendant à tous les niveaux de l'usine et à toutes les étapes de son cycle de vie, ainsi qu'aux méthodes de modélisation et de simulation applicables aux procédés de fabrication de nature mécanique, énergétique, fluide et chimique. Les innovations attendues à l'égard de ces différents outils et de ces différentes technologies génériques devraient permettre aux usines de tirer avantage de la prochaine révolution de la production (EFFRA, 2013).

La R-D industrielle gagnant en ampleur et en complexité, il est souvent nécessaire de disposer d'installations de démonstration – bancs d'essai, lignes pilotes et démonstrateurs d'usine, par exemple, qui fournissent un environnement de recherche propice, car pourvu de la panoplie idoine d'outils et de technologies génériques – et des techniciens indispensables au bon fonctionnement de ces installations. Celles-ci servent fréquemment de cadre à des activités de recherche technique et d'expérimentation consistant non seulement à mettre au point des prototypes mais aussi à en faire la démonstration et en tester l'application à l'échelle requise pour leur validation. Le passage au banc d'essai des technologies émergentes peut contribuer à conjurer les risques inhérents à leur adoption, en particulier pour les petites entreprises manufacturières (PCAST, 2014).

Semblablement à ce qui a été dit plus haut au sujet des multiples fonctions dévolues aux instituts de R-D industrielle, ces installations de démonstration peuvent aussi être associées à des activités, touchant à l'organisation et à la commercialisation, destinées à aider les entreprises et les autres parties prenantes de la chaîne de valeur à préparer la

production commerciale, en vraie grandeur, de nouveaux produits fondés sur les résultats de la recherche (par exemple, en donnant lieu à des mises au point consécutivement à la fabrication de préséries et en facilitant l'établissement de relations commerciales avec des clients-précurseurs).

Études de cas d'institutions et de programmes de R-D industrielle : une pluralité de missions, de fonctions et de relations

Les institutions, dans leur forme et leur mode de fonctionnement, sont déterminées par un ensemble d'éléments contextuels au nombre desquels figurent les priorités nationales en matière d'innovation, les atouts historiques du pays et les caractéristiques propres à son infrastructure institutionnelle (O'Sullivan, 2011, 2016). Qu'il s'agisse d'universités, de ministères de la science et de l'économie, d'instituts de recherche intermédiaire, d'agences de R-D, d'organismes de normalisation, elles jouent, individuellement et collectivement, un rôle clé dans l'exécution des programmes nationaux de R-D industrielle. On constate, d'un pays à l'autre, des différences significatives entre ces acteurs institutionnels qui tiennent à leur organisation propre, à la mission qui leur est assignée, à l'échelle et à la gamme de leurs activités, et aux rapports qu'ils entretiennent entre eux.

Pour mieux illustrer quelques-unes des stratégies dont il a été question précédemment dans ce chapitre et la diversité des contextes et des réponses données dans les différents pays considérés, les paragraphes qui suivent présentent des exemples d'institutions, d'initiatives et de programmes de première importance mis en place pour accompagner les tendances associées à la prochaine révolution de la production. Ces études de cas sont consacrées au pôle d'excellence sur la technologie de production intégrative pour les pays à salaires élevés (*Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*, Allemagne), au réseau HVM Catapult (High Value Manufacturing Catapult) sur les activités de fabrication à forte valeur ajoutée (Royaume-Uni), à l'Institut des technologies industrielles SIMTech (Singapore Institute of Manufacturing Technologies, Singapour), à l'initiative *It's OWL* (*Intelligent Technische Systeme OstWestfalenLippe*) sur les systèmes techniques intelligents (Allemagne), au programme interministériel de promotion de l'innovation stratégique (*Strategic Innovation Promotion Programme*, Japon) et, enfin, à l'initiative sur les lignes pilotes pour les technologies clés génériques (Union européenne, avec les exemples de la Suède et d'un consortium belge).

Pôle d'excellence sur la technologie de production intégrative pour les pays à salaires élevés (Allemagne)

Installé à Aix-la-Chapelle, le pôle d'excellence sur la technologie de production intégrative pour les pays à salaires élevés (*Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*) est l'une des initiatives phares de la Fondation allemande pour la recherche (DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft) pour ce qui a trait aux activités manufacturières. Son rôle consiste à étudier l'intégration de plusieurs technologies de production (souvent avec le concours des TIC avancées) au sein de systèmes hybrides destinés à la fabrication de produits personnalisés avec un coût proche de celui des grandes séries (RWTH, 2015).

Les activités de ce pôle d'excellence montrent, comme nous l'avons vu précédemment, l'importance qu'une économie à hauts salaires peut attacher au maintien de son hégémonie dans le domaine des technologies de production. Il s'agit d'en développer de prometteuses et durables et de recueillir des enseignements utiles, l'objectif étant de contribuer avec effet à la préservation des activités de production qui ont une importance sur le marché du travail allemand, où justement les salaires sont élevés.

Prendent part à cette initiative 19 professeurs du Département des matériaux et des technologies de production et d'autres établissements de recherche associés, dont les instituts Fraunhofer voisins. Leurs travaux portent, entre autres, sur les systèmes de production virtuels, hybrides et auto-optimisables et les procédés et stratégies de production individualisée. Le programme de recherche doit également permettre de jeter les bases d'une théorie de la science de la production, ce qui implique d'articuler des aspects ayant trait à la technologie et aux procédés de production physique avec de grands concepts de gestion et d'économie pour dessiner un cadre global dans lequel les entreprises allemandes puissent inscrire des stratégies de production favorisant la compétitivité (RWTH, 2015).

L'une des solutions envisageables en ce qui concerne les systèmes de production individualisée est le recours à la fusion sélective par laser, procédé de fabrication additive utilisé à l'origine en prototypage, pour les productions en petites séries. Cette technique, et d'autres procédés analogues avec elle, rend possible la réalisation de pièces et de composants dont la forme ou la géométrie ne se prêtent pas à un usinage traditionnel, et partant la fabrication de produits proches de la pièce unique (RWTH, 2016).

Autre grand domaine de recherche, les systèmes hybrides de production grâce auxquels plusieurs étapes de fabrication peuvent être effectuées sur une machine sans modification de ses paramètres. Il est par exemple possible de procéder simultanément à un traitement thermique par laser et à un usinage, avec le même appareil, ce qui a pour effets d'éliminer des étapes de fabrication, de réduire le temps nécessaire aux changements de séries et de raccourcir la chaîne d'approvisionnement (RWTH, 2015). Avec ce genre d'approche intégrative, la productivité des usines pourrait bien faire un bond prodigieux.

La production virtuelle, également étudiée au sein du pôle d'excellence, illustre bien la convergence des TIC avancées et des technologies de production. Les projets dans ce domaine concernent notamment l'exploration, le traitement et la visualisation des données associées à l'ensemble des niveaux systémiques de l'usine – depuis le comportement des pièces lors de chaque procédé de fabrication jusqu'à la logistique générale – pour éclairer les décisions des responsables de la production.

Il convient de noter que, pour avoir été engagée il y a une dizaine d'années déjà, cette initiative bénéficie néanmoins d'un budget en constante augmentation, car elle est l'objet d'évaluations favorables, et que les travaux produits dans ce cadre suivent une progression analogue (RWTH, 2015). Elle demeure par ailleurs à la pointe de la recherche en fabrication numérique et en fabrication en réseau et est devenue l'une des pièces maîtresses du programme Industrie 4.0.

Réseau HVM Catapult (High-value Manufacturing Catapult), Royaume-Uni

Les centres Catapult sont, au Royaume-Uni, des organismes de R-D appliquée ayant pour finalité de promouvoir la recherche et l'innovation à travers une collaboration, à l'initiative des entreprises, entre scientifiques, ingénieurs et industriels (Innovate UK, 2015). Il est possible de les comparer au réseau NNMI des États-Unis ou aux instituts Fraunhofer allemands. Ils servent de cadre à des travaux de R-D en ingénierie portant sur des domaines comme les activités de fabrication à forte valeur ajoutée, les applications satellites, la production d'énergie en mer à partir de sources renouvelables, l'économie numérique, les systèmes de transport et les systèmes énergétiques. À côté de ce noyau d'activités de R-D technologique, la plupart des centres accueillent d'autres activités en lien avec l'innovation qui prennent appui sur leurs capacités et travaux de recherche. Ces

activités complémentaires ont trait notamment aux chaînes d'approvisionnement, aux démonstrations et aux changements d'échelle et à la formation de techniciens spécialisés.

Le réseau HVM Catapult (High Value Manufacturing Catapult), dédié aux activités de fabrication à forte valeur ajoutée, est formé de sept centres dotés chacun d'un savoir-faire et d'installations distincts mais complémentaires, à savoir : l'AFRC (Advanced Forming Research Centre), spécialisé dans la recherche de mise en forme du métal ; l'AMRC (Advanced Manufacturing Research Centre), qui axe ses recherches sur l'usinage et les matériaux avancés ; le CPI (Centre for Process Innovation), qui se consacre à la démonstration et au changement d'échelle de procédés de fabrication concernant des secteurs comme l'industrie pharmaceutique, les biotechnologies et l'électronique imprimée ; le MTC (Manufacturing Technology Centre) qui traite du développement et de la démonstration de nouvelles technologies de production à l'échelle industrielle ; le NCC (National Composites Centre), dont les recherches portent sur les technologies adaptées à la conception et à la fabrication rapide de produits composites de qualité ; le NAMRC (Nuclear Advanced Manufacturing Research Centre), qui consacre ses travaux au nucléaire et à la technologie des matériaux ; enfin le WMG (Warwick Manufacturing Group), privilégie des thématiques comme la mobilité bas carbone.

La structure réticulaire permet aux différents centres de nouer des partenariats et d'unir leurs efforts de recherche pour répondre à des défis complexes, en rapport avec la prochaine révolution de la production, nécessitant de faire appel à tout un ensemble de technologies et capacités. À titre d'exemple, le réseau HVM Catapult porte un projet transversal de grande envergure qui doit permettre de lever différents freins à la production, à une cadence élevée, de pièces automobiles en matériau composite, projet autour duquel le NCC, le WMG, l'AMRC et le MTC mobilisent de concert leurs capacités de recherche (HVMC, 2016).

Le réseau HVM Catapult dispose d'importantes installations de démonstration présentant un intérêt pour la prochaine révolution de la production. Ainsi, en 2014, il a inauguré, sur le site du MTC, le premier démonstrateur d'usine numérique du Royaume-Uni (MTC, 2015). Ce démonstrateur se présente sous la forme d'un environnement immersif, en réalité virtuelle, qui place l'utilisateur dans un « atelier collaboratif » conçu sur le modèle de machines bien réelles. Il reproduit ainsi un environnement de production en continu et permet aux chercheurs universitaires, aux ingénieurs d'entreprises manufacturières et à d'autres parties prenantes de l'industrie de collaborer à l'avènement d'innovations qui auront des effets bénéfiques sur la productivité, la qualité et l'efficacité énergétique.

De plus, grâce au réseau HVM Catapult, les entreprises manufacturières ont accès à des installations (et aux techniciens correspondants) qu'elles peuvent utiliser aux fins du changement d'échelle et de la mise à l'épreuve de procédés de fabrication à forte valeur ajoutée (Innovate UK, 2015). On notera par exemple l'inauguration, en 2016, d'un Centre national de fabrication de produits biologiques (National Biologics Manufacturing Centre), relevant du CPI, qui aidera les entreprises du domaine à exploiter leurs idées, leurs recherches, leur savoir-faire et les informations de marché en leur possession pour formuler des propositions commerciales. Le centre donne libre accès à ses installations et conseils d'experts à qui veut concevoir, mettre à l'essai et commercialiser des procédés et technologies de fabrication nouveaux ou améliorés (HVMC, 2016).

Le réseau HVM Catapult joue également un rôle important dans la constitution de chaînes d'approvisionnement grâce à son expérience et à ses connaissances spécialisées en matière de R-D industrielle (Innovate UK, 2015). En plus de favoriser l'émergence des chaînes

d'approvisionnement de demain par l'appui stratégique offert aux PME, il donne accès à un réseau de grands fournisseurs participant aux principales chaînes logistiques de l'industrie. Ainsi, le NAMRC tient un service « F4N » (*Fit for Nuclear*) à la disposition des entreprises britanniques qui souhaitent se préparer à répondre à un appel d'offres en rapport avec la chaîne d'approvisionnement du nucléaire civil. Ce service permet aux entreprises intéressées d'évaluer leurs activités au regard des normes exigées des fournisseurs du secteur et de déterminer ce qu'il y a lieu de faire, le cas échéant, pour se mettre à niveau sur le plan technologique ou en termes de capacités. Le F4N a été conçu avec le soutien de grands noms du nucléaire, comme AREVA et EDF Energy, qui ne manquent eux-mêmes pas de le solliciter lorsqu'ils sont à la recherche de partenaires potentiels (HVMC, 2016).

Le développement des compétences tient une place importante dans la mission confiée au réseau HVM Catapult (Innovation UK, 2015). De nouveaux centres de formation ont ouvert leurs portes à l'AMRC et au MTC et doivent former des cohortes de technologues et d'ingénieurs rompus aux activités de conception et de fabrication intersectorielles les plus avancées, en s'appuyant pour cela sur des technologies et techniques dernier cri, l'accent étant mis sur la gestion et la diffusion de l'innovation. Le réseau et tous les centres qui lui sont affiliés s'emploient ensemble à harmoniser l'offre d'activités de développement des compétences proposée à l'industrie britannique (HVMC, 2016).

Une étude indépendante est venue mettre en lumière récemment l'action positive du réseau HVM Catapult pour l'industrie du Royaume-Uni et plaider en faveur de la création de nouveaux centres (Hauser, 2014). En 2016, le gouvernement a fait savoir qu'il entendait doubler le budget alloué au réseau dans l'objet d'en étendre les activités à d'autres pans de l'économie britannique encore (Hauser, 2014 ; HVMC, 2016).

Institut SIMTech (Singapore Institute of Manufacturing Technology), Singapour

L'Institut des technologies industrielles (SIMTech) tient un rôle de premier plan sur la scène de la recherche et de l'innovation industrielles à Singapour. Il a reçu pour mission de pourvoir au développement de technologies de fabrication à haute valeur ajoutée, et du capital humain correspondant, pour accroître la compétitivité de l'industrie manufacturière locale (SIMTech, 2012). Le formage, la mécatronique, le collage, les mesures de précision, l'usinage, les technologies des surfaces, ainsi que la planification et la gestion des activités sont au nombre de ses domaines de spécialité. Il collabore avec des entreprises actives dans différents domaines, dont ceux de l'aérospatiale, de l'automobile, de l'industrie marine, de l'électronique, des semi-conducteurs et des technologies médicales.

Cet institut se distingue notamment en ceci qu'outre sa fonction de recherche fondamentale, il fournit tout un éventail de services complémentaires, en relation avec l'innovation, aux entreprises établies à Singapour. Pour ne citer que quelques-uns de ces services, mentionnons l'aide au renforcement des capacités de R-D des PME ; les projets et consortiums de R-D collaborative ; les programmes de soutien au développement des activités des fournisseurs ; et l'organisation de formations continues fondées sur des études de cas. Les entreprises ont également la possibilité d'accéder à un ensemble très complet d'outils de diagnostic et de mesure que l'institut met à leur disposition. L'éventail des prestations proposées par SIMTech répond aux besoins les plus immédiats de l'industrie tout en conservant une place de choix aux activités de recherche (Young, 2014).

Autre trait particulièrement intéressant, dans le contexte de la prochaine révolution de la production, SIMTech prend des initiatives pour aider les PME à adopter de nouvelles

technologies, acquérir de nouvelles capacités et se risquer dans des secteurs de pointe. Des actions ont en effet été initiées dans l'objet d'encourager les PME à s'engager dans des industries en forte croissance, choisies en raison des débouchés qu'elles offrent aux fournisseurs locaux. Les initiatives de ce genre combinent en règle générale projets de recherche conjoints, services d'aide et de conseil (en particulier aux fins de l'application des normes en vigueur dans l'industrie visée) et accès à des équipements d'essai spécialisés. Fort de son expertise de la recherche industrielle, SIMTech est ainsi intervenu, entre autres, dans les domaines de l'aérospatiale, des technologies médicales, de l'exploitation pétrolière et gazière, des équipements complexes et du traitement thermique (SIMTech, 2012).

Les centres d'innovation régis par SIMTech sont organisés autour d'enjeux transversaux qui, comme la productivité et la durabilité, revêtent une importance primordiale dans la perspective de la prochaine révolution de la production. Leur but est d'obtenir la participation des entreprises aux activités d'innovation en leur démontrant tous les bienfaits qu'elles retireront de l'adoption de nouvelles technologies et en leur proposant, aux PME en particulier, un accompagnement aux fins du transfert de ces technologies. L'un de ces centres consacre ses activités aux technologies d'ingénierie de précision, absolument essentielles dans de nombreux domaines – dont l'électronique, l'aérospatiale, l'automobile, les activités maritimes, l'exploitation pétrolière et gazière et les équipements médicaux – et met à la disposition des entreprises toute une panoplie de technologies génériques de mesure et de diagnostic (conception et simulation d'optiques, intégration et caractérisation de systèmes optiques, systèmes visioniques, traitement d'images, profilométrie, inspection de défauts en 2D et 3D, analyse thermique, etc.) (PE COI, 2016).

Le soutien à la montée en gamme des PME, sur le plan technologique, est assuré aussi via le détachement de chercheurs et d'ingénieurs de recherche auprès d'entreprises locales dans le cadre de programmes publics dédiés. Ces détachements de personnel aident les entreprises qui en sont bénéficiaires à identifier quelles technologies leur sont indispensables et à développer des capacités de R-D interne en lien direct avec leurs activités (SIMTech, 2012). SIMTech organise qui plus est de nombreux séminaires, ateliers, forums et conférences de manière à faire connaître les dernières avancées technologiques et sensibiliser le public aux retombées que l'on peut en attendre. En certaines occasions, ce sont des représentants de grandes entreprises qui viennent informer les PME des débouchés ouverts, ou appelés à s'ouvrir, aux fournisseurs locaux.

Pour ce qui est du développement des compétences, SIMTech, avec le concours du ministère de l'Emploi et de ses agences, dispense des formations certifiées, inspirées d'études de cas, qui s'adressent aux spécialistes, ingénieurs des méthodes et responsables de fabrication ainsi qu'aux autres professionnels et dirigeants de l'industrie. Ces formations font largement appel aux compétences des experts de l'institut et à ses installations spécialisées.

SIMTech a resserré ses liens avec les universités de Singapour à la faveur de la création, ces dernières années, de laboratoires conjoints voués aux recherches dans des domaines émergents tels la robotique avancée, les composites à base de fibres naturelles, l'usinage tridimensionnel et les systèmes de précision servant à l'analyse du mouvement. Des formations postdoctorales sont proposées au sein de ces laboratoires dans des domaines de recherche choisis en fonction de l'intérêt qu'ils présentent pour l'industrie (SIMTech, 2012).

Notons enfin que SIMTech se distingue aussi tout particulièrement par le rôle qui est le sien aux fins de l'attraction d'IDE. Dans le cadre d'une collaboration avec le Conseil de

développement économique (*Economic Development Board*), il établit des relations avec des entreprises envisageant d'implanter des activités à Singapour et projette avec elles des programmes conjoints de R-D au titre de la proposition de valeur du pays. Dernièrement, c'est entre autres l'industrie aérospatiale qui était concernée par des projets de ce genre.

Consortium It's OWL (Intelligent Technische Systeme OstWestfalenLippe), Allemagne

Le consortium *It's OWL*, dédié aux systèmes techniques intelligents, représente l'un des plus gros investissements consentis par l'Allemagne dans le cadre de l'initiative « Industrie 4.0 » (*It's OWL*, 2016a). Il s'agit d'une alliance, réunissant plus de 170 entreprises, universités et instituts, financée par l'intermédiaire du programme des pôles d'excellence du ministère fédéral de l'Enseignement et de la Recherche (BMBF). Le consortium est implanté dans la région Westphalie-Est Lippe, une région qui ne manque pas d'atouts dans les domaines du génie mécanique et des équipements domestiques (*It's OWL*, 2016b).

It's OWL se consacre aux grandes problématiques du numérique qui sont au cœur de la prochaine révolution de la production. On y utilise la notion de « systèmes techniques intelligents » pour décrire les systèmes nés à la confluence des sciences de l'ingénieur et des TIC. Capables de s'adapter par eux-mêmes à leur environnement et aux besoins de leurs utilisateurs comme aux imprévus, ces systèmes sont de surcroît économes en énergie et fiables (*It's OWL*, 2016a). *It's OWL* explore différentes thématiques à travers ses projets de recherche, notamment, l'auto-optimisation, l'interaction entre l'homme et la machine, les réseaux intelligents et l'efficacité énergétique. Les solutions auxquelles ses travaux permettront d'aboutir devraient avoir une incidence non seulement sur les procédés de production, mais aussi sur le développement, le déploiement, l'entretien et la gestion du cycle de vie des nouveaux produits et systèmes (*It's OWL*, 2016).

Les projets du consortium donnent en outre une idée de l'omniprésence des technologies associées à la prochaine révolution de la production dans les industries, aussi bien émergentes que traditionnelles. À côté de ceux consacrés à des applications destinées à la robotique interactive, aux véhicules électriques et hybrides et aux machines-outils intelligentes, d'autres en effet ont trait à la recherche de solutions d'auto-optimisation pour les blanchisseries industrielles et l'industrie du meuble. Les travaux consacrés aux premières, par exemple, visent une meilleure interaction entre machines et procédés par le recours à l'auto-optimisation et aux pinces robotiques. Cela devrait permettre aux blanchisseries de gagner en productivité et de réduire de moitié leur consommation d'énergie, d'eau et de lessive (*It's OWL*, 2016b).

It's OWL propose aussi des programmes de formation continue pour mettre à jour les connaissances des travailleurs de l'industrie devant l'arrivée de nouvelles technologies, les principaux groupes cibles étant les ingénieurs séniors et les jeunes professionnels. Entre autres propositions, on retiendra l'existence d'une université d'été, ouverte aux diplômés et aux jeunes professionnels, et celle d'un programme de perfectionnement s'adressant aux ingénieurs expérimentés.

Programme interministériel de promotion de l'innovation stratégique, Japon

Adopté par le gouvernement japonais, le programme interministériel de promotion de l'innovation stratégique (*Strategic Innovation Promotion Programme*, SIP) désigne une initiative nationale placée sous la conduite du Conseil pour la science, la technologie et l'innovation (CSTI), lui-même rattaché aux services du Premier ministre. Il se décompose en dix volets, avec chacun leur budget propre, qui ont pour finalité de redynamiser la

société et l'économie japonaises et de hisser les industries manufacturières nationales à un rang plus élevé au plan mondial. Certains de ces volets sont associés à des thèmes intéressants les activités manufacturières, comme les technologies de conception/fabrication innovantes, l'électronique de puissance de prochaine génération, et les matériaux de structure au service de l'innovation (CSTI, 2015).

On notera avec intérêt, en ce qui concerne le volet sur les technologies innovantes de conception/fabrication que nous venons de mentionner, l'attention portée aux recherches consacrées à la convergence entre les TIC, les outils de conception et les technologies de production, et plus spécifiquement aux méthodes de conception et de fabrication souples donnant des produits et des services qui procurent au consommateur un niveau supérieur de qualité et de performance (agrément). Les travaux projetés portent entre autres sur les technologies de production compatibles avec les fonctions ou formes non conventionnelles et l'application d'outils numériques (IdO, systèmes cyberphysiques et données massives) au développement de nouveaux systèmes de prototypage à même de réduire le temps et la dépense nécessaires aux activités de R-D et à la fabrication de produits (Sasaki, 2015).

Les recherches visent également à établir une articulation plus étroite entre les efforts d'innovation déployés dans les activités amont (dont la R-D sur les matériaux et composants) et aval (dont la R-D sur les produits, les services et les systèmes) de manière à ce qu'il soit possible de répondre plus rapidement aux besoins des entreprises et des consommateurs (CSTI, 2015). L'objectif est que les résultats des travaux de recherche soient testés en production sans délai afin de hâter l'intégration d'améliorations en matière de conception.

Le programme SIP présente cette caractéristique remarquable que, pour chacun des volets auxquels est associée une tranche de financement, un responsable, souvent fort d'une solide expérience du secteur privé, chapeaute les projets correspondants depuis le stade des recherches fondamentales jusqu'à l'application pratique et la commercialisation du produit de ces recherches. Pour accéder aux capacités nécessaires, éparpillées entre de multiples acteurs, il est conseillé aux chefs de projet de nouer des liens avec les entreprises, les universités et les établissements publics de R-D.

Lignes pilotes pour les technologies clés génériques (TCG), Union européenne

Les initiatives de la Commission européenne relatives aux lignes pilotes pour les technologies clés génériques (TCG) illustrent, par excellence, la génération montante des programmes de R-D conçus pour répondre aux défis du changement d'échelle et de la convergence.

La Commission a isolé six TCG qui lui paraissent essentielles au développement futur de l'économie et de la société européennes – la microélectronique et la nanoélectronique, les nanotechnologies, les biotechnologies industrielles, les matériaux avancés, la photonique et les technologies de fabrication avancées (CE, 2012). L'un des grands défis de l'innovation dans ces domaines est de franchir ce que l'on appelle la « Vallée de la Mort », et en particulier de faire accéder de nouveaux prototypes, fondés sur ces technologies clés, au stade de la production commerciale. Le rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur les technologies clés génériques contient un appel à l'adoption d'une stratégie européenne en faveur des lignes pilotes servant à la démonstration industrielle de ces technologies (CE, 2015a). Ces lignes pilotes s'entendent : i) des installations permettant la fabrication, en quantité significative, de prototypes de produits innovants issus des TCG ; et ii) des

activités de démonstration et d'application à l'échelle idoine destinées à valider les prototypes du point de vue de l'utilisateur (CE, 2015b).

À côté de la recherche technique et de la démonstration, les lignes pilotes peuvent également servir à des activités en relation avec l'organisation de la production et le marché, visant à préparer les entreprises et les autres maillons de la chaîne de valeur à la mise en production commerciale de nouveaux produits fondés sur les TCG et à leur fournir des renseignements utiles à cet égard (par exemple, en donnant lieu à des mises au point consécutivement à la fabrication de pilotes et en facilitant l'établissement de relations commerciales avec des clients-précurseurs).

Exemple récent de ligne pilote TCG européenne, financée dans le cadre du programme Horizon 2020, l'installation PIX4life (PIX4life, 2017) est dédiée à la démonstration et au changement d'échelle d'applications photoniques fondées sur le nitrure de silicium (SiN) dans le domaine des sciences de la vie. La finalité technique de cette ligne pilote est de déployer une plateforme validée d'application de la technologie SiN pour la mise au point de circuits intégrés photoniques (CIP) complexes à haute densité et de démontrer que le processus pilote se prête bien au changement d'échelle d'applications dans le domaine des sciences de la vie, par exemple les sources multispectrales en microscopie de super résolution, en cytométrie et en imagerie tissulaire tridimensionnelle. Outre la R-D et les activités de démonstration, l'initiative répond également à des objectifs de renforcement des capacités et de développement de chaînes d'approvisionnement, en particulier, sur ce dernier point, en vue de l'intégration, aux CIP à SiN, de technologies à diode laser matures et de matrices de détecteurs CMOS (semi-conducteur métal-oxyde complémentaire) et de la définition d'un kit et d'outils de conception appropriés pour le nouveau secteur d'activité qui se dessine.

La convergence des technologies figure elle aussi en bonne place dans les mesures relatives aux TCG et aux lignes pilotes adoptées par la Commission européenne. Cette dernière a également conscience du potentiel lié à l'emploi combiné de ces technologies (ou TCG multiples) – par exemple dans le cadre d'applications qui intègrent et mettent en symbiose plusieurs d'entre elles pour offrir des fonctionnalités ou des propriétés uniques qu'il n'aurait pas été possible d'obtenir isolément. Ces TCG multiples commencent à trouver des applications dans des domaines tels que la biophotonique, les nanomatériaux et les systèmes photosensibles. L'étude consacrée à la ligne pilote sur les TCG multiples (CE, 2015b) souligne les défis que pose, sur le plan de l'innovation, le passage de la R-D à la fabrication pilote puis à la production industrielle, notamment pour ce qui est de préserver les fonctionnalités des technologies mises en œuvre dans le cadre d'une production en grands volumes et à des cadences soutenues.

Cette étude s'attarde sur le projet PEA (*Printed Electronics Arena*), de l'institut suédois Acreo, qui est un démonstrateur de ligne pilote pour les solutions à TCG multiples (CE, 2015b ; PEA, 2017). Spécialisé dans les TIC, l'institut Acreo mène des travaux de recherche appliquée dans des domaines tels que la photonique au service des télécommunications et de la nanoélectronique. Le projet PEA vise à accélérer la commercialisation de composants électroniques imprimés et d'éléments de bioélectronique organique. Une unité de production pilote, baptisée « PEAManufacturing » lui est dédiée, où les entreprises et start-ups peuvent venir apprendre, en conditions réelles, à produire de tels composants et éléments, tester les technologies à partir de leurs propres prototypes et lancer la production de préséries. Elles ont la possibilité d'accéder aux équipements et aux lignes

pilotes, de recevoir des avis d'experts (dans différents domaines touchant à la science, à l'organisation de la production et à la gestion de projet) et de s'intégrer à l'écosystème scientifique et économique régional. Le PEA sert aussi de tremplin aux jeunes entreprises, de par les conseils, les formations et l'aide à la micro-production dont peuvent bénéficier les porteurs de projet.

En conclusion : de nouvelles thématiques, lignes d'action et leçons à retenir

On trouvera dans les paragraphes qui suivent une synthèse des principales thématiques, lignes d'action et leçons à retenir, dans la perspective de la prochaine révolution de la production, mises au jour par le tour d'horizon que nous venons de consacrer aux politiques nationales, exercices de prospective et stratégies des organismes de recherche de divers pays de l'OCDE et autres grandes économies.

Dans le contexte de la prochaine révolution de la production, les politiques de recherche industrielle doivent tenir compte de l'émergence de nouvelles opportunités, porteuses d'une forte valeur ajoutée, suscitées par la convergence des technologies et des systèmes ; des défis liés au changement d'échelle et à l'application des produits de la recherche dans les systèmes industriels ; et de la possibilité de capturer la valeur dans les économies nationales. Les politiques et stratégies industrielles nationales que l'on a passées en revue dans le présent chapitre témoignent d'un souci croissant d'élargir le périmètre des programmes et institutions de recherche et d'innovation (au-delà de la recherche fondamentale) ; de resserrer les liens avec les principaux acteurs des systèmes d'innovation ; et de mettre en place de nouveaux types d'infrastructures d'innovation (outils, technologies génériques et installations) à l'appui de la convergence et du changement d'échelle.

Contexte : la prochaine révolution de la production et son caractère systémique

Il est de plus en plus difficile de déterminer quelles doivent être les priorités des initiatives et programmes de recherche industrielle en raison de la convergence technologique et de la complexité croissante des modes de production modernes. Non seulement certains des grands domaines qui s'ouvrent aujourd'hui à la recherche sont, par essence, pluridisciplinaires mais, en plus, les nouvelles percées de la science et de l'ingénierie pourraient bien modifier la dynamique de la compétitivité dans l'industrie et jusqu'au sein de ses secteurs d'activité. Les grands enjeux de la recherche, essentiels au succès de la prochaine révolution de la production, prennent, pour beaucoup d'entre eux, un caractère transversal et systémique qui va s'accroissant, car ils reposent sur la convergence des technologies et des systèmes de fabrication et supposent que divers acteurs du monde de l'innovation et de l'industrie unissent leurs efforts. Lorsqu'ils évaluent les incidences des investissements de R-D – et déterminent ainsi où faire porter leurs efforts – les décideurs doivent tenir compte du fait que les contours des domaines de la recherche industrielle sont de plus en plus flous.

Notons en particulier que les programmes de R-D technologique peuvent se révéler excessivement cloisonnés en l'absence de mécanismes permettant d'aborder les défis de la recherche de manière pluridisciplinaire. En effet, les plus importants de ces défis requerront, dans bien des cas, de s'appuyer sur des disciplines de la recherche industrielle qui sont traditionnellement distinctes (matériaux avancés, outils de production, TIC ou gestion des opérations par exemple). De même, les établissements et programmes publics de recherche se sont fréquemment vu confier une mission circonscrite à la recherche et ils ne sont pas libres d'entreprendre des activités complémentaires d'innovation ou de s'associer à d'autres acteurs de l'innovation. Ce qui explique qu'ils se trouvent souvent

dans l'impossibilité de réunir les capacités, partenaires et installations dont ils auraient besoin pour relever les défis du changement d'échelle et de la convergence. Les études de cas l'ont illustré, et nous y reviendrons brièvement plus loin, de nouvelles stratégies voient le jour pour remédier à tout cela.

Les problématiques liées au changement d'échelle, à la convergence et à la complexité des systèmes ne sont pas non plus sans remettre sérieusement en question la manière dont sont conçus les indicateurs clés de performance et les instruments d'évaluation applicables aux programmes de R-D industrielle. Dans leur version traditionnelle, ces indicateurs et instruments n'incitent pas toujours autant qu'il conviendrait à un rapprochement des institutions, au renforcement de l'interdisciplinarité ni à l'application de la recherche. Divers défis liés à la prochaine révolution de la production solliciteront une contribution différente de la recherche et de l'innovation en fonction d'une pluralité de facteurs, dont le secteur concerné et le degré de maturité de la technologie. Pour mieux évaluer les institutions et les programmes, il y aurait lieu de se doter de nouveaux indicateurs, en complément de ceux déjà utilisés (comme le nombre de publications et de brevets) et en particulier dans les domaines suivants : démonstration réussie par lignes pilotes et bancs d'essai, développement des compétences des techniciens et ingénieurs, renouvellement de participation à des consortiums, présence des PME dans de nouvelles chaînes d'approvisionnement, et contribution à l'attraction d'IDE. Les responsables des politiques devraient se garder d'adopter des indicateurs de performance universels qui ne rendent pas compte de la nature systémique de la prochaine révolution de la production.

Convergence

Des technologies de première importance, comme les TIC avancées (systèmes cyberphysiques, données massives, IdO), les biotechnologies industrielles et les nanotechnologies, pourraient bien transformer radicalement les systèmes mondiaux de fabrication dans les décennies à venir (OCDE, 2015, 2016). Les technologies de production, les systèmes de fabrication et les secteurs industriels sont également entrés en convergence. Ce phénomène de convergence des technologies et des systèmes sera vraisemblablement le moteur de la prochaine révolution de la production. Au moment de concevoir des programmes et initiatives de recherche, les décideurs doivent garder présent à l'esprit qu'il est porteur de nouvelles possibilités et de nouveaux défis pour la R-D industrielle, élargissant le champ ouvert à l'innovation et l'éventail des moyens d'en capturer la valeur. Les programmes de recherche que la Commission européenne consacre à l'emploi combiné de plusieurs technologies clés génériques sont des exemples d'initiatives visant explicitement à saisir les opportunités ainsi suscitées par la convergence.

Changement d'échelle de la R-D industrielle

La complexité des systèmes et le relatif manque de maturité de bon nombre des technologies clés qui doivent régir la prochaine révolution de la production ne sont pas sans causer des difficultés considérables au changement d'échelle des activités de fabrication et à l'industrialisation de nouveaux produits. L'intégration des technologies convergentes peut se faire de telle manière qu'elle offre de nouvelles fonctionnalités aux produits et/ou en améliore la qualité de fonctionnement. Il n'est pas exclu cependant que ces caractéristiques soient difficiles à conserver dans le cadre d'une production à l'échelle industrielle faisant appel à des outils et à des procédés de fabrication classiques. Les décideurs doivent être sensibilisés aux problèmes de faisabilité industrielle associés au changement d'échelle des

technologies de rupture que nous devons aux sciences et qui requerront sans doute de nouvelles solutions fondées sur la R-D ainsi que des outils, des technologies de production et des installations d'un genre nouveau. Les investissements en direction des centres de recherche appliquée et des unités de production pilote, le but étant de faire passer les innovations du laboratoire à l'usine, constituent l'une des réponses courantes à ces défis. On reprendra ici l'exemple des instituts du réseau Manufacturing USA, aux États-Unis, des centres HVM Catapult, au Royaume-Uni, et des lignes pilotes pour les technologies clés génériques, qui bénéficient d'un financement de la Commission européenne.

Capture de la valeur créée par la prochaine révolution de la production

Bien des pays de l'OCDE, dans leurs stratégies de R-D industrielle, attachent un surcroît d'importance à la découverte de nouvelles solutions permettant de capter, dans l'économie nationale, la valeur créée par la prochaine révolution de la production. À titre d'exemple, ils portent un intérêt marqué aux technologies et systèmes hybrides rendant possible la fabrication de produits personnalisés pour un coût identique à celui d'une production en grande série. Les gains de productivité promis par la révolution de la production (notamment avec l'Industrie 4.0, et en particulier les systèmes de fabrication avancée issus des TIC) ne sont pas non plus sans retenir une attention considérable. On s'intéresse de même au potentiel des entreprises-plateformes fondées sur l'internet pour la capture de la valeur créée par la fourniture en ligne de biens et de services et les interactions avec les consommateurs. Le pôle d'excellence allemand *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*, par exemple, étudie de multiples solutions à même d'autoriser le maintien dans le pays d'activités de production à forte valeur ajoutée (RWTH, 2015, 2016).

Fonctions des instituts de R-D industrielle

L'une des caractéristiques marquantes qui ressort de ce tour d'horizon des institutions nationales de R-D industrielle établies récemment est que celles-ci, en plus de leurs activités fondamentales de recherche technologique, se livrent à tout un ensemble d'activités complémentaires à l'innovation : développement de compétences avancées, mise à disposition d'équipements spécialisés et conseils d'experts (en particulier pour les PME), mise à disposition de bancs d'essai pour les nouveaux procédés de production et produits, relations avec les parties prenantes et formation de réseaux. Certaines d'entre elles, qui plus est, avec le concours d'organismes de développement économique, mettent leurs capacités techniques au service de l'attraction d'IDE et du développement régional. L'institut SIMTech (Singapore's Institute of Manufacturing Research) est un bon exemple d'institution prenant appui sur sa fonction de recherche fondamentale pour élargir le périmètre de ses activités et assumer d'autres fonctions complémentaires en relation avec l'innovation.

Liens et partenariats

Les défis qui se posent à l'innovation dans le contexte de la prochaine révolution de la production sont d'une ampleur et d'une complexité telles que les capacités et infrastructures nécessaires pour les relever sont parfois disséminées entre un grand nombre d'acteurs. Si les décideurs en matière de recherche et d'innovation s'intéressent depuis de longues années aux partenariats public-privé, on constate, dans les programmes et initiatives publics de recherche industrielle adoptés récemment, une volonté de plus en plus nette de tisser des liens solides avec les acteurs pertinents des systèmes de production. À titre d'exemple, certains des défis auxquels la R-D industrielle se heurte nécessiteront d'avoir recours aux

compétences techniques et aux connaissances d'acteurs très divers, non seulement à celles des ingénieurs de fabrication et des chercheurs industriels, mais aussi à celles des concepteurs, des fournisseurs, des équipementiers, des techniciens d'atelier et des utilisateurs. Ils pourront également réclamer la mobilisation d'installations, d'outils et de connaissances spécialisées allant au-delà de ce que chaque groupe ou institut de recherche est capable de fournir individuellement, mais qu'une large collaboration (par exemple entre les centres de recherche universitaire, les laboratoires nationaux, les Organismes de Technologie et de Recherche et les laboratoires de métrologie) doit permettre d'obtenir. De surcroît, la conclusion de vastes partenariats interdisciplinaires qui, en plus de couvrir les sciences de l'ingénieur et les sciences physiques, s'étendent aussi aux écoles de commerce et aux sciences sociales de manière à bien mettre en lumière les incidences potentielles, dans les deux domaines en question, des innovations technologiques, ne manquerait pas d'apporter de la valeur ajoutée à la recherche industrielle. Ainsi, au Royaume-Uni, le réseau HVM Catapult est une coalition de centres aux domaines de spécialisation distincts qui travaillent ensemble sur des problèmes importants et complexes nécessitant l'emploi conjoint de technologies et de capacités variées.

L'infrastructure de R-D industrielle au service de la prochaine révolution de la production : outils, technologies génériques et installations

Les décideurs veillent de plus en plus attentivement, dans leurs choix d'investissement, à ce que l'infrastructure de R-D industrielle combine judicieusement outils et installations pour gérer les défis de la convergence et du changement d'échelle, ainsi que pour tirer profit des potentialités qui en découlent. Ils prennent notamment un souci particulier des technologies génériques nécessaires à l'innovation industrielle, au nombre desquelles se rangent la métrologie avancée, les technologies de mesure en temps réel, les technologies de caractérisation, d'analyse et d'essai, les bases de données partagées, ainsi que les outils de modélisation et de simulation. S'y ajoutent les installations de démonstration – telles que les bancs d'essai, les lignes pilotes et les démonstrateurs d'usine, qui fournissent un environnement de recherche propice, car pourvu de la panoplie idoine d'outils et de technologies génériques – sans oublier les techniciens indispensables à leur bon fonctionnement. Le programme des lignes pilotes pour les technologies clés génériques, financé par la Commission européenne, est un exemple d'initiative visant à renouveler l'infrastructure d'innovation face aux défis évoqués.

Certaines des nouvelles approches adoptées pour à la prochaine révolution de la production mises en lumière dans le présent chapitre ont fait leur apparition il y a moins de cinq ans et n'ont pas encore été l'objet d'une évaluation (ou les résultats de cette évaluation n'ont pas été rendus publics). Des indicateurs clés de résultats et instruments spécialement conçus pour servir à évaluer les instituts de recherche industrielle avancée commencent à voir le jour (voir, par exemple, AMNPO, [2015] et BIS [2016]) et des évaluations préliminaires sont en cours dans certains cas (voir, par exemple, Hauser [2014]). Il importe que les décideurs définissent des indicateurs clés de performance et des indicateurs de réussite et procèdent à une évaluation et à un examen des institutions, programmes et initiatives nouveaux, à commencer par ceux présentant, à l'égard de la prochaine révolution de la production, des caractéristiques semblables à celles dont il a été question ici. Il serait bon désormais de s'employer à constituer un socle de données factuelles, en portant une attention toute particulière au rôle qu'il appartient aux pouvoirs publics de jouer s'agissant de soutenir l'innovation par la R-D industrielle.

Notes

1. Le terme de « systèmes embarqués » désigne des produits, des équipements ou d'autres systèmes électroniques plus complexes encore contenant des dispositifs informatiques qui permettent aux objets du quotidien de communiquer (avec d'autres « objets intelligents »), soit directement soit par l'intermédiaire d'un réseau, par exemple l'internet. Passerelles entre le cyberspace et le monde physique, entre le virtuel et le réel, les systèmes embarqués sont considérés comme formant la « bordure » de l'IdO (ARTEMIS, 2011).
2. Les portefeuilles d'activités de recherche industrielle et la terminologie associée à ces activités dans un pays donné sont, dans une certaine mesure, le reflet des atouts et structures dont il dispose dans les champs de l'industrie et de l'innovation (O'Sullivan, 2011).
3. La fabrication se définit d'une manière générale comme le processus consistant à transformer des matériaux en produits utilisables, par l'application du savoir et du savoir-faire humains (NAE, 2012). Les établissements du secteur manufacturier sont habituellement considérés comme étant ceux dont l'activité consiste à transformer, par un procédé mécanique ou chimique, des substances ou des composants en un nouveau produit (NAICS, 2007). D'autres définitions plus larges mettent en avant la chaîne de valeur des activités exécutées par les entreprises et les travailleurs en vue de créer un produit, le mettre sur le marché et l'entretenir jusqu'à sa mise au rebut, activités parmi lesquelles on trouve la R-D, la conception, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la distribution, le marketing et le service après-vente. D'autres définitions encore, plus récentes, dénotent une prise de conscience du caractère complexe, dynamique et systémique des activités de fabrication. On y fait notamment une plus large place à la complexité des interactions et relations d'interdépendance entre les secteurs d'activité manufacturière, les technologies et les services qui interviennent dans la production de nombreux produits modernes, qui sont eux-mêmes, bien souvent, des systèmes extrêmement complexes (PCAST, 2011 ; Tassej, 2010 ; Brecher, 2012).
4. La nouvelle version de la stratégie allemande en faveur des technologies de pointe (BMBF, 2014a), pour prendre cet exemple, est bâtie autour de projets répondant à une fin précise dictée par de grands enjeux de société, dont on suppose qu'ils correspondent aux « marchés de demain ». Le climat et l'énergie (avec, par exemple, la neutralité carbone, l'efficacité énergétique et l'adaptation climatique des villes), la santé et la nutrition (avec, par exemple, la médecine personnalisée), la mobilité (avec entre autres objectifs celui d'avoir 20 millions de véhicule électriques en circulation d'ici 2020), la sécurité (avec notamment un effort sur la protection des réseaux de communication) et les communications (à travers, par exemple, la stratégie TIC 2020) sont de ceux-là.
5. Dans ce contexte, la « masse critique » est une notion que les agences de financement emploient volontiers pour désigner un projet de recherche de grande envergure, mobilisant un nombre important de spécialistes de disciplines complémentaires autour de problèmes d'une ampleur et d'une complexité telles qu'ils ne pourraient être traités efficacement via l'octroi de subventions à des chercheurs travaillant seuls ou en équipe.

Références

- Acatech (2013), *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 (Recommendations for implementing strategic initiative Industrie 4.0)*, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- AGP (2013), « Lifting off: Implementing the strategic vision for UK aerospace », Aerospace Growth Partnership.
- AMNPO, « Guidance on institute performance metrics national network for manufacturing innovation », Advanced Manufacturing National Program Office, National Institute of Standards and Technology.
- AMNPO (2013), « National Network for Manufacturing Innovation: A preliminary design », Advanced Manufacturing National Program Office, National Institute of Standards and Technology.
- AMSG (2016), « Additive manufacturing UK – Leading additive manufacturing in the UK », UK Additive Manufacturing Steering Group, www.ifm.eng.cam.ac.uk/uploads/Resources/Reports/AM_PUB_MTC_FINAL_FOR_PRINT_new_-_low_res.pdf.
- ARTEMIS (2011), « ARTEMIS Strategic Research Agenda 2011 », Advanced Research & Technology for Embedded Intelligence in Systems.
- ATI (2016), « Raising ambition: Technology strategy and portfolio update 2016 », document de stratégie technologique de l'Aerospace Technology Institute.
- BIS (2016), « The Aerospace Technology Institute: Scoping study to establish baselines, monitoring systems and evaluation methodologies », *BIS Research Paper*, n° 271, Department for Business,

- Innovation & Skills, Londres, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/499728/bis-16-123-ati-scoping-study.pdf.
- BIS (2012), « Industrial Strategy: UK Sector Analysis », Department for Business, Innovation and Skills, Londres, www.gov.uk/government/publications/industrial-strategy-uk-sector-analysis.
- BMBF (2014a), « The new high-tech strategy innovations for Germany », ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche.
- BMBF (2014b), « Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen » [L'innovation : la production, les services et les emplois de demain], ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche, www.produktion-dienstleistung-arbeit.de.
- Brecher, C. (dir. pub.) (2015), *Advances in Production Technology, Lecture Notes in Production Engineering*, Springer, Heidelberg.
- Brecher, C. (dir. pub.) (2012), *Integrative Production Technologies for High-Wage Countries*, Springer, Heidelberg.
- CE (2015a), « KETs: Time to act », rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur les technologies clés génériques, Commission européenne, Bruxelles, <http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/11082/attachments/1/translations/en/renditions/native>.
- CE (2015b), « Pilot production in key enabling technologies: Crossing the Valley of Death and boosting the industrial deployment of key enabling technologies in Europe », rapport à la Commission européenne, ET-01-15-748-EN-N, Commission européenne, Bruxelles, www.mkpl.eu/fileadmin/site/final/mKETs_brochure_web.pdf.
- CE (2012), « Une stratégie européenne pour les technologies clés génériques – Une passerelle vers la croissance et l'emploi », Commission européenne, Bruxelles, <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52012DC0341&from=FR>.
- CE (2011), « Programme-cadre pour la recherche et l'innovation " Horizon 2020 " », n° SEC(2011) 1427 final, Commission européenne, Bruxelles.
- Conseil des Affaires d'État (2015), 中国制造 2025 [Made in China 2025], Conseil des Affaires d'État, Beijing.
- Coutu, S. (2014), « The scale-up report on UK economic growth », rapport indépendant établi pour le compte du Department of Business, Innovation & Skills, Londres.
- CSTI (2015), « What is the cross-ministerial strategic innovation promotion program? », Council for Science, Technology and Innovation, Services du Premier ministre du Japon, www8.cao.go.jp/cstp/panhu/sip_english/46-49.pdf.
- CRDS (2015a), « Next generation manufacturing: Towards the creation of a new platform for high value-added manufacturing », Center for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency.
- CRDS (2015b), « Nanotechnology and materials R&D in Japan: An overview and analysis », Centre for Research and Development Strategy, Japan Science and Technology Agency.
- CSIRO (2016), « Advanced manufacturing – A roadmap for unlocking future growth opportunities for Australia », Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation.
- Dickens, P., M. Kelly et J. Williams (2013) « What are the significant trends shaping technology relevant to manufacturing? Future of Manufacturing Project: Evidence Paper 6 », Government Office for Science, Londres.
- EFFRA (2013), « Factories of the future: Multi-annual roadmap for the contractual public-private partnership under Horizon2020 », rapport à la Commission européenne, Direction générale de la recherche et de l'innovation, établi par l'European Factories of the Future Association, Bruxelles.
- EPSRC (2015), « Future manufacturing research hubs 2016 », Engineering and Physical Sciences Research Council, www.epsrc.ac.uk/files/funding/calls/2015/futuremanufacturingresearchhubs2016/.
- EPSRC (2014), « EPSRC Centres for Innovative Manufacturing », Engineering and Physical Sciences Research Council, www.epsrc.ac.uk/newsevents/pubs/cimbroadure/.
- Foresight (2013), *The Future of Manufacturing: A New Era of Opportunity and Challenge for the UK*, Government Office for Science, Londres.
- G20 (2016), « G20 New Industrial Revolution Action Plan », <http://g20chn.org/English/Documents/Current/201609/P020160908738867573193.pdf>.

- Hauser, H. (2014), « Review of the Catapult Network – Recommendations on the future shape, scope and ambition of the programme », Department for Business Innovation & Skills, Londres.
- Hauser, H. (2010), « The current and future role of Technology and Innovation Centres in the UK », Department for Business Innovation & Skills, Londres.
- Holland High Tech (2016), « Smart industry roadmap, top sector: High tech systems & materials », www.hollandhightech.nl/nationaal/innovatie/roadmaps/smart-industry.
- Holland High Tech (2015a), « Printing roadmap, top sector: High tech systems & materials », www.hollandhightech.nl/nationaal/innovatie/roadmaps/printing.
- Holland High Tech (2015b), « Embedded systems roadmap, top sector: High tech systems & materials », www.hollandhightech.nl/nationaal/innovatie/roadmaps/embedded-systems.
- HVMC (2016), « High Value Manufacturing Catapult annual review 2015-2016 », High Value Manufacturing Catapult, <https://hvm.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2016/07/HVM-annual-review-2016.pdf>.
- IDA (2012), « Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing, Institute for Defense Analysis », www.wilsoncenter.org/sites/default/files/Emerging_Global_Trends_in_Advanced_Manufacturing.pdf.
- IfM (2016), « HVM Landscape 2016 », Institute for Manufacturing, Cambridge (Royaume-Uni).
- Innovate UK (2015), « How Catapults can help your business innovate », www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/510479/CO128_Innovate_Catapult_Brochure_WEB.pdf.
- It's OWL (2016a), « Industry 4.0 pioneer », www.its-owl.com/industry-40/the-role-of-its-owl/.
- It's OWL (2016b), « Making machines intelligent, The Technology-Network: Intelligent Technical Systems OstWestfalenLippe », www.its-owl.com/fileadmin/PDF/Informationsmaterialien/2016-Making_machines_intelligent_Leading-Edge_Cluster_it_s_OWL_EN.pdf.
- JST (2014), « Center of Innovation (COI) program brochure », Japanese Science & Technology Agency.
- Klocke, F. (2009), « Production technology in high-wage countries – From ideas of today to products of tomorrow », in C. M. Schlick (dir. pub.), *Industrial Engineering and Ergonomics*, Springer, Heidelberg.
- Koschatzky, K. et T. Stahlecker (dir. pub.) (2016), *Public-private Partnerships in Research and Innovation: Trends and International Perspectives*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart.
- Kurfess, T. (2011), « The growing role of electronics in automobiles: A timeline of electronics in cars », www.chicagofed.org/digital_assets/others/events/2011/automotive_outlook_symposium/kurfess_060211.pdf.
- López-Gómez, C. et al. (2013), « Emerging trends in global manufacturing industries », Organisation des Nations Unies pour le développement industriel, Vienne.
- MEI (2016), « Smart industry: A strategy for new industrialisation for Sweden », Services du gouvernement suédois, ministère des Entreprises et de l'Innovation, www.government.se/498615/contentassets/3be3b6421c034b038dae4a7ad75f2f54/nist_statsformat_160420_eng_webb.pdf.
- METI (2015a), « White Paper on Manufacturing Industries », ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie, Japon.
- METI (2015b), « The “next innovation” in manufacturing (*monozukuri*) is coming: Japanese factories connected together », *METI Journal*, mai.
- METI (2010), *The Industrial Structure Vision 2010*, ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie, Japon.
- MIIT (2016), « La fabrication intelligente – 13^e plan quinquennal », ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, République populaire de Chine.
- Midest (2016), « Convergence pour l'Industrie du Futur », Forum placé sous le haut patronage du Président de la République française, dans le cadre de l'initiative « Industrie du Futur ».
- MTC (2015), « Future Factory Conference hosted by the MTC », www.the-mtc.org/news-items/future-factory-conference-hosted-by-the-mtc.
- NASA (2016), « 2015 NASA Technology Roadmaps », National Aeronautics and Space Administration.
- NAE (2012), « Making things: 21st century manufacturing & design », actes d'un colloque organisé par la National Academy of Engineering, National Academies Press.
- NAICS (2007), « North American Industry Classification System », US Department of Commerce, www.census.gov/eos/www/naics/.

- NEC et OSTP (2015), « A Strategy for American Innovation », National Economic Council et Office of Science and Technology Policy, https://obamawhitehouse.archives.gov/sites/default/files/strategy_for_american_innovation_october_2015.pdf.
- NSTC (2016), « Advanced manufacturing: A snapshot of priority technology areas across the federal government », rapport du Subcommittee for Advanced Manufacturing of the National Science and Technology Council, Executive Office of the President, Washington, DC.
- OCDE (2016), « Créer les conditions de la prochaine révolution de la production : l'avenir des industries manufacturières et des services – Rapport intermédiaire », rapport préparé pour la Réunion du Conseil de l'OCDE au niveau des Ministres, Paris, 1^e-2 juin, OCDE, Paris, www.oecd.org/fr/rcm/documents/Creer-les-conditions-de-la-prochaine-revolution-de-la-production-l-avenir-des-industries-manufacturieres-et-des-services-rapport-intermediaire.pdf.
- OCDE (2015), « Enabling the Next Production Revolution: Issues Paper », OCDE, Paris.
- O'Sullivan, E. (2016), « A review of international approaches to manufacturing research », rapport au Department of Business, Innovation & Skills, Royaume-Uni.
- O'Sullivan, E. (2011), « A review of international approaches to manufacturing research », Institute for Manufacturing, Université de Cambridge, Royaume-Uni.
- O'Sullivan, E. et al. (2016), « “Scale-up” in the next production revolution », CSTI-Policy Links Briefing Note.
- O'Sullivan, E. et al. (2013), « What is new in the new industrial policy? A manufacturing systems perspective », *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 29, n° 2, pp. 432-462.
- O'Sullivan, E. et N. Mitchell (2012), « International approaches to understanding the future of manufacturing », rapport au Government Office for Science, Université de Cambridge.
- PCAST (2014), « Accelerating US advanced manufacturing », President's Council of Advisors on Science and Technology, Executive Office of the President, Washington, DC, www.broadinstitute.org/files/sections/about/PCAST/2014%20amp%20_report_final.pdf.
- PCAST (2012), « Capturing domestic competitive advantage in advanced manufacturing », President's Council of Advisors on Science and Technology, Executive Office of the President, Washington, DC, www.broadinstitute.org/files/sections/about/PCAST/2012%20pcast_amp_steering_committee_report.pdf.
- PCAST (2011), « Report to the President on ensuring American leadership in advanced manufacturing », President's Council of Advisors on Science and Technology, Executive Office of the President, Washington, DC, www.broadinstitute.org/files/sections/about/PCAST/2011%20pcast-amp.pdf.
- PEA (2017), « Printed Electronics Arena Manufacturing », www.acreo.se/groups/printed-electronics-arena-manufacturing.
- PE COI (2016), « Precision of Engineering Centre of Innovation », www.a-star.edu.sg/simtech-pecoi.
- République populaire de Chine (2016), « 13^e Plan quinquennal pour le développement économique et social national ».
- PIX4life (2017), « PIX4life – About », <http://pix4life.eu/index.php/about>.
- RWTH (2016), « Research areas », RWTH Cluster of Excellence, www.produktionstechnik.rwth-aachen.de/cms/Produktionstechnik/Forschung/~gphb/Forschungsbereiche/lidx/1/.
- RWTH (2015), « Cluster of excellence: Integrative production technology for high-wage countries », RWTH Aachen, www.produktionstechnik.rwth-aachen.de.
- RRRC (2015), « Japan's robot strategy – Vision, Strategy, Action Plan », Robot Revolution Realization Council, METI, Japon.
- Roco, M.C. et al. (dir. pub.) (2013), « Convergence of knowledge, technology and society: Beyond convergence of nano-bio-info-cognitive technologies », étude réalisée par le World Technology Evaluation Center.
- Roco, M.C. et al. (dir. pub.) (2002), *Converging Technologies for Improving Human Performance: Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science*, US National Science Foundation, Arlington, Virginie.
- Sasaki, N. (2015), « SIP: innovative design/manufacturing technologies », Bureau of Science, Technology and Innovation, Services du Premier ministre du Japon, exposé présenté à l'occasion du Forum économique Allemagne-Japon tenu dans le cadre de la Foire de Hanovre, http://files.messe.de/abstracts/62693_01_sasaki_cabinetoffice.pdf.

- Schuh, G. et al. (2013), « Innovative approaches for global production networks », *Robust Manufacturing Control*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 385-397.
- SIMTech (2012), « Our R&D journey for industry », Singapore Institute for Manufacturing Technology, Singapour.
- Tassey, G. (2010), « Rationales and mechanisms for revitalizing US manufacturing R&D strategies », *Journal of Technology Transfer*, vol. 35, n° 3, juin.
- Teknikföretagen (2013), « Made in Sweden 2030: Strategic Agenda for Innovation in Production », www.vinnova.se/PageFiles/750915348/Made%20in%20Sweden%202030-eng.pdf.
- Wübbecke, J. et al. (2016), « Made in China 2025 – The making of a high-tech superpower and consequences for industrial countries », Mercator Institute for China Studies, Berlin.
- Yong, L.S. (2014), « Marrying research and industry development: 20 years of Singapore Institute of Manufacturing Technology (SIMTech) », exposé présenté devant l'Institute for Manufacturing, Université de Cambridge.

PARTIE II

Chapitre 11

Le développement des instituts d'innovation industrielle avancée aux États-Unis

par

William B. Bonvillian

Chargé de cours au MIT, ancien directeur du bureau du MIT à Washington

Au cours des années 2000, les effectifs du secteur manufacturier aux États-Unis ont été réduits d'un tiers, 64 000 usines ont fermé, l'investissement et la production du secteur ont reculé, et la croissance de la productivité a chuté. Le pays n'avait cessé de transférer sa production à l'étranger, et des études indiquaient que la baisse de la capacité de production nuisait à la capacité d'innovation, considérée depuis longtemps comme le principal atout économique national. Le présent chapitre examine l'origine des mesures prises par les pouvoirs publics face à ce dilemme, que l'on est convenu d'appeler « fabrication avancée ». Le chapitre retrace comment les concepts fondamentaux ont été élaborés au fil des rapports et comment un nouveau système d'innovation a été mis au point afin de renforcer le système de production. Il se penche sur le nouveau mécanisme central d'action publique – les instituts d'innovation industrielle, modèle collaboratif public-privé complexe d'élaboration de techniques et de procédés de production combiné à la formation de la main-d'œuvre. Enfin, il analyse le fonctionnement de ces nouveaux instituts, les enseignements tirés de leurs débuts et les améliorations qui pourraient permettre d'étendre leur influence. Ces nouvelles approches – qui forment un programme d'innovation industrielle avancée – pourraient, si elles étaient mises en œuvre, contribuer au renforcement du secteur manufacturier aux États-Unis. Elles pourraient également aider à atténuer les graves perturbations sociales qu'entraîne le déclin de ces activités.

Introduction : le déclin du secteur manufacturier aux États-Unis

Au cours des années 2000, le secteur manufacturier a connu de grands bouleversements aux États-Unis¹. La grande récession de 2007-08 a accéléré ces mutations, mais celles-ci étaient structurelles, et non la simple conséquence de la crise économique. Que ce soit dans l'emploi, l'investissement, la production, la productivité ou les échanges, le secteur manufacturier rencontrait des vents contraires. Un tiers des travailleurs du secteur ont perdu leur emploi au cours des années 2000. Ces perturbations économiques ont entraîné des perturbations sociales (Bonvillian, 2016). Alors que la plupart des Américains se pensaient sur le point de constituer une grande classe moyenne unique, on voyait désormais clairement monter le mécontentement d'une classe ouvrière faisant face à la baisse de ses revenus. Longtemps, le secteur manufacturier avait permis aux hommes ayant suivi des études secondaires d'accéder à la classe moyenne. Sur la période 1990-2013, en revanche, le revenu médian des hommes ne possédant pas de diplôme de fin d'études secondaires a chuté de 20 %, tandis que celui des hommes titulaires d'un tel diplôme ou ayant suivi quelque enseignement post-secondaire reculait de 13 % (Kearney, Hershbein et Jacome, 2015). En outre, l'inégalité des revenus s'était fortement creusée au cours des quinze années précédentes. Le déclin du secteur manufacturier n'en était pas l'unique cause, mais jouait un rôle important. Poussée par ces réalités économiques, une nouvelle initiative a pris corps après la grande récession, réunissant l'administration fédérale, les administrations des États, le secteur industriel et les universités. Son but était que le secteur manufacturier américain renoue avec une innovation systématique, ce que l'on a appelé la « fabrication avancée ». Le présent chapitre explique comment cette politique est apparue, en analyse les éléments, et notamment sa pierre angulaire, un réseau de nouveaux instituts d'innovation industrielle, au nombre de 14 au début de 2017.

Les années 2000

Le secteur manufacturier a connu aux États-Unis une décennie catastrophique entre 2000 et 2010, et ne s'en est que partiellement relevé (Nager et Atkinson, 2015). Ce déclin se mesure dans cinq dimensions : emploi, investissement, production, hypothèses de croissance de la productivité et déséquilibre des échanges (Atkinson et al., 2012).

Emploi. Au cours des 50 dernières années, la part du secteur manufacturier dans le produit intérieur brut (PIB) a diminué, passant de 27 % à 12 %. Pendant la plus grande partie de cette période (1965-2000), le nombre d'emplois du secteur est resté globalement constant, à 17 millions ; sur la décennie 2000-10, il a brusquement chuté de près d'un tiers (5.8 millions d'emplois perdus), passant sous la barre des 12 millions, pour ne remonter qu'à 12.3 millions en 2015². Toutes les industries manufacturières ont perdu des emplois sur la période 2000-10³, mais les plus exposées à la mondialisation, textile et ameublement en tête, ont enregistré des pertes massives.

Investissement. Si l'on tient compte des coûts de financement, on constate que les investissements en capital fixe (usines, matériel et technologies de l'information [TI]) ont

régressé (de 1.8 %) dans les années 2000, première décennie à enregistrer une baisse depuis le début de la collecte de données⁴. Les investissements ont reculé dans 13 des 19 secteurs industriels et a stagné dans 3 autres (Stewart et Atkinson, 2013).

Production. Les données montrent une croissance de la production du secteur manufacturier aux États-Unis de seulement 0.5 % par an sur la période 2000-07 (avant la grande récession), puis nulle sur la période 2007-14, malgré la reprise économique générale progressive après 2008 (Scott, 2015). Cette croissance est inférieure à celle du PIB et à l'accroissement de la population. Pendant la grande récession à proprement parler, la production du secteur manufacturier a plongé de façon spectaculaire (de 10.3 % sur la période 2007-09), et cette chute a été suivie de la plus lente reprise économique (au regard du PIB total) en 60 ans (Atkinson et al., 2012).

Productivité. Une analyse récente a montré que le taux de croissance de la productivité dans le secteur manufacturier avait atteint en moyenne 4.1 % par an sur la période 1989-2000, au moment où le secteur engrangeait les gains de la révolution des TI. Malgré cela, sur la période 2007-14, la croissance de la productivité dans le secteur est tombée à seulement 1.7 % par an⁵. Productivité et production étant liées, le déclin et la stagnation de la production mentionnés plus haut expliquent le tassement de la productivité au cours de la seconde période considérée. Une étude a montré que sur la période 2000-10, parmi les 20 premières nations manufacturières, les États-Unis se classaient dixièmes pour la croissance de la productivité dans le secteur manufacturier et dix-septième pour la croissance de la production nette.(Atkinson et al., 2012). Si l'on considère l'ensemble des données disponibles, on constate que les gains de productivité ont été inférieurs aux estimations initiales, et qu'ils n'ont donc pas été la cause majeure que beaucoup avançaient pour expliquer la disparition d'un tiers des emplois dans le secteur manufacturier (Scott, 2015 ; Atkinson et al., 2012). L'économiste politique Suzanne Berger a remarqué que de nombreux confrères pensaient que le secteur manufacturier connaissait la même évolution que l'agriculture – une implacable succession de gains de productivité permettant de produire toujours plus avec une main-d'œuvre de moins en moins nombreuse. Suzanne Berger a constaté que l'analogie avec l'agriculture était tout simplement incorrecte pour ce qui est des années récentes, car les gains de productivité réels étaient en fait inférieurs à ceux qui avaient été estimés (Berger, 2014). Il faut donc envisager un déclin global du secteur lui-même pour déterminer pourquoi ce dernier a perdu près d'un tiers de sa main-d'œuvre en une décennie.

Déséquilibre des échanges. En 2015, les États-Unis ont enregistré un déficit commercial (balance des paiements déficitaire entre les importations et les exportations) de 832 milliards USD pour les biens manufacturés⁶. À partir de 2015, s'y sont ajoutés 92 milliards USD pour les produits technologiques avancés, et ce déficit ne cesse de se creuser⁷. Ces données viennent contredire l'idée que les États-Unis pourraient continuer de monter en gamme et produire des biens de plus grande valeur, autrement dit qu'ils pourraient perdre la production de produits de base, mais demeurer en tête des producteurs de produits technologiques avancés (voir par exemple Mann [2003]). La croissance progressive de l'excédent commercial dans les services (227 milliards USD en 2015)⁸ est éclipsée par l'ampleur et l'augmentation continue du déficit dans les biens : le premier ne pourra jamais compenser le second dans un avenir prévisible. En d'autres termes, une économie des services extrêmement développée ne permet pas aux États-Unis de se passer d'une économie de la production.

Pour résumer, sur la période 2000-10, l'emploi dans le secteur manufacturier aux États-Unis a chuté, de même que les investissements et la production ; la productivité a été inférieure à ce que l'on avait supposé ; et les échanges de biens manufacturés ont été lourdement déficitaires, et ce phénomène n'a été que faiblement compensé par le dynamisme du secteur des services. Globalement, le secteur manufacturier américain s'est érodé. Sa reprise après 2009 a été la plus lente jamais enregistrée : l'emploi et la production se sont quelque peu redressés, mais restent à des niveaux inférieurs à ceux qu'ils avaient atteints avant la récession. Les problèmes structurels sous-jacents que connaît le secteur ne sont pas réglés.

Effets du commerce

Paul Samuelson a donné l'alerte en 2004, dans un article où il remettait en cause les opinions dominantes sur les avantages nets du commerce : selon lui, on faisait « totalement fausse route en partant du principe qu'il y avait nécessairement excédent des gains sur les pertes ». Au contraire, « le nouveau salaire réel d'équilibre sur le marché du travail a baissé » du fait d'une vision réaliste de la dynamique des échanges, entraînant de « nouveaux termes de l'échange nets défavorables aux États-Unis » (Samuelson, 2004). Autor, Dorn et Hanson (2016) ont dressé un état des lieux documenté des effets problématiques du commerce (voir aussi Preeg [2016], Meckstroth [2014] et Dahlman [2012]). Ils ont constaté que les relations commerciales entre les États-Unis et la République populaire de Chine (ci-après, « la Chine »), nouées dans les années 90 et reconnues officiellement dans l'Accord de l'OMC de 2001, avaient eu une incidence sur de nombreux secteurs à forte intensité de main-d'œuvre aux États-Unis et avaient entraîné le transfert de nombreux emplois vers la Chine. Les travailleurs américains ont payé un lourd tribut, du fait en particulier de la disparition de nombreux emplois manuels, et la situation économique des secteurs dans lesquels ils vivent s'est dégradée. Autor, Dorn et Hanson (2016) montrent également que les conséquences préjudiciables du commerce peuvent être durables, les États-Unis étant toujours dans l'impossibilité de se relever du choc créé par la perte de millions d'emplois dans de nombreuses communautés⁹.

Comme le prix Nobel d'économie Michael Spence l'a indiqué, « la mondialisation nuit à certains sous-groupes dans certains pays, y compris dans les économies avancées... Il en résulte des disparités croissantes de revenu et d'emploi dans l'ensemble de l'économie des États-Unis : les travailleurs qui ont suivi des études supérieures voient se multiplier les perspectives qui s'ouvrent à eux, tandis que les moins instruits font face à une baisse de leurs possibilités d'emploi et à une stagnation de leurs revenus. » (Spence, 2011). Tout comme l'emploi dans le secteur manufacturier a contribué de manière décisive à l'accès des travailleurs peu instruits à la classe moyenne après la Seconde Guerre mondiale, la perte d'emplois dans ce secteur a été un facteur déterminant de la baisse des revenus réels d'une part importante de la classe moyenne américaine dans les dernières décennies. Il ne fait aucun doute que la grande récession de 2008-09, dont le secteur manufacturier a été l'une des principales victimes, a joué un rôle, mais les effets du commerce (qui se font sentir à plus long terme) ne peuvent être ignorés.

La perspective de l'innovation

Si la situation de la production est problématique aux États-Unis, qu'en est-il de l'innovation ? Le pays conserve ce qui est probablement le système d'innovation à un stade précoce le plus puissant du monde, même si, dans ce domaine, la concurrence d'autres pays se fait de plus en plus vive. Toute stratégie manufacturière doit chercher à profiter de

l'avantage comparatif procuré par l'innovation. Or, par le passé, la recherche-développement (R-D) aux États-Unis n'a accordé qu'une attention limitée aux techniques et procédés avancés qui permettent de s'assurer une place prépondérante dans la production. Cette orientation contraste de façon saisissante avec l'approche de R-D dans le secteur manufacturier retenue en Allemagne, au Japon, en Corée, à Taïwan et désormais en Chine : ces pays ont opté pour une innovation « entraînée par le secteur manufacturier » (Bonvillian et Weiss, 2015). Comme nous le verrons plus en détail ci-après, les États-Unis – leurs agences gouvernementales et autres organisations – n'ont tout simplement pas orienté le système d'innovation vers ce qui se révèle être un stade crucial de l'innovation – la production, et notamment la production initiale – au moyen de technologies complexes et de haute valeur. Ce stade nécessite une très grande créativité dans les activités de conception et d'ingénierie, et conduit souvent à repenser les bases scientifiques et les inventions sous-jacentes : la production fait partie du processus d'innovation, elle n'en est pas dissociée. En passant à côté de ce lien entre production et innovation, les États-Unis ont créé une brèche majeure dans leur système d'innovation.

Le poids du secteur manufacturier dans l'économie des États-Unis

Le secteur manufacturier reste l'une des principales composantes de l'économie des États-Unis : il représente 12.1 % environ du PIB, contribue pour 2 090 milliards USD à l'économie (sur un total de 17 300 milliards USD) et emploie 12.3 millions de personnes (sur une population active occupée totale de quelque 150 millions)¹⁰. En moyenne, les travailleurs du secteur perçoivent des salaires supérieurs de 20 % au moins à ceux des travailleurs du tertiaire et des secteurs non manufacturiers (Helper, Kruger et Wial, 2012). Les entreprises manufacturières emploient 64 % environ des scientifiques et ingénieurs des États-Unis, et sont à l'origine de 70 % de la R-D industrielle (Tassey, 2010, citant les données du Bureau des analyses économiques [Bureau of Economic Analysis, BEA] et de la Fondation nationale pour la science [National Science Foundation, NSF]). Aux États-Unis, la puissance du secteur manufacturier et celle de son système d'innovation sont donc directement liées.

Meckstroth (2016) présente de nouvelles données qui montrent l'importance de l'industrie manufacturière dans la chaîne de valeur complexe des entreprises des États-Unis. Cette étude a permis de constater que la chaîne de valeur des biens manufacturés, à laquelle on ajoute la fabrication destinée aux chaînes d'approvisionnement d'autres secteurs, représentait un tiers environ du PIB et de l'emploi aux États-Unis. Elle a également fait apparaître que le multiplicateur de valeur ajoutée du secteur manufacturier national était de 3.6, soit un chiffre bien supérieur à celui habituellement calculé. En d'autres termes, pour chaque dollar de valeur ajoutée du secteur manufacturier national produisant des biens manufacturés destinés à satisfaire la demande finale, 3.60 USD de valeur ajoutée supplémentaires sont générés ailleurs dans l'économie. Enfin, pour chaque emploi à temps complet dans le secteur manufacturier produisant de la valeur destinée à satisfaire la demande finale, 3.4 emplois en équivalent temps plein sont créés dans des secteurs non manufacturiers : ce multiplicateur d'emploi est bien supérieur à celui de tous les autres secteurs. Les industries à plus forte valeur ajoutée semblent présenter des multiplicateurs encore supérieurs. Pour résumer, la constatation majeure de Meckstroth est que les estimations actuelles de la part du secteur manufacturier dans le PIB ne sont pas complètes et sont largement sous-évaluées. Compte tenu de l'influence de ce secteur sur l'économie des États-Unis, il apparaît nécessaire de s'intéresser à son déclin et de réorienter l'action publique en conséquence.

Émergence de la fabrication avancée comme priorité d'action au niveau fédéral

Lorsque Barack Obama a pris ses fonctions en janvier 2008, il faisait face à la grande récession, c'est-à-dire le premier ralentissement de l'économie à atteindre les niveaux de déclin économique de la dépression des années 30, avec le plus fort taux de chômage à long terme depuis cette dernière et un nombre de chômeurs supérieur à 15 millions (Bureau of Labor Statistics, 2012). Comme nous l'avons vu plus haut, le secteur manufacturier a été le plus durement touché, avec celui de la construction. En 2008-09, l'administration s'est employée en priorité à faire voter par le Congrès, puis à mettre en œuvre, une loi de relance de l'économie axée sur la création d'emplois à court terme, pouvant être immédiatement pourvus, et à sauver un secteur automobile en faillite. Une fois le plan de relance en place, elle a commencé à cibler certains des problèmes structurels de fond de l'économie : la politique industrielle figurait en bonne place sur cette liste.

Précédents historiques témoignant d'un rôle de l'administration fédérale dans le secteur manufacturier

Le rôle de l'administration fédérale dans le système d'innovation des États-Unis découle en grande partie de la Seconde Guerre mondiale, avec le lancement d'un effort de guerre majeur dans le domaine technologique, en étroite coordination avec les entreprises et les laboratoires industriels et avec les chercheurs universitaires¹¹. Ce système a été démantelé à la fin de la guerre, mais Vannevar Bush, conseiller scientifique du président Roosevelt, a travaillé aux côtés de ce dernier pour préserver un élément clé qui s'était développé à grande échelle pendant la guerre : les universités de recherche financées par l'administration fédérale et appuyées par des organismes de recherche au niveau fédéral. Le problème qui se posait à la fin de la guerre ne tenait pas au système manufacturier du pays : son système de production en série dominait la production mondiale. Le défi consistait plutôt à créer une base de recherche fondamentale à partir de ce qui avait été amorcé pendant la guerre. Aussi, lorsque les États-Unis ont élaboré leur système d'innovation soutenu au niveau fédéral, il fut organisé autour de la R-D à un stade précoce. L'innovation dans la production n'a même pas été envisagée. On l'a vu, l'Allemagne et le Japon abordaient l'après-guerre avec un problème différent – reconstituer leurs bases industrielles – et ont donc concentré leur attention sur une innovation entraînée par le secteur manufacturier, tandis que les États-Unis privilégiaient l'innovation induite par la R-D.

La production de nouvelles technologies constituant une part importante des systèmes d'innovation, une brèche majeure guettait le système américain, comme indiqué plus haut. Celle-ci a commencé à créer des difficultés dans les années 70 et 80 lorsque les États-Unis se sont mesurés au secteur manufacturier nippon. Le Japon avait innové dans les techniques et procédés de production pour mettre en place une fabrication de qualité, en s'inspirant dans une large mesure de ce qui se pratiquait dans les secteurs de l'automobile et de l'électronique grand public. Les États-Unis, satisfaits de leur modèle de production en série, étaient totalement passés à côté de cette avancée et ont peiné pendant des années pour rattraper leur retard.

Dans ses efforts pour revenir à la hauteur de la production nipponne, le pays a élaboré dans les années 80 une série de programmes destinés à compléter les activités de recherche fondamentale (Bonvillian, 2014) :

- La **Bayh-Dole Act**, premier texte d'une nouvelle génération de lois sur la compétitivité, a été adoptée en 1980. Traditionnellement, les droits sur les résultats des recherches

financées par l'administration fédérale revenaient à cette dernière. Comme l'administration fédérale n'assumait pas la mise en œuvre des technologies, cette propriété intellectuelle n'était pas exploitée. La loi Bayh-Dole a transféré la propriété des résultats de recherche aux universités dans lesquelles les travaux avaient été menés, donnant à ces établissements des intérêts dans la commercialisation de leurs résultats et incitant les chercheurs universitaires à endosser un rôle d'entrepreneur.

- La création du partenariat de vulgarisation industrielle (*Manufacturing Extension Partnership*, MEP) a été approuvée en 1988, au vu du succès du programme de vulgarisation agricole en place de longue date aux États-Unis. Ce partenariat visait à apporter les tout derniers procédés et techniques de fabrication aux petites entreprises manufacturières du pays – celles-ci représentant une part de plus en plus grande du secteur manufacturier américain – et à leur fournir des conseils sur les dernières avancées susceptibles d'offrir des gains de productivité. Le MEP a mis en place des centres de vulgarisation dans tous les États (qui en partagent les coûts), avec le soutien d'une petite équipe au siège du Département du Commerce, chargée de l'évaluation des programmes et de la transmission des meilleures pratiques aux centres.
- Le programme de recherche en faveur de l'innovation dans les petites entreprises (**Small Business Innovation Research**, SBIR) apportait à de petites entreprises et à des start-ups des subventions destinées à leur permettre de lancer des projets de R-D. Ces financements étaient accordés dans le cadre d'une mise en concurrence et étaient gérés par les 11 agences fédérales de R-D les plus importantes, dans le cadre de leurs programmes de recherche. L'objectif était que les petites entreprises innovantes du secteur des hautes technologies soient associées aux efforts de R-D de l'administration fédérale.
- Le programme de développement des technologies avancées (**Advanced Technology Programme**, ATP) a été créé en 1988 dans le cadre du programme de l'Institut national de normalisation et de développement technologique (National Institute of Standards and Technology, NIST) du Département du Commerce afin de financer un large socle d'activités de R-D à haut risque et à rémunération potentiellement élevée menées par les industriels. Ce programme a permis de favoriser des projets de développement de nouvelles technologies à des stades plus avancés, mais son budget a été progressivement réduit à zéro dans les années 2000 par le Congrès, qui le considérait comme une « politique industrielle » fédérale trop interventionniste¹².
- **Sematech** a été formé par un consortium de fabricants de semi-conducteurs et d'équipementiers qui, à la fin des années 80, se voyaient disparaître à très court terme du fait de la concurrence intense du Japon. La technologie des semi-conducteurs étant indispensable à de nombreux systèmes de défense, cette initiative n'était pas sans conséquences sur la sécurité nationale, aussi un montant équivalent au financement des industriels a-t-il été apporté par l'Agence pour les projets de recherche avancée de défense (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA). Le consortium a axé ses efforts sur des améliorations majeures de l'efficacité et de la qualité dans la fabrication des semi-conducteurs. Au bout de cinq ans, il était redevenu le principal producteur, et le financement de la DARPA a pris fin en 1996. Sematech a continué ses activités, en tant qu'organisation de planification technologique de premier plan, afin de maintenir le secteur sur une trajectoire vérifiant la loi de Moore. Le modèle Sematech est celui qui s'approche le plus des approches organisationnelles envisagées pendant la période 2010-12.

Ces programmes liés au secteur manufacturier sont cependant restés modestes, et leur échelle limitée, car, au début des années 90, les États-Unis, s'appuyant sur les avancées de leur puissant système d'innovation axé sur la R-D, ont pu prendre la tête de la révolution des TI. Ils ont connu une décennie de forte croissance du PIB et de la productivité, et ont largement perdu de vue le secteur manufacturier. L'émergence de la concurrence de la Chine dans ce secteur, exacerbée par la grande récession, a déclenché un nouveau signal d'alarme.

Rapport de 2011 de la Maison Blanche sur la fabrication avancée

Dans le contexte de la crise économique et d'une série de nouvelles études¹³, un petit groupe au sein du Bureau des politiques scientifiques et technologiques (Office of Science and Technology Policy, OSTP) de la Maison Blanche avait rédigé un rapport dans lequel il demandait instamment un nouvel engagement de l'administration en faveur du secteur manufacturier, sous la forme d'une approche plus structurelle et à plus long terme (de préférence à une relance économique à court terme).

Le rapport final de 2011 préparé par l'OSTP, intitulé « Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing » (Assurer la primauté des États-Unis dans la fabrication avancée), définissait la fabrication avancée comme la fabrication de produits classiques ou nouveaux par des procédés dépendant de la coordination de divers éléments – information, automatisation, calcul, logiciel, détection et mise en réseau – et/ou utilisant des matériaux innovants et des capacités scientifiques émergentes (PCAST, 2011). Le rapport faisait valoir que des investissements de l'administration fédérale dans la fabrication avancée pourraient mettre les États-Unis en situation de retrouver leur statut de chef de file mondial de l'industrie manufacturière, et ainsi de créer des emplois bien rémunérés, de soutenir l'innovation dans le pays et de renforcer la sécurité nationale. En revanche, si le pays ne réussissait pas à reprendre l'initiative dans la production, cela pourrait compromettre sa capacité à élaborer la prochaine génération de produits avancés. La préservation des activités manufacturières permettait de nouveaux effets de synergie, grâce auxquels la conception, l'ingénierie, la montée en puissance et les procédés de production apporteraient des retours d'information utiles à la création de produits et à l'innovation, ce qui contribuerait à générer à la fois de nouvelles technologies et des produits de nouvelle génération.

Le rapport proposait de créer des « infrastructures et installations partagées », qui permettraient aux petites et moyennes entreprises manufacturières d'élaborer de nouvelles approches de la production génératrices de gains de productivité, et de raccourcir ainsi les délais de prototypage, d'essai et de fabrication de nouveaux produits. Il recommandait d'apporter un soutien fédéral à la recherche appliquée de procédés de fabrication avancés destinés à un large éventail de secteurs de production, afin de permettre aux entreprises de développer plus rapidement de nouvelles activités de fabrication aux États-Unis. Il est intéressant de noter que cela comprenait « une aide à la création et à la diffusion de méthodes de conception performantes, susceptibles de renforcer considérablement la capacité des entrepreneurs à concevoir des produits et des procédés » (PCAST, 2011, p. iii).

Le rapport de 2011 de l'OSTP recommandait également de multiplier les partenariats entre les industriels, les universités et les pouvoirs publics (cofinancés par ces derniers et par les industriels), ce qui pourrait contribuer au développement de technologies émergentes. Il préconisait notamment une « initiative en faveur de la fabrication avancée » réunissant diverses agences gouvernementales et susceptible de venir se greffer sur des collaborations entre industriels et universités pour permettre l'élaboration d'approches

plus approfondies. Point important, la publication de ce rapport et l'annonce simultanée d'un nouveau partenariat public-privé pour donner suite à cette initiative ont marqué un engagement de la Maison Blanche en faveur d'une stratégie d'innovation industrielle.

Naissance de l'Advanced Manufacturing Partnership : juin 2011

Le 24 juin 2011, le président annonçait un partenariat en faveur de la fabrication avancée (*Advanced Manufacturing Partnership*, AMP) et nommait le directeur général de Dow Chemical et le président du Massachusetts Institute of Technology (MIT) coprésidents de ce consortium regroupant industriels, universités et pouvoirs publics.

Côté industriels, l'AMP comprenait les directeurs généraux d'un groupe de grandes sociétés opérant dans différents secteurs. Côté universités, il comptait les présidents de cinq établissements supérieurs réputés pour leurs capacités dans les domaines de l'ingénierie et des sciences appliquées¹⁴. Côté pouvoirs publics, enfin, le président du Conseil économique national (National Economic Council, NEC) et le Secrétaire au Commerce par intérim codirigeaient les activités interorganismes. Au sein de la Maison Blanche, le personnel du NEC et de l'OSTP pilotait l'initiative. Les agences qui participaient étroitement au soutien de cette dernière étaient le NIST, au sein du Département du Commerce, la NSF, par l'intermédiaire de sa Division technique, le Département de l'Énergie (US DOE), par l'intermédiaire de son Bureau de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables (Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE), et le Département de la Défense, par l'intermédiaire de son programme Mantech. Le Conseil du Président sur la science et la technologie (President's Council of Advisors on Science and Technology, PCAST), installé dans l'OSTP, jouait le rôle de base administrative de l'initiative et a officiellement publié le rapport de l'AMP (rédigé par l'équipe de l'AMP).

Rapport AMP1.0 (juillet 2012) : « Capturing Domestic Competitive Advantage in Advanced Manufacturing » (Exploiter l'avantage concurrentiel national dans la fabrication avancée)

Le premier rapport de l'AMP appelait à une « stratégie en faveur de la fabrication avancée » fondée sur un « processus systématique visant à recenser et hiérarchiser les technologies intersectorielles essentielles » (PCAST, 2012). Ce processus devait mener à une stratégie continue, qui à son tour pourrait se traduire par des plans d'action plus détaillés pour chacun des nouveaux paradigmes technologiques. Le rapport proposait également un cadre de hiérarchisation des investissements fédéraux dans ce type de technologies, en fonction de facteurs tels que les besoins du pays, la demande mondiale, la compétitivité du secteur manufacturier américain sur le terrain et le niveau de maturité technologique. Il appelait aussi à évaluer la disposition des industriels, des chercheurs universitaires et de l'administration à s'engager sur la voie de la technologie, par exemple, dans le cas de l'administration, à déterminer si la technologie pouvait répondre aux besoins en matière de sécurité nationale (PCAST, 2012). Sur la base d'un sondage réalisé auprès de groupes de fabricants et de spécialistes universitaires, les auteurs du rapport avaient dressé une liste préliminaire de domaines technologiques prioritaires : détection, mesure et contrôle de procédé avancés ; conception, synthèse et traitement de matériaux avancés ; technologies de visualisation, technologies informatiques et techniques de fabrication numériques ; fabrication durable ; nanofabrication, fabrication flexible de produits électroniques ; biofabrication et bio-informatique ; fabrication additive ; équipements de fabrication et d'essai avancés ; robotique industrielle et technologies avancées de formage et d'assemblage. Là encore, les stratégies en

faveur de ces domaines devaient devenir au fil du temps de véritables plans d'action coordonnés entre les différentes technologies et mis à jour régulièrement.

Pour accompagner le développement de ces technologies, ce premier rapport de l'AMP appelait à renforcer les activités de R-D dans ces domaines. Point important, il préconisait de créer des instituts d'innovation industrielle (*manufacturing innovation institutes*, MII), constitués de petites et moyennes entreprises liées à de grandes entreprises et appuyés par des capacités universitaires pluridisciplinaires en ingénierie et sciences appliquées et cofinancés à coûts partagés par l'administration (aux niveaux de l'administration fédérale et des États) et par les industriels participants. L'idée était de transposer dans le contexte américain la réussite des instituts Fraunhofer allemands (60 instituts répartis dans toute l'Allemagne, opérant dans un large éventail de domaines technologiques). La version américaine devait être un modèle placé sous la direction du secteur, qui serait commun à un ensemble de petites et moyennes entreprises, lesquelles en partageraient les coûts – à l'instar des instituts Fraunhofer –, et qui serait appuyé par les universités, assumant un rôle de développement technologique en sciences appliquées et en ingénierie, et par l'administration (aux niveaux de l'administration fédérale et des États). Les instituts américains devaient opérer au niveau régional afin de tirer parti de pôles industriels constitués dans des domaines spécifiques, mais être en mesure de transmettre leurs avancées dans les technologies et les procédés aux fabricants de tout le pays. Pour faciliter cette transmission à l'échelle nationale et pour relier les MII autour d'enseignements partagés, le rapport proposait de créer un Réseau national des instituts d'innovation industrielle (National Network of Manufacturing Innovation Institutes, NNMI). Ces mesures reposaient sur l'idée qu'il y avait un fossé à combler entre la R-D financée par les pouvoirs publics et le rôle de développement de produits assuré par les industriels. Il manquait simplement un système d'appui des stades de développement et de démonstration des technologies et de développement des systèmes et des sous-systèmes – soit les niveaux de maturité technologique (NMT) 4 à 7¹⁵. Le rôle du réseau était de combler ce fossé.

Étude du MIT : « Production in the Innovation Economy » (PIE) – 2010-13 (La production dans l'économie de l'innovation)

L'étude PIE du MIT a été publiée en 2013, après celle de l'AMP (2012). Un certain nombre d'études majeures sur le secteur manufacturier ont été publiées au cours de cette période, mais le rapport en deux volumes du MIT, que ce dernier avait commencé à préparer en 2010, était peut-être le plus vaste et le plus approfondi, et les rapports de l'AMP se sont considérablement inspirés de ses conclusions.

Fondamentalement, l'étude PIE posait une question primordiale : quelles sont les capacités de production nécessaires pour soutenir l'innovation et concrétiser ses avantages – emplois de qualité, entreprises solides, création d'entreprises et croissance économique durable ? (Berger, 2014)¹⁶. Partant du principe, admis de longue date par les économistes, que l'innovation est nécessaire à la croissance économique et à la productivité, l'étude PIE s'est intéressée aux « conditions à réunir pour soutenir l'innovation sur la durée et pour la faire éclore dans l'économie » (Berger, 2014, chapitre 7). L'étude PIE a étudié l'innovation dans les produits, dans les procédés, dans les types d'entreprise, dans les autres pays et à travers les avancées technologiques et l'amélioration de la main-d'œuvre. Elle a contribué à attirer l'attention des États-Unis, à compter de 2010, sur l'application de la théorie de l'innovation à la production. Cette théorie avait été appliquée moult fois à des technologies nouvelles particulières – aux technologies de l'information, par exemple –, mais jamais systématiquement

au système de production américain. C'était une nouvelle façon de voir les choses. L'étude PIE s'est penchée tour à tour sur cinq domaines généraux qui, chacun, ont amené une série d'approches neuves de l'action publique.

Le rapport PIE a mis en évidence une économie mondialisée, dans laquelle les activités de recherche, de développement, de production et de distribution étaient désormais fragmentées et dispersées. Cette évolution découlait de la transformation des structures d'actionnariat et de contrôle des entreprises : de grandes organisations qui avaient initialement opté pour une stratégie d'intégration verticale avaient commencé à se dépouiller de nombre de leurs attributs, de la R-D aux services après-vente, en passant par la production. Il restait très peu d'entreprises véritablement intégrées verticalement. La réorganisation s'était faite sous la pression d'un secteur des services financiers qui, au début des années 80, avait exigé des entreprises qui recherchaient des capitaux qu'elles se recentrent autour d'un « cœur de métier » – les plus resserrées et les plus légères en actifs bénéficiant des évaluations boursières les plus élevées une fois débarrassées de leurs divisions les moins rentables (Berger, 2014). L'une des premières fonctions à quitter le périmètre de nombreuses entreprises a été la fabrication, car cela permettait de réduire les obligations capitalistiques ainsi que les engagements liés aux effectifs. Les unités de fabrication sont souvent parties à l'étranger. Les avancées dans les technologies de l'information ont contribué à faciliter cette évolution : des machines pilotées par ordinateur, à partir de spécifications numériques, permettaient aux entreprises de produire des biens sans les liaisons verticales qui étaient auparavant nécessaires. La diminution des obstacles au commerce à l'échelle mondiale et l'entrée de la Chine dans l'Organisation mondiale du commerce ont également favorisé la production distribuée.

L'écosystème de la fabrication s'est étioilé avec le recentrage des entreprises sur leurs compétences de base et la concurrence de l'étranger. On a vu diminuer l'appui des systèmes de formation, les incitations à l'adoption de pratiques optimales par les fournisseurs et le nombre de niveaux au sein des chaînes d'approvisionnement. Autrefois, de grandes entreprises finançaient des laboratoires industriels puissants menant des activités de recherche fondamentale et appliquée ; désormais, la recherche fondamentale effectuée au niveau industriel diminuait, tandis que la recherche appliquée se recentrait sur des développements progressifs susceptibles d'avoir une incidence directe sur les résultats des entreprises. L'expansion s'est faite plus fréquemment par des fusions et acquisitions que par une innovation en interne. Par le passé, les grandes entreprises à structure verticale avaient été à l'origine de nombreux « biens publics » – recherche, formation et transfert de technologies et de compétences techniques aux fournisseurs – dont les retombées dans l'écosystème étaient une source d'aide pour les petites et moyennes entreprises. Désormais, la production privée de tels biens publics diminuait.

En résumé, les grandes entreprises ont abandonné leur modèle vertical, se sont recentrées sur leur « cœur de métier », ont allégé leurs actifs et réparti leur production. Les vides qui sont apparus dans l'écosystème pourraient être qualifiés de défaillances du marché, car le réseau toujours plus limité de compétences complémentaires a restreint la capacité des entreprises, celles-ci rencontrant un nombre croissant de difficultés pour accéder aux anciens biens industriels communs. Les petites et moyennes entreprises se sont retrouvées de plus en plus « livrées à elles-mêmes », dans un écosystème industriel érodé. La disparition des services bancaires locaux les a également touchées de plein fouet. À mesure que les services financiers se tournaient vers des modèles d'investissement nationaux et internationaux, on a vu disparaître le banquier local, qui connaissait individuellement les

personnes auxquelles il prêtait de l'argent. Il est devenu plus difficile de trouver des fonds, et les petites et moyennes entreprises ont eu davantage de mal à obtenir les ressources nécessaires pour une montée en puissance de la production de leurs innovations. En d'autres termes, le bain industriel dans lequel nageait le fabricant moyen a commencé à s'assécher.

L'étude PIE s'est également penchée sur une aventure technologique. Un exemple de premier plan a permis d'évaluer de manière précise les incidences possibles de l'innovation sur la production. Cette étude de cas portait sur un ensemble de technologies révolutionnaires destinées à permettre une « fabrication personnalisée en série » (Berger, 2014). Elles impliquaient une production locale à petite échelle, associant l'impression 3D et des normes commandées par ordinateur, à des machines conçues pour fabriquer de petits lots de produits de conception unique avec un rapport coût-efficacité aussi élevé que dans le cadre d'une production uniforme en série. L'étude de cas s'est intéressée aux technologies qui permettaient cela et a conclu que le modèle était viable. Il pourrait marquer un changement radical dans la nature de la production. Ce modèle d'innovation industrielle avancée a été jugé prometteur, car il crée un capital organisateur permettant de restaurer l'écosystème de production manufacturière. L'étude a également été révélatrice des problèmes rencontrés par les start-ups qui travaillent sur des technologies matérielles pour obtenir les financements censés leur permettre de passer au stade de la fabrication : il est apparu que le système de capital-risque n'était tout simplement pas adapté à ces entreprises, qui avaient besoin d'un apport en capital plus important, et à plus long terme, que ce que les sociétés de capital-risque étaient habituées à fournir (Reynolds, Semel et Lawrence, 2014).

Pour terminer, l'étude PIE a analysé les besoins en main-d'œuvre. Les rapports précédents interrogeaient généralement de hauts responsables du secteur manufacturier qui, immanquablement, déploraient de ne pouvoir trouver des travailleurs qualifiés¹⁷. Or, pouvait-il réellement y avoir pénurie de travailleurs dans un secteur qui s'était défait de près d'un tiers de sa main-d'œuvre dans les années 2000 ? Dans le cadre de l'étude PIE, les responsables du recrutement des entreprises n'ont pas été interrogés sur la disponibilité de travailleurs qualifiés, mais plus précisément sur le délai nécessaire pour pourvoir les postes vacants. Les responsables ont indiqué que, dans 76 % des cas, les postes étaient pourvus rapidement (Osterman et Weaver, 2014). La situation sur le front des compétences n'avait donc aucun caractère d'urgence. Pourtant, 24 % des entreprises manufacturières continuaient à faire état de postes demeurés vacants sur de longues périodes. C'est sur ce point que l'analyse est devenue plus intéressante. Un sous-ensemble de ce groupe comprenait généralement des entreprises récentes, travaillant sur des technologies avancées. Ces entreprises rencontraient effectivement des difficultés pour trouver des compétences. Partant, si l'étude PIE proposait de se tourner vers une fabrication avancée emmenée par de nouvelles technologies et de nouveaux procédés, il était clair que le système de formation devrait s'adapter pour relever ce défi. Les recommandations préconisaient de mettre en place un « nouveau système de production de compétences » imposant une collaboration entre les employeurs et les *community colleges*, des programmes de soutien public aux niveaux de l'administration fédérale, des États et des régions, et des organismes intermédiaires pour aider à gérer les liens et les communications.

Globalement, l'étude PIE préconisait de reconstituer l'écosystème industriel. De nouvelles capacités et installations partagées par les entreprises et les secteurs industriels étaient nécessaires pour renforcer l'innovation dans la production. Les grandes entreprises et les pouvoirs publics pouvaient assumer un rôle fédérateur, comparable à celui que

Sematech avait joué dans le secteur des semi-conducteurs à la fin des années 80 et dans les années 90. Une collaboration similaire entre les entreprises, les établissements d'enseignement et les intermédiaires publics pouvait également être efficace pour la formation professionnelle.

Rapport AMP2.0 (octobre 2014): « Acclerating US Advanced Manufacturing » (Accélérer le développement de la fabrication avancée aux États-Unis)

Le président a « redéfini la charte » de l'AMP en septembre 2013, pour que mette en œuvre le rapport de 2012 et définit de nouvelles stratégies à partir du rapport AMP1.0. Ce projet a marqué une nouvelle étape majeure dans l'élaboration de politiques en faveur de la fabrication avancée.

L'administration ayant déjà lancé la création d'instituts d'innovation industrielle, le rapport AMP2.0 a ciblé les politiques complémentaires (PCAST, 2014). Sur le front des politiques technologiques, ce rapport prônait une stratégie nationale coordonnée entre les secteurs public et privé, en faveur des « techniques de fabrication émergentes ». Cette stratégie comprendrait des « domaines technologiques industriels hiérarchisés » qui devraient servir de guide pour gérer un « portefeuille d'investissements dans les technologies industrielles avancées » au niveau fédéral. Pour montrer que ce concept pouvait fonctionner, le groupe AMP2.0 a passé en revue les technologies industrielles émergentes prioritaires et a élaboré ses propres stratégies pilotes dans trois domaines définis comme prioritaires dans l'étude : détection, contrôle et plateformes de fabrication avancés ; visualisation, informatique et fabrication numérique ; et fabrication de matériaux avancés. L'administration s'est ensuite employée à créer des instituts d'innovation industrielle dans ces domaines prioritaires, en se basant sur les stratégies définies.

Les investissements fédéraux ne devaient pas être réservés aux instituts d'innovation industrielle. Il était nécessaire de mettre en place un appui à la R-D dans les techniques de fabrication, et d'autres entités institutionnelles devraient être créées à cette fin. Ces mécanismes comprenaient notamment des centres d'excellence dans le domaine manufacturier, ainsi que des bancs d'essai de technologies qui pourraient servir d'infrastructures de soutien supplémentaires pour les instituts. Les infrastructures de R-D et de soutien devaient être mises en place en coopération avec les industriels. On préconisait la création d'un consortium consultatif sur la fabrication avancée pour apporter des éléments au secteur privé, à la fois sur la stratégie et sur l'infrastructure de R-D. Le rapport prévoyait que, pour se développer au fil du temps, les instituts d'innovation industrielle devaient s'inscrire dans une action et une infrastructure de R-D solides, ce qui permettrait d'entretenir des avancées continues dans les technologies que ces instituts soutenaient. On préconisait en outre la création d'un « réseau NNMI partagé » qui relierait entre eux les instituts d'innovation industrielle et leur permettrait de partager leurs idées, leurs technologies et leurs meilleures pratiques. Des normes et procédés communs étaient également recommandés, afin de faire progresser l'application des nouvelles techniques de fabrication.

Dans le domaine de la formation et de la valorisation de la main-d'œuvre, le rapport recommandait un système national de certifications de compétences industrielles transférables et cumulables. Ces certifications seraient utilisées par les employeurs dans les embauches et les promotions, et permettraient aux personnes travaillant dans la production d'obtenir des qualifications pouvant être aisément transférées et reconnues. Il a également été proposé d'élaborer des programmes de formation et d'accréditation en ligne, avec un

soutien fédéral qui serait apporté via des programmes de formation professionnelle. Les membres de l'AMP2.0 ont eux-mêmes mis au point des boîtes à outils et des feuilles d'instruction de formation détaillées, ainsi qu'un programme pilote d'apprentissage.

L'équipe du rapport comprenait en outre un groupe de travail sur la « politique de montée en puissance », chargé d'examiner les difficultés rencontrées par les petites et moyennes entreprises et les start-ups pour obtenir les financements nécessaires à la montée en puissance de la production des innovations. Ce problème avait été mis en évidence dans l'étude PIE du MIT, et des discussions approfondies ont été menées avec des sociétés de capital-risque, des entreprises participant dans des fonds de capital-investissement ou de capital-risque, ainsi qu'avec d'autres sources possibles de financement de l'expansion. Un ambitieux fonds de placement public-privé spécialisé dans la montée en puissance a été envisagé pour financer des sites de production pilotes pour les nouvelles technologies. En outre, un système amélioré de mise en relation des fabricants avec des partenaires stratégiques potentiels a été préconisé pour faciliter ce développement de la production. L'insuffisance de financement de la montée en puissance est devenue l'un des principaux thèmes du rapport. L'administration a par la suite proposé de créer un nouveau financement pour y remédier, mais, dans un contexte de ressources limitées, le Congrès n'a pas donné suite à cette proposition.

Loi du Congrès relative au secteur manufacturier : 2014

Le dernier épisode de la saga des grands rapports et des initiatives majeures sur la fabrication avancée concerne la législation du Congrès en la matière. Pour qu'une action gouvernementale soit durable, elle doit être autorisée par le Congrès, et une base de crédits budgétaires réguliers et relativement stables doit suivre. Comme on peut le voir, les engagements pris par l'administration découlent en définitive de la législation, et du financement correspondant, et non de décrets administratifs.

Après 2010 en particulier, le Congrès a été le théâtre de profondes divisions idéologiques (y compris au sein du parti majoritaire dans cette enceinte) qui ont bloqué les projets de loi. Malgré ces divisions, le Congrès a réussi à adopter une loi importante sur le secteur manufacturier, avec un large soutien des deux partis. Cela témoigne de l'influence de ce secteur dans la politique américaine, du fait du nombre d'emplois et des salaires relativement élevés qu'il représente encore. Après avoir été adopté par la Chambre des représentants, et être passé devant une commission du Sénat, le projet de loi sur le secteur manufacturier a été ajouté à un grand projet de loi de portée générale qui portait ouverture de crédits pour le financement de l'ensemble des agences gouvernementales pendant l'année budgétaire et dont l'adoption était garantie. En tant qu'ajout à ce texte, le projet de loi sur le secteur manufacturier a été adopté par la Chambre des représentants le 11 décembre et par le Sénat le 13 décembre 2014.

Il¹⁸ autorisait la création d'un réseau de 15 instituts régionaux pour l'innovation dans l'industrie répartis sur l'ensemble du territoire. Chacun d'eux était axé sur une technologie, un matériau ou un procédé particulier lié à la fabrication avancée (House Committee on Science, Space and Technology, 2014), et tous devaient constituer un réseau pour l'innovation dans l'industrie (Network for Manufacturing Innovation). Le NIST était l'agence responsable de la création du réseau, mais pouvait collaborer avec d'autres agences fédérales pour la sélection des instituts et l'attribution des financements, les coûts devant être partagés entre les industriels et l'administration au niveau fédéral et au niveau des États. Le NIST a été chargé d'élaborer et de mettre à jour régulièrement un plan stratégique relatif au

réseau d'instituts. Il lui a également été demandé d'associer les instituts au partenariat MEP existant, lequel proposait aux petits fabricants dans chacun des États des conseils en matière d'efficacité et de technologie. Les instituts devaient quant à eux se charger d'activités d'éducation et de formation.

Naturellement, dans l'intervalle, une série d'instituts d'innovation industrielle avaient déjà été créés, financés par le programme Mantech du Département de la Défense et par le bureau de l'EERE du Département de l'Énergie. L'idée du projet de loi de placer les nouveaux instituts sous la direction du NIST ne correspondait pas à la tournure réelle qu'avait prise la situation, mais ce texte constituait, de la part du Congrès, une validation importante du modèle des instituts d'innovation industrielle. Il préconisait également la création d'un réseau reliant les instituts ainsi que l'élaboration d'une stratégie continue en faveur de la technologie dans l'industrie, et donnait au NIST la compétence nécessaire pour financer ses propres instituts s'il parvenait à réunir le budget nécessaire, ce qu'il a pu faire en 2016. Un Congrès notoirement divisé avait réussi à obtenir des deux partis qu'ils s'accordent sur une loi en faveur de la fabrication avancée et sur un modèle novateur de MII pour soutenir cette dernière.

Le modèle d'institut d'innovation industrielle avancée

L'un des principaux objectifs des MII était de combler une brèche dans le système d'innovation industrielle américain, de créer un espace dans lequel la fabrication avancée pourrait se développer, grâce à une collaboration entre les entreprises du secteur (petites et grandes), les universités et les pouvoirs publics (Molnar, Linder et Shuart, 2016). Le montant alloué par l'administration fédérale à chaque nouvel institut pour une période de cinq ans devait être compris entre 70 millions et 120 millions USD. Le consortium d'entreprises, d'universités et d'administrations d'États fédérés sur lequel chaque nouvel institut s'appuyait devait apporter une contribution au moins égale à l'investissement de l'administration fédérale.

Un modèle complexe

Ce modèle était très complexe pour les nouveaux instituts. Le rôle des pouvoirs publics n'était pas d'accorder une bourse unique à un chercheur principal afin de lui permettre de mener à bien un projet de recherche scientifique conformément à un plan soigneusement défini dans la demande de subvention, comme cela est habituellement le cas en matière de R-D. Leur rôle était d'établir des liens avec un ensemble large et complexe d'entreprises industrielles présentant de grandes différences de taille et appartenant à des secteurs très variés, ainsi que d'institutions universitaires allant de grandes universités de recherche à des *community colleges*, en passant par des universités régionales. Les administrations des États fédérés devaient cofinancer les instituts, les industriels et l'administration fédérale soutenant des projets connexes spécifiques. À l'exception peut-être de Sematech¹⁹, l'administration fédérale n'avait jamais rien tenté de la sorte auparavant.

La composition des instituts était variée, tout comme leur liste de tâches :

- « Créer » de nouvelles technologies, de nouveaux procédés et de nouveaux « moyens » de production.
- Servir de « terrain d'essai » pour les nouvelles technologies et les procédés connexes.
- Appuyer les efforts de « déploiement » des innovations de production.
- « Renforcer les compétences de la main-d'œuvre » afin d'améliorer la production et les procédés associés aux technologies émergentes.

L'objectif général était de permettre au secteur manufacturier national de se développer autour du domaine d'innovation ciblé par chaque institut.

Les instituts d'innovation industrielle devaient également se constituer en réseau, pour permettre des collaborations croisées et des échanges de pratiques optimales. À mesure que la fabrication avancée s'imposerait, il est probable que les petites ou moyennes entreprises ne seraient plus cantonnées dans les problèmes d'impression 3D, mais auraient une série de défis de production à relever, dans de nombreux domaines nouveaux allant des technologies de production numérique aux matériaux avancés. Par ailleurs, la production est implantée dans des régions souvent spécialisées dans des domaines spécifiques – industrie automobile dans le Middle West, activités aérospatiales sur les côtes et industrie pharmaceutique dans le Nord-Est. Or, si les instituts devaient avoir une implantation régionale, ils devaient aussi transmettre leurs avancées et leur savoir-faire aux fabricants à l'échelle nationale. Les instituts et le réseau NNMI se voyaient donc confier une mission générale dont la dimension était à la fois régionale et nationale.

Rôle de chef de file des agences : 2012

Les instituts ne sont pas sortis d'une « chaîne de montage » administrative très organisée et bien réglée. Ils se sont constitués petit à petit. Comme nous l'avons vu dans la précédente section, après les élections de 2010, le monde politique était en proie à une profonde division idéologique. Plutôt que d'attendre (éventuellement en vain) qu'un Congrès divisé autorise et finance un nouveau programme, la nouvelle administration a fait les yeux doux aux agences pour que celles-ci commencent à créer des instituts, en utilisant leurs pouvoirs existants et des financements récupérés d'autres domaines. Les agences se sont donc retrouvées à la manœuvre et, à compter de 2012, ont sélectionné, pour créer les instituts, des domaines d'action qui correspondaient à leurs missions. Le rapport AMP1.0 était parti du principe que les domaines d'action des instituts seraient définis selon un modèle ascendant, sous l'impulsion des industriels. Au lieu de cela, les choses se sont ordonnées selon une approche descendante, et les agences ont choisi les domaines d'action en fonction de leurs propres missions, et non d'une mission globale au service du secteur manufacturier. Cela n'a pas eu que de mauvais côtés. Ayant la main sur la sélection et la direction, les agences ont opté pour des domaines d'action qui les intéressaient directement, ce qui a peut-être rendu le projet plus durable que si le mandat avait été imposé par la Maison Blanche. Au fil du temps, cependant, les perspectives des agences se sont élargies. Les principaux domaines qui avaient été définis comme des priorités par les industriels dans les rapports AMP1.0 et AMP2.0 ont fini par cadrer avec les missions des agences. En outre, le fait que les agences soient en charge des instituts a eu tendance à accroître leur adhésion au nouveau programme.

Le Département de la Défense avait le budget le plus important, et a donc financé le plus grand nombre d'instituts. Ce département avait à son actif un historique fourni d'interventions économiques publiques menées en temps de guerre pour assurer des retombées technologiques et industrielles, ce qu'aucune autre agence n'osait envisager d'un point de vue politique. Le programme Mantech du Département de la Défense, basé dans le Bureau du Secrétaire à la Défense et disposant d'antennes dans chacun des services de l'Armée, remontait à de nombreuses décennies, mais avait cessé d'être un programme de défense important depuis au moins la fin de la guerre froide.

Avec les instituts d'innovation industrielle, toutefois, le programme Mantech remplissait désormais une mission nationale supervisée par le président lui-même²⁰. Malgré cela,

Mantech n'a pas bénéficié de nouveaux flux de financement importants, du fait du blocage exercé par le Congrès sur tous les nouveaux programmes, et a donc dû fonctionner avec le personnel réduit dont il disposait et tirer le maximum de ses budgets existants. Le rôle de Mantech a été compliqué par le fait qu'un certain nombre de programmes interdépendants des services de l'Armée devaient également être pris en charge. Ces programmes avaient d'autres priorités de service, d'autres systèmes d'établissement de rapports et d'autres besoins, et n'étaient pas tous basés dans le Bureau du Secrétaire à la Défense.

Un premier événement a contribué à éveiller l'intérêt du Département de la Défense. Lorsque les propositions ont commencé à affluer pour le premier institut, créé en 2012 et consacré à l'impression 3D (ou fabrication additive), le financement apporté par les industriels et les États n'était pas simplement équivalent à celui de l'administration fédérale : ces participants étaient prêts à investir bien plus. Cela a ouvert les yeux au personnel de Mantech, qui a découvert que l'effet de levier de ses investissements pourrait être bien supérieur à celui escompté. Dans son histoire récente, Mantech n'avait pas le souvenir qu'une telle perspective ni qu'une telle occasion de travailler sur de nouvelles technologies majeures à grande échelle se soient présentées. Soudain, le personnel de Mantech disposait d'un amplificateur de puissance.

Au Département de l'Énergie, les choses se sont passées différemment. Le bureau de l'EERE travaillait avec les industriels sur des technologies appliquées dans le domaine de l'énergie. Il avait de longue date mis en place un programme d'efficacité industrielle : l'industrie était depuis longtemps un grand utilisateur d'énergie, et les technologies de conservation et les technologies énergétiques plus efficaces offraient des gains considérables dans le secteur des énergies propres, ainsi que des économies potentielles pour les industriels. Aspect crucial, en l'absence de législation sur la tarification du carbone aux États-Unis, les nouvelles technologies énergétiques devaient être en mesure d'aligner leurs tarifs sur ceux des technologies fossiles déjà en place. Sauf à pouvoir abaisser leurs coûts de production, ces nouvelles technologies n'avaient aucune chance d'être un jour commercialisées. C'est ainsi que l'industrie avancée est devenue une grande priorité pour le bureau de l'EERE.

Les choses se sont également déroulées différemment pour le NIST du Département du Commerce. Malgré son implication importante dans l'AMP, et son rôle de coordination des agences, il a dû attendre 2016 pour obtenir un financement du Congrès en vue de créer un institut d'innovation industrielle. Lorsque le financement est arrivé, le NIST a voulu éviter l'approche descendante suivie par les agences pour sélectionner le domaine d'action de l'institut, et a cherché à faire remonter des propositions des consortiums d'industriels et d'universités. Le NIST a également eu un rôle de soutien, en obtenant que le Congrès approuve la loi sur la fabrication avancée en 2014, dans laquelle il occupait une place centrale.

La NSF était le quatrième acteur majeur de l'administration fédérale, mais sa spécialisation dans la recherche fondamentale limitait sa capacité à créer des instituts d'innovation industrielle. En revanche, sa Division technique a participé étroitement à l'élaboration des rapports de l'AMP, dirigé les programmes de recherche de la Fondation sur la fabrication avancée et supervisé un certain nombre de centres de recherches techniques axés sur les technologies industrielles. En outre, les programmes *Advanced Technology Education* (ATE, Formation aux technologies avancées) de la NSF ont mis l'accent sur la formation aux techniques de fabrication avancées dans les *community colleges*.

Les instituts d'innovation industrielle : 2012-16

Les instituts d'innovation industrielle sont la clé de voûte du programme consacré à la fabrication avancée. Ce groupe d'instituts avait reçu à l'origine le nom de NNMI (National Network of Manufacturing Innovation Institutes), mais a été rebaptisé ManufacturingUSA en 2016. Son éventail de domaines techniques est considérable ; l'internet des objets, par exemple, qui est le thème de l'initiative allemande « Industry 4.0 » en faveur de la fabrication avancée, est seulement l'un des domaines couverts par les instituts américains. Ce large éventail technique montre combien les répercussions d'une révolution de la fabrication avancée pourraient être importantes. Il constitue peut-être l'aspect le plus intéressant dans l'approche retenue par les États-Unis, et appelle une énumération des différents instituts.

Au début de 2017, il y avait au total 14 instituts : huit financés par le Département de la Défense, cinq par le Département de l'Énergie et un par le NIST²¹. Ce dernier pourrait en créer un autre en 2017 s'il trouve le financement nécessaire. Deux de ces instituts, et leurs domaines technologiques, sont décrits ci-après : tout d'abord l'Institut national pour l'innovation dans la fabrication additive (America Makes – National Additive Manufacturing Innovation Institute), puis, sous la forme d'une étude de cas plus détaillée, l'Institut pour l'innovation dans la fabrication de composites à haute performance (Institute of Advanced Composites Manufacturing Innovation). Une description des autres instituts est fournie en annexe à ce chapitre. Cette annexe présente les instituts suivants : l'Institut pour l'innovation dans la conception et la fabrication numériques (Digital Manufacturing and Design Innovation Institute, DMDII) ; l'Institut des innovations de demain dans les métaux légers (Lightweight Innovations for Tomorrow, LIFT), axé sur les métaux légers et modernes ; Power America, pour l'électronique de puissance de prochaine génération ; l'Institut américain pour la fabrication de systèmes photoniques intégrés (American Institute for Manufacturing Integrated Photonics, AIM Photonics) , NextFlex (Flexible Hybrid Electronics), spécialisé dans l'électronique hybride flexible) ; l'Advanced Functional Fabrics of America (AFFOA), qui travaille sur les tissus fonctionnels à haute performance ; l'Institut pour l'innovation dans la fabrication intelligente (Smart Manufacturing Innovation Institute) ; l'Institut pour des progrès rapides dans le déploiement de l'intensification des procédés (Rapid Advancement in Process Intensification Deployment Institute, RAPID),) ; l'Institut national pour l'innovation dans la fabrication de produits biopharmaceutiques (National Institute for Innovation in Manufacturing Biopharmaceuticals) ; l'Advanced Regenerative Manufacturing Institute (ARMI) ; l'Institut pour la réduction de l'énergie grise et la diminution des émissions dans la fabrication de matériaux (Institute for Reducing Embodied Energy and Decreasing Emissions in Materials Manufacturing, REMADE) ; et l'Institut de robotique avancée (Advanced Robotics Manufacturing, ARM).

Annoncé en 2012, l'Institut national pour l'innovation dans la fabrication additive (America Makes – National Additive Manufacturing Innovation Institute)²², a été le premier des instituts d'innovation industrielle. Il a son siège à Youngstown (Ohio) et une base régionale sur l'axe Cleveland (Ohio) – Pittsburg (Pennsylvanie), et se consacre aux technologies de l'impression 3D (également connue sous le nom de fabrication additive). La fabrication additive est un procédé de fabrication de produits par ajout de matière, couche après couche, à partir des données de modèles informatiques en trois dimensions. Elle s'oppose à la fabrication soustractive (par enlèvement de matière), qui s'appuie sur les machines-outils traditionnelles. Elle utilise en général des poudres de métaux ou de polymères, ou même du tissu biologique. L'avantage concurrentiel de la fabrication additive est que les pièces peuvent être fabriquées dès que leur description numérique en trois

dimensions a été entrée dans l'imprimante, ce qui crée potentiellement un nouveau marché de fabrication personnalisée en série, à la demande. Point important, ces procédés limitent les déchets de matière, ainsi que l'outillage nécessaire, et sont à même de réduire le nombre d'étapes de la chaîne d'approvisionnement. Ils permettent de fabriquer des composants et des structures totalement nouveaux, qu'il serait impossible de produire avec un bon rapport coût-efficacité par les procédés de fabrication traditionnels tels que le coulage, le moulage et le forgeage. La fabrication additive pourrait concurrencer directement les techniques de production en série, à condition que la vitesse de superposition des couches puisse être nettement augmentée, ce qui implique toutefois des avancées majeures dans ce domaine. Dans l'intervalle, la fabrication additive sera utilisée pour remplacer des pièces sur site, réduire les stocks de pièces nécessaires et créer des composants bien plus complexes et élaborés que ce que peuvent produire les procédés actuels. Elle pourrait être l'un des facteurs clés qui ouvriront la voie à la fabrication personnalisée en série (possibilité de créer de petits lots de produits de conception originale au même coût que des biens produits en série). Elle pourrait permettre une fabrication locale, et une réduction d'échelle, ce qui serait une première dans l'histoire de la production.

Au terme d'un processus de sélection hautement concurrentiel, les fonds des États et des industriels du consortium America Makes, complétés par un financement de même montant apporté par le programme Air Force Mantech et d'autres agences, ont constitué un programme d'environ 100 millions USD. La mission de l'institut est de faire passer la fabrication additive à la vitesse supérieure et de généraliser son adoption en comblant le fossé technologique entre la recherche, d'une part, et le développement et le déploiement de la technologie, d'autre part. Les membres d'America Makes comprennent 53 entreprises, petites et grandes, principalement situées dans le Middle West, mais disséminées aussi dans le pays tout entier. Cela comprend des entreprises du secteur des technologies d'impression 3D, comme 3D Systems, de grandes entreprises aérospatiales, comme Boeing, Lockheed Martin, United Technologies et Northrup Grumman, dans lesquelles l'impression 3D pourrait être synonyme de transformations, et un grand nombre de petites entreprises de production. Quelque 36 établissements universitaires – des grandes universités de recherche aux *community colleges* – participent au programme. L'institut compte plus de 20 autres organisations, allant d'agences publiques à des associations professionnelles.

Le consortium America Makes a élaboré un plan d'action technologique détaillé organisé autour de la conception, des matériaux, des procédés et du choix de la chaîne logistique. Un autre axe concerne le « génome » des matériaux additifs et vise à diminuer de manière considérable le temps et les coûts nécessaires pour concevoir, élaborer et agréer de nouveaux matériaux de fabrication additive, à l'aide de méthodes de calcul originales, telles que les outils de prédiction de propriétés assistée par des modèles et basée sur la physique. L'institut a travaillé dans différentes directions : création d'une infrastructure de mise en commun d'idées et de recherches sur la fabrication additive, développement et évaluation de techniques de fabrication additive, mise en place d'une collaboration avec des établissements d'enseignement et des fabricants pour organiser des formations dans ce nouveau domaine, et mise en relation des petites et moyennes entreprises avec les ressources leur permettant d'utiliser la fabrication additive. America Makes a notamment axé ses efforts sur des projets de R-D et de développement de technologies tels que l'initiative conjointe de l'Université du Texas à El Paso et de Lockheed Martin, Boeing, Honeywell et Draper Laboratory à Cambridge, qui vise à intégrer un ensemble de techniques de fabrication de composants électroniques dans des procédés d'impression 3D (usinage de

précision, extrusion thermoplastique, enrobage direct des feuilles, enrobage des fils et gestion des fils, par exemple). On compte plus de 30 autres projets de développement comparables menés par des universités et des industriels.

Étude du cas d'un institut d'innovation industrielle : l'IACMI

Pour donner une meilleure idée de ce qui s'élabore dans les instituts, nous allons étudier l'un d'entre eux plus en détail dans la présente section. L'IACMI a son siège à Knoxville, dans le Tennessee²³. Son objectif est d'élaborer et de démontrer des technologies innovantes qui permettront, d'ici 10 ans, de fabriquer des composites avancés à base de polymères renforcés de fibre. Comparativement aux techniques existantes, le but est de fabriquer ce type de composites pour un coût inférieur de 50 %, avec une consommation d'énergie inférieure de 75 % et en réutilisant ou en recyclant plus de 95 % de la matière.

Une cible claire et unique pour chaque institut. Les instituts, dont l'IACMI, sont conçus pour répondre à des besoins essentiels du secteur, en se fixant une cible claire et unique. L'objectif de l'IACMI est d'élaborer des composites légers présentant des avantages importants par rapport aux matériaux actuels sur le plan de l'efficacité énergétique et de la production d'énergie renouvelable. Il faudra pour cela déployer des technologies avancées qui permettront de fabriquer des matériaux composites pour un coût nettement inférieur, plus rapidement et en consommant moins d'énergie, et qui offriront la possibilité d'un recyclage relativement facile. Les obstacles techniques et institutionnels sont certes nombreux, mais le domaine ouvre incontestablement des possibilités intéressantes aux industriels américains.

Le consortium comme mode de fonctionnement. L'IACMI, comme les autres instituts, repose sur un consortium composé d'industriels, d'universités et d'administrations. Il comprend de grandes entreprises, comme Dow, Ford, General Electric, Dupont et Boeing, et de plus petites. Au total, 57 entreprises des secteurs de la chimie, de l'automobile et de l'aérospatiale y participent. On y compte 15 universités, laboratoires et établissements d'enseignement post-secondaire, avec notamment, pour les premières, l'Université du Tennessee, l'Université d'État de Pennsylvanie, l'Université de l'Illinois et l'Université Purdue. Des organismes publics des États et d'autres entités de développement économique en sont également membres.

Le concept. L'IACMI s'efforcera de faire baisser de manière spectaculaire les coûts globaux de fabrication des matériaux composites avancés et de diminuer l'énergie nécessaire pour les usiner et veillera à ce qu'ils soient recyclables. Il établira des installations partagées de R-D et d'essai, et mettra en relation les industriels, les fournisseurs de matériaux et les spécialistes des universités.

La proposition de valeur du secteur. L'IACMI entend offrir quatre services de base aux industriels partenaires :

- **Accès à des ressources de R-D partagées.** Fournir un accès à des équipements, allant de laboratoires à des installations de production à l'échelle industrielle, afin de permettre la démonstration et l'essai, et de réduire le risque auquel sont exposés les investissements des entreprises du secteur.
- **R-D appliquée.** Mobiliser un volume important de R-D financée par l'État, auquel viendront s'ajouter un partage des coûts par les industriels et des investissements des universités, pour trouver des solutions innovantes aux défis.

- **Usine virtuelle de matériaux composites.** Donner accès à des logiciels de modélisation et de simulation commerciaux de bout en bout aux concepteurs et fabricants de matériaux composites, via une plateforme web.
- **Formation de la main-d'œuvre.** Dispenser une formation spécialisée pour préparer la main-d'œuvre actuelle et future aux toutes dernières techniques et méthodes de fabrication de composites avancés.

Les objectifs et les défis. L'IACMI a élaboré des objectifs techniques à cinq et dix ans : réduire de 25 %, puis de 50 %, le coût de fabrication des polymères renforcés de fibre de carbone (PRFC) ; réduire de 50 %, puis de 75 %, la quantité d'énergie grise associée aux PRFC ; et atteindre 80 % puis 95 % de recyclabilité des composites en produits utiles. Les objectifs de l'institut sur le plan des retombées – associés à une série de cibles à atteindre au fil du temps – comprennent : l'amélioration de la productivité énergétique ; la réduction de la consommation d'énergie sur le cycle de vie ; l'augmentation de la capacité de production nationale ; la croissance de l'emploi et le développement économique.

Plan d'action et plans d'investissement stratégiques. L'IACMI adoptera une approche de type portefeuille pour mener à bien ses projets. Les projets initiaux ont été définis dans une proposition soumise au Département de l'Énergie. Ils comprennent d'une part le renforcement de la capacité des infrastructures concernant les matériaux et le traitement ainsi que la modélisation et la simulation, et d'autre part la valorisation de la main-d'œuvre dans des domaines stratégiques. L'objectif est de faire bénéficier le pays tout entier des progrès accomplis, et notamment les secteurs de l'automobile, de l'éolien et du stockage de gaz comprimé.

La deuxième phase implique l'élaboration d'un plan d'action technologique, sous la responsabilité du Directeur de la technologie de l'IACMI, et la création d'un conseil consultatif sur l'industrie et les technologies. Cette phase permettra de déterminer les principaux obstacles à la fabrication de matériaux composites avancés à haute résistance et à grande échelle, et de hiérarchiser les possibilités offertes par les matériaux et la chaîne d'approvisionnement.

Un troisième domaine requiert l'élaboration d'un plan d'investissement stratégique, ce qui se fera sous la responsabilité du comité directeur de l'IACMI et de son conseil consultatif technique. L'objectif sera de modifier le cycle d'innovation afin de permettre une adoption rapide et une montée en puissance de la fabrication de composites avancés. Les appels permanents à projets ouverts dans le domaine du développement technologique seront alignés sur le plan d'investissement stratégique et le plan d'action technologique, priorité étant donné aux projets qui produisent des effets importants à court terme.

Accélération du processus découverte-application-production. C'est là un objectif général de l'IACMI qui, comme d'autres instituts, cherchera à :

- Établir une présence, à grande échelle, dans les « chaînons manquants » de la recherche en matière de fabrication avancée (NMT 4 à 7).
- Créer un patrimoine industriel commun, pour soutenir de futurs centres de fabrication, avec un partenariat actif entre parties prenantes.
- Mettre l'accent sur les investissements à plus long terme des industriels et les soutenir.
- Combiner la R-D à la valorisation et à la formation de la main-d'œuvre.

L'un des objectifs globaux sera la création de capacités et d'unités de production industrielles avancées dans le domaine des matériaux composites.

Cet examen de la structure et des objectifs de l'IACMI donne une idée des approches qui sont suivies par beaucoup de nouveaux instituts d'innovation industrielle. Cependant, le modèle de ces instituts n'est pas rigide, et il peut varier considérablement selon les secteurs.

Enseignements tirés de l'expérience des instituts d'innovation industrielle

Comme nous l'avons vu précédemment, le programme des instituts d'innovation industrielle a été mis en place très rapidement par l'administration Obama, sur instruction du président lui-même, pour répondre à une crise politique – un affaiblissement majeur d'un secteur économique clé, le secteur manufacturier, au lendemain de la récession de 2008-09. Du fait du blocage du Congrès, l'administration n'a pas pu partir de zéro, c'est-à-dire concevoir et mettre en œuvre un programme totalement nouveau. Elle a dû se tourner, pour le financement et l'organisation, vers des agences existantes et greffer les nouvelles initiatives sur des structures établies. En d'autres termes, le vaste programme pour l'innovation dans l'industrie a dû se trouver une petite place dans les programmes existants des agences. Inutile de dire que cette solution n'était pas idéale.

Comme pour tout nouveau programme, certains des projets pilotes expérimentaux échoueront, et d'autres aboutiront. Seuls quelques-uns des nouveaux instituts existent depuis assez longtemps pour que l'on puisse évaluer les progrès qu'ils ont accomplis au regard de leur mission. Les autres en sont encore aux premiers balbutiements. Transformer un secteur économique aussi énorme que le secteur manufacturier au moyen de l'innovation n'est pas un projet à court terme. Une étape majeure a indéniablement été franchie avec l'élaboration de stratégies en faveur de la R-D et de la technologie dans un ensemble de nouveaux domaines qui pourraient avoir une incidence considérable sur l'avenir du secteur. On peut tirer une série d'enseignements des réalisations des différents instituts, et observer les défis qui sont apparus à mesure que les instituts évoluaient. Nous allons analyser ces défis ci-après et voir comment on peut les relever. Certains instituts ont déjà entrepris de le faire pour une grande partie, mais il est probable que d'autres vont devoir s'y attaquer à leur tour. Les sections qui suivent, élaborées à partir de discussions avec des responsables des instituts, des fonctionnaires des agences fédérales et des spécialistes universitaires participants, présentent les premiers enseignements que l'on commence à mettre à profit pour accompagner le réseau actuel dans son évolution.

Orientation vers la technologie ou vers la production

Les instituts d'innovation industrielle créés jusqu'ici travaillent dans des domaines sélectionnés par les agences qui financent la R-D publique. Ces domaines correspondent aux missions des agences, mais pas nécessairement aux besoins prioritaires du secteur manufacturier lui-même. De ce fait, on a couru le risque que les domaines sélectionnés soient axés sur le développement technologique tel qu'il est appréhendé par les agences, plutôt que par le secteur. Les choses ont eu tendance à se corriger d'elles-mêmes : les agences sollicitent de plus en plus l'avis des industriels.

Pour éviter ce type de problèmes, le rapport AMP2.0 a défini des critères de base pour la sélection des domaines prioritaires des instituts d'innovation industrielle avancée (les « domaines technologiques industriels »). Même si ces critères ne sont pas systématiquement appliqués par les agences, ils restent éclairants et pertinents. Les quatre critères sont les suivants :

- **Demande du secteur ou du marché.** Existe-t-il actuellement une demande du secteur concernant ce domaine technologique industriel ? Si le secteur n'a pas encore

commencé à s'y intéresser, une demande du marché ou des consommateurs se fait-elle nettement sentir ?

- **Caractère intersectoriel.** Ce domaine technologique industriel intéresse-t-il plusieurs secteurs (automobile, aérospatiale, biotechnologies, infrastructures) et des fabricants de différentes tailles au sein de la chaîne d'approvisionnement ?
- **Sécurité nationale ou sécurité économique.** L'absence de compétence ou de position dominante des États-Unis dans ce domaine technologique industriel constitue-t-elle une menace pour la sécurité nationale ou la sécurité économique du pays ? L'absence de compétence des États-Unis dans ce domaine nuit-elle sérieusement à la compétitivité du pays au sein de la chaîne d'approvisionnement ?
- **Mise à profit des atouts des États-Unis.** Ce domaine technologique industriel met-il à profit une main-d'œuvre déjà disponible et un système éducatif existant, une infrastructure particulière ou des politiques déjà en place ? (PCAST, 2014).

Si d'autres instituts devaient être créés, on pourrait encourager les agences à utiliser plus systématiquement les critères AMP2.0 lors du processus de sélection des domaines de travail, afin d'accorder au mieux les besoins du secteur et ceux des agences.

Limitation à cinq ans de l'aide fédérale

Dès l'annonce du premier institut d'innovation industrielle, America Makes, il a été demandé que les instituts soient autonomes (qu'ils puissent se passer du financement fédéral) au bout de cinq ans. La loi de revitalisation de l'industrie américaine (*Revitalize American Manufacturing Act*) adoptée en 2014 limite aussi le financement à cinq ans pour les instituts créés par le NIST.

Cette approche suit le modèle Sematech dans lequel la DARPA avait mis fin au financement du consortium de fabricants de semi-conducteurs à l'issue de ce délai. Pourtant, comme nous le verrons plus loin, la création de ces instituts s'inspire des instituts Fraunhofer allemands, qui ne connaissent aucun retrait du financement fédéral après un délai court fixé d'avance. L'idée que les instituts puissent devenir financièrement indépendants en cinq ans pose problème. Redonner de la vigueur à l'innovation dans l'industrie est un projet à long terme qui nécessite que l'on fasse preuve de réalisme face aux enjeux technologiques et aux défis que rencontrent les entreprises.

Pour être mises en œuvre à grande échelle, la plupart des technologies autour desquelles les nouveaux instituts se constituent auront besoin de se développer sur une période plus longue que les cinq années de soutien fédéral prévu. Étant donné l'évolution des instituts, il faudra probablement un mécanisme permettant de maintenir, sous une forme ou une autre, un partage des coûts par l'administration fédérale durant une période supplémentaire assez importante une fois le délai initial écoulé. On pourrait envisager qu'à l'issue des cinq premières années, un processus d'évaluation donne à un institut la possibilité de bénéficier d'un renouvellement de son financement s'il a obtenu de bons résultats. Autre solution, vers la fin de la période de financement initiale, les instituts pourraient être mis en concurrence pour l'obtention de financements pluriannuels auprès d'agences fédérales de R-D. Ces financements permettraient de poursuivre des projets de développement de technologies et, potentiellement, des projets de formation connexes.

Modèle de gouvernance de la recherche

Les instituts d'innovation industrielle ont été constitués par des agences fédérales missionnées, et celles-ci ont reconduit leurs cadres réglementaire et organisationnel à mesure que les instituts se développaient. Les agences ont eu tendance à traiter et gérer les instituts de la façon dont elles le font habituellement, c'est-à-dire comme des destinataires de travaux de recherche. Le modèle de gouvernance des agences est effectivement un modèle d'encadrement de la R-D (par des accords de coopération), et les agences ont tendance à se considérer comme des directeurs de recherche. Or, le rôle des instituts est bien plus large. Il implique de mettre en place des collaborations durables, avec des systèmes de soutien englobant un vaste éventail d'entreprises et de chercheurs, dans de nombreux secteurs, non seulement pour la recherche, mais aussi pour les essais, les démonstrations de technologies et les retours d'information, le développement de produits et la formation de la main-d'œuvre.

Le rôle dévolu aux instituts est très complexe et ambitieux, et nécessite un modèle de gouvernance et de soutien différent de celui appliqué aux projets de recherche plus simples. En résumé, le système de gouvernance de la recherche fédérale pourrait, dans de nombreux cas, ne pas favoriser le type de collaboration nécessaire aux tâches non liées à la recherche qui font partie de la mission des instituts, et ne pas préparer ces derniers à être financièrement autonomes au bout de cinq ans. Il convient donc de réfléchir à la manière dont le modèle de gouvernance fonctionne, y compris aux retards administratifs dans la mise sur pied de nouveaux instituts. Ainsi, le financement sous la forme d'un partage des coûts entre les industriels et les États devrait-il être contrôlé par l'agence, ou les instituts devraient-ils définir ces paramètres avec les parties contributrices ? Les agences pourraient-elles abandonner le modèle traditionnel de supervision et de suivi des contrats de recherche pour encourager un modèle plus collaboratif, avec une participation accrue des collectivités locales et des administrations des États et surtout des industriels ?

Soutien apporté par le réseau

Le rapport AMP2.0 recommandait de rassembler le groupe grandissant des instituts d'innovation industrielle au sein d'un réseau de soutien. Il proposait « une structure de gouvernance qui préserve l'autonomie de fonctionnement des différents instituts, mais dans laquelle un conseil d'administration de réseau public-privé serait chargé de surveiller les résultats globaux du réseau et la pérennité des différents instituts » (PCAST, 2014). Le NIST s'emploie à mettre en œuvre cette recommandation au moyen du réseau Manufacturing USA. Comme le NIST l'a bien compris, le réseau peut répondre à un certain nombre de besoins. Les nouveaux instituts ne devraient pas avoir à « réinventer la roue » lors de leur création. Un grand nombre d'enseignements ont été tirés de l'expérience déjà acquise, notamment sur la manière de constituer les comités directeurs et les structures juridiques, de gérer la propriété intellectuelle, de définir les niveaux de participation des parties prenantes ou d'organiser des actions de sensibilisation et d'éducation au niveau régional. Un réseau de soutien dynamique donnerait aux instituts la possibilité de s'informer mutuellement des problèmes qu'ils rencontrent couramment et de les résoudre ensemble, et permettrait que les bonnes pratiques et les enseignements tirés de l'expérience de chacun des instituts soient examinés et mis en commun.

Accent sur la R-D ou sur la mise en œuvre

Le rapport AMP1.0 envisageait des instituts opérant aux niveaux de maturité technologique 4 à 7 (« développement des technologies », « démonstration des technologies » et « élaboration de systèmes et de sous-systèmes ») (PCAST, 2012). Les agences fédérales concernées ont eu tendance à organiser les instituts autour du développement de technologies cadrant avec leurs missions. On reste donc assez loin de la mise en œuvre par les industriels. Cet accent sur le développement est peut-être inévitable étant donné la brèche dans le système de R-D industrielle des États-Unis, mais au fil du temps, il risque d'entraîner une lacune sur le volet mise en œuvre du rôle des instituts. Il faudrait donner davantage de place aux procédés de fabrication, à la démonstration, aux systèmes d'essai et de retour d'information, faute de quoi les instituts pourraient se trouver limités dans leur capacité à faire participer les petites et moyennes entreprises, car les technologies sur lesquelles ils travaillent ne sont pas menées jusqu'aux stades où ces entreprises peuvent s'en saisir. La diffusion s'en trouvera limitée. La plupart des directeurs d'institut l'ont bien compris, mais la question demeure périphérique.

En résumé, le développement de technologies constitue assurément un rôle important et central des instituts, mais ceux-ci ne doivent pas négliger les tâches supplémentaires nécessaires pour porter les nouvelles technologies aux niveaux de maturité 5 à 7, plus en aval du processus d'innovation, de sorte qu'elles puissent être mises en œuvre, notamment par les petites et moyennes entreprises. Les instituts s'y emploient, mais doivent partager et comparer l'évolution de leurs approches.

Participation de la chaîne d'approvisionnement

Les instituts, comme cela a été indiqué plus haut, se sont souvent concentrés en priorité sur des appels à projets de R-D de technologies qui font généralement intervenir des chercheurs issus d'universités et de grandes entreprises ; les petites entreprises en sont habituellement exclues du fait de leurs capacités de R-D limitées. Or, les nouvelles technologies ne pourront être adoptées que si des chaînes d'approvisionnement intégrées (comprenant les petites entreprises) sont amenées à les comprendre et à les utiliser. Pour ce faire, les instituts vont devoir suivre une approche plus axée sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement et associer cette dernière aux activités de démonstration et d'essai des technologies et à la formation.

Formation de la main-d'œuvre

Le rôle que les instituts d'innovation industrielle sont censés assumer dans la formation de la main-d'œuvre en général et celle des ingénieurs pourrait présenter un problème similaire. Si les équipes d'ingénieurs et la main-d'œuvre ne sont pas formées aux nouvelles technologies utilisées dans la fabrication avancée, que ce soit dans les petites ou les grandes entreprises, la mise en œuvre à grande échelle de ces technologies en pleine évolution sera tout simplement impossible. Certains instituts ont compris que la formation de la main-d'œuvre pouvait être une première étape fructueuse pour servir leurs mandants dans l'industrie et leurs secteurs et pour bâtir des réseaux de contacts avec une grande diversité d'entreprises. Pour les instituts, il s'agit là d'un moyen particulièrement important d'établir des relations à la fois avec de petites entreprises et avec des États, lesquels interviennent dans la formation de la main-d'œuvre par l'intermédiaire de leurs systèmes de *community colleges*. Pourtant, cela n'a pas toujours été le cas. Au sein des agences, les responsables des contrats et des programmes relatifs aux instituts sont généralement des technologues, et non des spécialistes de l'éducation, aussi se

concentrent-ils souvent sur l'aspect R-D du rôle des instituts. Or les instituts doivent maîtriser les deux volets pour servir au mieux leurs secteurs industriels. Les agences devraient veiller à ce que les instituts ne perdent pas de vue la formation de la main-d'œuvre. En fait, le réseau NNMI pourrait être amené à jouer un rôle constructif en apportant les meilleures pratiques en matière d'éducation à l'ensemble des instituts.

Le rôle des États

Dès le début, les participants aux processus AMP1.0 et 2.0, notamment les pouvoirs publics, les industriels et les universités, ont vu que l'équilibre constituait un défi essentiel pour les instituts. Toutes les activités de fabrication, au final, sont intégrées dans des écosystèmes de production et d'innovation qui ont une dimension très régionale. Il est donc impératif que les instituts d'innovation industrielle gardent un pied dans les économies manufacturières régionales, où se trouvent leurs mandants (industriels et universités). Cela étant, le pays tout entier aura besoin des technologies que les instituts développent. L'impression 3D, par exemple, ne concerne pas simplement le nord-est de l'Ohio : elle est nécessaire à l'échelle nationale et dans de nombreux secteurs industriels. Les instituts doivent donc aussi avoir un pied dans l'économie nationale, ce qui engendre un modèle dichotomique compliqué.

Certains instituts ont un autre problème : du fait de la place initialement forte des projets de R-D, ils pourraient avoir une vision trop nationale et devoir de ce fait opérer un rééquilibrage. Si le soutien fédéral s'arrête au bout de cinq ans, le rôle régional et local que les instituts peuvent jouer devient vital. Le soutien régional des états pourrait donc se révéler essentiel à la survie des instituts. Si ceux-ci ne tissent pas très tôt des liens étroits avec les économies régionales, le développement de ces instituts peut se voir compromis. Certains instituts s'emploient à créer des modèles pour y parvenir. L'institut LIFT, par exemple, a particulièrement bien réussi à s'allier les États participants et leurs *community colleges* afin d'élaborer des programmes de formation de la main-d'œuvre, l'une des priorités des États. L'IACMI s'est employé avec succès à créer des centres opérationnels soutenus par les États participants pour associer ces derniers plus efficacement à son action.

En résumé, renforcer le soutien des États en tissant des liens avec les économies régionales sera un élément essentiel de la pérennité des instituts. Pour survivre et se développer, les nouveaux programmes publics n'ont pas seulement besoin d'une conception solide des politiques de fond. Il leur faut aussi un modèle de soutien politique robuste, qui les maintiendra sur la durée. Trouver la forme à donner à ce soutien politique n'est pas chose aisée, car il faut veiller à ce que la conception des politiques de fond ne soit pas détournée pour servir des objectifs politiques. En effet, le soutien politique doit venir étayer les politiques de fond, tout en renforçant l'appui nécessaire pour pérenniser ce soutien (Bonvillian, 2011). Les instituts doivent donc trouver le bon dosage entre soutien politique et politiques de fond. Le développement d'un axe économique régional n'est pas seulement important pour le modèle de fond d'un institut pérenne et viable, il est également important pour la dimension politique du soutien futur.

Problème sous-jacent : une R-D fédérale historiquement insuffisante dans la fabrication avancée

L'un des problèmes importants qui nuisent à la capacité de relever un certain nombre des défis mentionnés plus haut est le peu d'attention que les agences fédérales de R-D ont accordée par le passé à la recherche industrielle. Comme nous l'avons vu plus haut, les

administrations fédérales successives des États-Unis ont considéré la position dominante du pays dans le secteur manufacturier comme acquise, et n'ont pas ressenti le besoin d'en faire une priorité de la politique de R-D. C'est en partie la raison pour laquelle les instituts d'innovation industrielle ont tendance à s'intéresser davantage aux premières étapes du développement des technologies qu'à la mise en œuvre de ces dernières, comme le suggérait pourtant le rapport de l'AMP. La recherche fondamentale dans le domaine des techniques de fabrication reste également nécessaire. Si la mission de l'agence fédérale de R-D actuelle était davantage axée sur les technologies génériques du secteur manufacturier, cela pourrait être un complément important des activités des instituts et contribuer à créer de nouveaux paradigmes technologiques industriels. En d'autres termes, la recherche fédérale a contribué à des avancées majeures dans des domaines tels que les technologies numériques et les technologies de détection, les matériaux avancés, les systèmes photoniques, la robotique, l'électronique flexible et les composites. Cela a aidé les milieux de la technologie aux États-Unis à voir que de nouveaux paradigmes manufacturiers étaient possibles, et c'est principalement ce qui rend ces efforts si intéressants. Cependant, sans un apport solide d'intrants de la R-D aux instituts, le rôle de ces derniers en matière de développement et de mise en œuvre technologiques n'aura pas de fondement stable.

L'administration a pris des mesures initiales essentielles à cette transmission de résultats de recherche aux instituts. En avril 2016, le Sous-comité de la fabrication avancée (Subcommittee on Advanced Manufacturing, SAM) du Conseil national de la science et de la technologie (National Science and Technology Council), une antenne de l'OSTP chargée des collaborations entre agences, a publié un rapport intitulé « *Advanced Manufacturing: A Snapshot of Priority Technology Areas Across the Federal Government* » (Fabrication avancée : Aperçu des domaines technologiques prioritaires au sein de l'administration fédérale) (NTSC, 2016). Cette initiative n'a pas relié le portefeuille de R-D fédéral aux instituts, mais a eu au moins le mérite de montrer que les liens entre de nombreux programmes de R-D actuels pourraient être renforcés. Cette tâche nécessite une plus grande attention.

Enseignements tirés des instituts Fraunhofer

Pour finir, il y a des enseignements essentiels à tirer de l'organisation Fraunhofer en Allemagne et des instituts du même nom qui ont servi de modèle aux instituts américains. Bien que les instituts Fraunhofer jouissent d'une autonomie importante, l'organisation globale prévoit une gouvernance participative, ainsi que la mise en commun des pratiques et des recherches. Les instituts américains auraient tout avantage à se constituer en un réseau dynamique, ce qui leur donnerait accès à la fois aux meilleures pratiques et à un modèle de gouvernance commun. Avec la mise en place du réseau d'instituts Manufacturing USA, en 2016, le NIST s'est lancé dans cette tâche et a demandé aux directeurs des instituts de prendre la tête de l'initiative, ce qui pourrait favoriser un partage des pratiques et des programmes de collaboration entre les instituts. Le soutien continu (non limité dans le temps) que l'administration centrale accorde aux instituts Fraunhofer joue un rôle capital dans leur pérennité et leur dynamisme, et c'est un aspect dont les États-Unis doivent à présent tenir compte.

Parallèlement à leur réseau de travail, les instituts ont besoin d'une capacité d'apprentissage continue qui leur permette de garder une longueur d'avance, un rôle que le système Fraunhofer a joué, dernièrement en coordination avec des projets de plus grande ampleur mis en œuvre par l'administration dans le domaine de la fabrication avancée (« *Industry 4.0* »). Le NIST et la NSF ont donc créé un groupe de réflexion et d'action (*think and do tank*), MForesight – Alliance for Manufacturing Foresight (Alliance pour la prospective dans

le secteur manufacturier) –, chargé d'évaluer en continu les questions techniques et stratégiques auxquelles les instituts font face en tant que groupe. MForesight s'emploie à proposer « aux dirigeants d'entreprises et aux décideurs publics des idées et des éclairages sur les nouvelles tendances et perspectives technologiques, en vue d'orienter les investissements publics-privés dans la fabrication avancée » (MForesight, 2017). Son portefeuille de projets d'étude vise également à promouvoir une innovation technologique susceptible de combler le fossé entre la recherche et les fabricants.

Conclusion

Après le déclin rapide de leur secteur manufacturier au cours des années 2000, les États-Unis opèrent désormais un rattrapage. Comme nous l'avons vu en détail plus haut, ce déclin s'est traduit par une perte de 5.8 millions d'emplois manufacturiers, une diminution des investissements productifs, une baisse de la production, et, du fait de cette production en berne, une productivité inférieure à celle qui avait été estimée. Comme l'économiste David Autor et ses collègues l'ont dépeint, le déclin du secteur manufacturier a également entraîné d'importantes perturbations sociales, sur fond de déséquilibre du commerce des produits manufacturés avec la Chine.

S'ils veulent faire face à la concurrence de pays où les coûts et les salaires sont bas, les États-Unis doivent accroître l'efficacité de leur production afin d'en compenser les coûts plus élevés, ce qui requiert une stratégie d'innovation dans l'industrie. Il n'y a pas vraiment d'autre option sur le plan de l'action publique. Les politiques fiscale, commerciale et macroéconomique peuvent renforcer marginalement la compétitivité du secteur manufacturier américain, mais ne peuvent pas entraîner de hausse importante de la productivité et de l'efficacité. La clé semble être l'innovation dans les techniques et procédés de production, et l'élaboration de modèles économiques pour leur mise en œuvre.

L'administration a commencé à axer ses efforts sur une initiative en faveur de l'innovation dans un rapport de 2011 du PCAST, intitulé « Ensuring American Leadership in Advanced Manufacturing » (Assurer le leadership des États-Unis dans la fabrication avancée). Les politiques correspondantes ont été développées dans deux rapports du PCAST, en 2012 (sur l'exploitation de l'avantage concurrentiel national dans la fabrication avancée ; PCAST [2012]) et en 2014 (sur l'accélération du développement de la fabrication avancée aux États-Unis ; PCAST [2014]), élaborés par l'AMP (Advanced Manufacturing Partnership), un partenariat en faveur de la fabrication avancée créé à l'initiative du président et qui regroupe des entreprises et des universités de premier plan. L'AMP proposait de nombreuses approches, mais la clé de voûte a été le concept d'institut d'innovation industrielle avancée, auquel l'administration a rapidement donné suite, puisqu'elle l'a mis en œuvre bien avant la publication du premier rapport de l'AMP, en 2012.

L'initiative visant à établir un réseau d'instituts d'innovation industrielle avancée a connu un démarrage prometteur, cherchant à combler une brèche critique dans le système américain d'innovation industrielle. Le modèle organisationnel était complexe et ambitieux ; nécessitant la collaboration et le partage des coûts entre des groupes d'entreprises (petites et grandes), des chercheurs universitaires et des États, sous la conduite d'agences fédérales de R-D peu rompues à la gestion d'équipes aussi larges.

La structure de base des instituts se met désormais en place, initialement axée sur des projets de développement technologique industriel. On peut cependant envisager un deuxième stade qui permettrait d'améliorer le modèle. Comme nous l'avons vu plus haut, les

instituts font face à une série de défis qu'ils peuvent maintenant envisager de relever à mesure qu'ils se développent et montent en puissance. Il serait en particulier souhaitable de :

- Améliorer le modèle de gouvernance actuel des instituts et agences de recherche.
- Maintenir le soutien de l'administration fédérale au-delà de la période initiale de cinq ans.
- Constituer les instituts en un réseau dynamique qui leur permettrait de mettre en commun les meilleures pratiques de recherche, ainsi que les progrès réalisés dans la formation de la main-d'œuvre.
- Mettre l'accent au sein des instituts sur la mise en œuvre de technologies parvenues à des niveaux de maturité technologique plus avancés, parallèlement au développement.
- Veiller à ce que les instituts accordent une large place (et collaborent) à des approches optimales de formation de la main-d'œuvre.
- Veiller à tisser des liens entre les instituts et les économies régionales, en plus d'œuvrer au développement des techniques de fabrication à l'échelle nationale.

En outre, la R-D fédérale des agences missionnées dans le domaine des techniques de fabrication avancée pourrait être associée plus étroitement aux instituts. Il serait notamment utile que ces fonds de R-D soient coordonnés au moyen de plans d'action communs avec les instituts, de façon que les technologies ne restent pas bloquées et continuent d'être améliorées. Bien entendu, les États-Unis n'ont pas beaucoup d'autres solutions désormais que de maintenir et d'augmenter leurs capacités dans la fabrication avancée, étant donné que leurs grands concurrents suivent des stratégies un peu similaires (voir par exemple Forschungsunion et Acatech [2013], Kennedy [2015], Xinhua [2015], Xinhua [2016], Whang [2012], Manufacturing Technology Centre [2016], Catapult High Value Manufacturing Centres [2016] et Shipp [2012]).

Le déclin du secteur manufacturier américain dans les années 2000 a donné lieu à une nouvelle stratégie industrielle, fondée sur l'innovation. Cette stratégie pour la fabrication avancée a été reconnue comme l'une des approches nécessaires pour restaurer la puissance de la production américaine, approches qui vont des politiques fiscales, commerciales et macroéconomiques à de nouvelles méthodes de formation. Cette nouvelle politique d'innovation était toutefois très différente de tout ce qui avait été tenté auparavant par les États-Unis dans le secteur manufacturier. Elle a nécessité un modèle d'organisation de l'innovation complexe et ambitieux, réunissant des entreprises industrielles (petites et grandes), des chercheurs universitaires et des agences publiques (fédérales et des États) autour d'une quête commune de nouveaux procédés et de nouvelles techniques de fabrication. Elle s'est efforcée de trouver une nouvelle formule de compétitivité en augmentant l'efficacité de la production et de la productivité. Le soutien apporté à la fabrication avancée a constitué une tentative pour appliquer une force économique historique des États-Unis – son système d'innovation – à un ensemble totalement nouveau de problèmes.

Notes

1. Ce chapitre est tiré d'un article de l'auteur à paraître dans la revue *Annals of Science and Technology* au premier trimestre de 2017, et sera développé dans un ouvrage à paraître sur ce même sujet, élaboré en collaboration avec Peter L. Singer, chez MIT Press (prévu pour l'automne 2017).
2. Bureau of Labor Statistics (BLS), Current Employment Statistics (CES), www.bls.gov/ces/. Voir aussi l'examen détaillé des pertes d'emplois dans le secteur manufacturier dans Atkinson et al. (2012) et Scott (2015).

3. Bureau of Labor Statistics (BLS), Current Employment Statistics (CES), www.bls.gov/ces/.
4. Bureau of Economic Analysis (BEA), Fixed Assets Accounts, <http://bea.gov>. Voir aussi Atkinson et al. (2012), pp. 47-58.
5. Bureau of Labor Statistics (BLS), Labor Productivity and Costs, Productivity change in the manufacturing sector (base de données), www.bls.gov/lpc/prodybar.htm.
6. Bureau of Economic Analysis (BEA), Foreign Trade, Exports, Imports and Balance of Goods by Selected NAICS-Based Product Code, Exhibit 1 du FT-900 Supplement for 12/15, 5 février 2016, www.census.gov/foreign-trade/Press-Release/2015pr/12/ft900.pdf.
7. Bureau of Economic Analysis (BEA), Trade in Goods with Advanced Technology Products, 2015, Exhibit 16, www.census.gov/foreign-trade/balance/c0007.html.
8. Bureau of Economic Analysis (BEA), US International Trade in Goods and Services, Exhibit 1, 5 février 2016, www.census.gov/foreign-trade/Press-Release/2015pr/12/ft900.pdf.
9. Pour une analyse des effets sociaux perturbateurs du déclin du secteur manufacturier aux États-Unis, voir Bonvillian (2016).
10. Bureau of Labor Statistics (BLS), Industries at a Glance, Manufacturing: NAICS 31-33, Workforce Statistics (juillet 2016), www.bls.gov/iag/tgs/iag31-33.htm.
11. Les évolutions décrites dans cette sous-section, et les sources correspondantes, sont présentées en détail dans Bonvillian, 2014.
12. Cette crainte d'une « politique industrielle » reste ancrée dans le débat entre les partis aux États-Unis. Bien que les instituts d'innovation industrielle créés pendant la période 2012-16 (voir ci-après) puissent entrer dans cette catégorie, la crise de l'emploi dans le secteur manufacturier et les fermetures d'usines ont eu raison de ces préoccupations, et la loi relative au modèle des instituts a été adoptée par les deux partis en 2014, comme nous le verrons plus bas. En outre, les instituts sont conçus pour être dirigés par les industriels, cofinancés par ces derniers, et pour fonctionner de manière collaborative, sans mainmise de l'État.
13. Au cours de cette période, un certain nombre d'articles importants sur les difficultés rencontrées par le secteur manufacturier aux États-Unis ont apporté la base sur laquelle les études examinées ci-après ont été menées, même si l'étude du MIT présentée plus bas a été la plus complète. Parmi ces autres articles, citons : Tasse (2010) ; Fuchs et Kirchain (2010) ; Houseman et al. (2011) ; Breznitz et Cowhey (2012) ; Atkinson et al. (2012) ; Helper, Kruger et Wial (2012) ; Shipp et al. (2012) ; Bonvillian (2012) ; et Pisano et Shih (2012).
14. Les noms des membres du Comité directeur de l'AMP1.0 issus d'entreprises et d'universités figurent dans le communiqué de presse du Bureau du Chef du service de presse de la Maison Blanche, intitulé « Report to President Outlines Approaches to Spur Domestic Manufacturing Investment and Innovation », 12 juillet 2012, www.whitehouse.gov/the-press-office/2012/07/17/report-president-outlines-approaches-spur-domestic-manufacturing-investm.
15. Aux États-Unis, le Département de la Défense (US DoD) et la NASA (National Aeronautics and Space Administration) ont élaboré des NMT assez similaires, malgré quelques différences. L'AMP a adopté la terminologie du Département de la Défense (voir US DoD [2011]).
16. Voir également la description donnée sur le site de l'étude PIE, <http://web.mit.edu/pie/research/index.html>.
17. Voir par exemple Deloitte et le Manufacturing Institute (2011). Ces travaux ont permis de déterminer que 82 % des cadres supérieurs du secteur manufacturier signalaient un déficit modéré à grave de candidats possédant les qualifications et compétences adéquates. Pour 74 % des fabricants, cette pénurie gênait le développement de leurs activités.
18. Voir S.1468, cent treizième Congrès, deuxième Session, www.govtrack.us/congress/bills/113/s1468/text ; HR 2996, Revitalize American Manufacturing and Innovation, cent treizième Congrès, deuxième Session, Congress.gov, Actions, www.congress.gov/bill/113th-congress/house-bill/2996/actions.
19. Sematech était un consortium de fabricants de semi-conducteurs et d'équipementiers qui, dans les années 90, se voyaient disparaître à très court terme du fait de la concurrence intense du Japon. L'agence DARPA apportait un financement équivalent à celui des industriels. Le consortium a axé ses efforts sur des améliorations majeures de l'efficacité et de la qualité dans la fabrication des semi-conducteurs ; au bout de cinq ans, il était redevenu le principal producteur, et le financement de la DARPA a pris fin. Sematech a continué ses activités, en tant qu'organisation de planification technologique de premier plan, afin de maintenir le secteur sur une trajectoire vérifiant la loi de Moore.

20. Outre Mantech, le directeur adjoint de la DARPA a participé à l'initiative AMP1.0, et la DARPA a géré un portefeuille assez important d'activités de R-D dans la fabrication avancée et a donné des indications pour les rapports de l'AMP.
21. La description des différents instituts est tirée de leurs sites web. Celle des techniques de fabrication qu'ils s'efforcent de développer provient de NTSC (2016), pp. 36-39.
22. Les informations fournies dans la présente section sont tirées du site web America Makes, www.americamakes.us/about/overview.
23. Cette section est tirée de NIST (2016).

Références

- Autor, D., D. Dorn et G. Hanson (2016), « The China Shock: Learning from labor market adjustment to large changes in trade », *NBER Working Paper*, n° 21906.
- Atkinson, R. et al. (2012), « Worse than the Great Depression: What the experts are missing about US manufacturing decline », Information Technology & Innovation Foundation, Washington, DC.
- Berger, S. (2014), *Making in America*, MIT Press, Cambridge, MA.
- Breznitz, D. et P. Cowhey (2012), « America's two systems of innovation: Recommendations for policy changes to support innovation production and job creation », Connect Innovation Institute, San Diego.
- Bureau of Labor Statistics (2012), « Spotlight on statistics: The recession of 2007-2009 », 2 février, Bureau of Labor Statistics, Washington, DC, www.bls.gov/spotlight/2012/recession/pdf/recession_bls_spotlight.pdf.
- Bonvillian, W.B. (2016), « Donald Trump's voters and the decline of American manufacturing » *Issues in Science and Technology*, vol. 32, n° 4, pp. 27-39.
- Bonvillian, W.B. (2014), « The new model innovation agencies – An overview », *Science and Public Policy*, vol. 41, n° 4, 425-437.
- Bonvillian, W.B. (2012), « Reinventing American manufacturing: The role of innovation », *Innovations*, vol. 7, n° 3, pp. 97-125.
- Bonvillian, W.B. (2011), « The problem of political design in federal innovation organization », in K. Husbands Fealing et al. (dir.pub.), *The Science of Science Policy*, Stanford University Press, Palo Alto, CA.
- Bonvillian, W.B. et C. Weiss (2015), *Technological Innovation in Legacy Sectors*, Oxford University Press.
- Catapult High Value Manufacturing Centres (2016), « HVM centres », <https://hvm.catapult.org.uk/hvm-centres/> (consulté en octobre 2016).
- Dahlman, C.J. (2012), *The World Under Pressure; How China and India are Influencing the Global Economy and Environment*, Stanford University Press, Stanford, CA.
- Deloitte Ltd., Manufacturing Institute (2011), « Boiling point? The skills gap in US manufacturing », www.themanufacturinginstitute.org/~media/A07730B2A798437D98501E798C2E13AA.ashx.
- Forschungsunion et Acatech (2013), « Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0, Final report of the Industrie 4.0 Working Group », <http://docplayer.net/254711-Securing-the-future-of-german-manufacturing-industry-recommendations-for-implementing-the-strategic-initiative-industrie-4-0.html>.
- Fuchs, E. et R. Kirchain (2010), « Design for location? The impact of manufacturing offshore on technology competitiveness in the optoelectronics industry », *Management Science*, vol. 56, n° 12, pp. 2323-49.
- Helper, S., T. Kruger et H. Wial (2012), « Why does manufacturing matter? Which manufacturing matters? », Brookings, Washington, DC, www.brookings.edu/wp-content/uploads/2016/06/0222_manufacturing_helper_krueger_wial.pdf.
- House Committee on Science, Space and Technology (2014), « Report on HR 2996 to revitalize American manufacturing and innovation », House Report 113-599, 113th Congress, 2nd Session, 15 September, Section IV (Hearing Summary).
- Houseman, S. et al. (2011), « Offshoring bias in US manufacturing », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 25, n° 2, pp. 111-132.
- Kearney, M.S., B. Hershbein et E. Jacome (2015), « Profiles of change: Employment, earnings and occupations from 1990-2013 », Brookings, Washington, DC, www.brookings.edu/blog/up-front/2015/04/21/profiles-of-change-employment-earnings-and-occupations-from-1990-2013/.

- Kennedy, S. (2015), « Made in China 2025 », résumé du plan de mai 2015 du Conseil des Affaires d'État pour le secteur manufacturier, Center for Strategic and International Studies (CSIS), Washington, DC, www.csis.org/analysis/made-china-2025.
- Mann, C.L. (2003), « Globalization of IT services and white collar jobs », *International Economics Policy Briefs*, n° PB03-11, Peterson Institute for International Economics, www.iie.com/publications/pb/pb03-11.pdf.
- Manufacturing Technology Centre (2016), « Challenging the boundaries of manufacturing », site web, www.the-mtc.org (consulté en octobre 2016).
- Meckstroth, D. (2014), « China has a dominant share of world manufacturing », Manufacturers Association for Productivity and Investment, www.mapi.net/blog/2014/01/china-has-dominant-share-world-manufacturing.
- Meckstroth, D. (2016), « The manufacturing value chain is bigger than you think », Manufacturers Association for Productivity and Investment, rapport MAPI, février, Washington, DC.
- MForesight (2017), « About us », <http://mforesight.org/about-us/#vision>.
- Molnar, M., S. Linder et M. Shuart (2016), « Building a new partnership – The national network for manufacturing innovation », communication présentée devant le National Council for Advanced Manufacturing, 29 avril, pp. 7.
- Nager, A. et R. Atkinson (2015), « The myth of America's manufacturing renaissance: The real state of US manufacturing », Information Technology & Innovation Foundation, Washington, DC.
- NIST (2016), « Building a new partnership: The National Network for Manufacturing Innovation », présentation de diapositives, juillet, Advanced Manufacturing National Program Office, National Institute for Standards and Technology.
- NSTC (2016), « A snapshot of priority technology areas across the federal government », Subcommittee for Advanced Manufacturing, National Science and Technology Council, White House, Washington, DC, www.whitehouse.gov/sites/whitehouse.gov/files/images/Blog/NSTC%20SAM%20technology%20areas%20snapshot.pdf.
- Osterman, P. et A. Weaver (2014), « Skills and skills gaps in manufacturing », in R. Locke et R. Wellhausen, (dir.pub), *Production in the Innovation Economy*, MIT Press, pp.17-50, Cambridge, MA.
- Pisano, G.P. et W.C. Shih (2012), *Producing Prosperity, Why America Needs a Manufacturing Renaissance*, Harvard Business School Press, Cambridge, MA.
- PCAST (2014), « Report to the President on accelerating US advanced manufacturing », Advanced Manufacturing Partnership 2.0 Steering Committee, President's Council of Advisors on Science and Technology, octobre, Washington, DC, www.broadinstitute.org/files/sections/about/PCAST/2014%20amp20_report_final.pdf.
- PCAST (2012), « Report to the President on capturing domestic competitive advantage in advanced manufacturing », Advanced Manufacturing Partnership Steering Committee, President's Council of Advisors on Science and Technology, Washington, DC, www.broadinstitute.org/files/sections/about/PCAST/2012%20pcast_amp_steering_committee_report.pdf.
- PCAST (2011), « Report to the President on ensuring American leadership in advanced manufacturing », President's Council of Advisors on Science and Technology, Washington, DC, www.broadinstitute.org/files/sections/about/PCAST/2011%20pcast-amp.pdf.
- Preeg, E. (2016), « My farewell report on US trade in manufactures », Senior Advisory for Trade and Finance, Manufacturers Association for Productivity and Investment, www.mapi.net/forecasts-data/my-farewell-report-us-trade-manufactures.
- Reynolds, E., H. Semel et J. Lawrence (2014), « Learning by building: Complementary assets and the migration of capabilities in US innovative firms », in R. Locke et R. Wellhausen, (dir.pub), *Production in the Innovation Economy*, MIT Press, pp. 51-80, Cambridge, MA.
- Samuelson, P.A. (2004), « Where Ricardo and Mill rebut and confirm arguments of mainstream economists supporting globalization », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 18, n° 3, pp. 135-146.
- Scott, R.E. (2015), « Manufacturing job loss: Trade not productivity is the culprit », Economic Policy Institute, www.epi.org/publication/manufacturing-job-loss-trade-not-productivity-is-the-culprit/.
- Shipp, S.S. et al. (2012), « Emerging global trends in advanced manufacturing », Report P-4603, Institute for Defense Analysis, Arlington, VA, www.wilsoncenter.org/sites/default/files/Emerging_Global_Trends_in_Advanced_Manufacturing.pdf.

- Spence, M. (2011), « The impact of globalization on income and employment: The downside of integrating markets », *Foreign Affairs*, vol. 90, n° 4, pp. 28-41, www.vietstudies.info/kinhte/MichaelSpence_Globalization_Unemployment.pdf.
- Stewart, A. et R.D. Atkinson (2013), « Restoring America's lagging investment in capital goods », Information Technology & Innovation Foundation, Washington, DC.
- Tassey, G. (2010), « Rationales and mechanisms for revitalizing US manufacturing and R&D strategies », *Journal of Technology Transfer*, vol. 35, n° 3, pp. 283-333.
- The White House (2016), « Fact sheet: President Obama announces winner of New Smart Manufacturing Innovation Institute », Office of the Press Secretary, www.whitehouse.gov/the-press-office/2016/06/20/fact-sheet-president-obama-announces-winner-new-smart-manufacturing.
- US DoD (2017), « DoD announces award of new advanced robotics manufacturing [ARM] innovation hub in Pittsburgh, Pennsylvania » Release n° NR-009-17, 13 janvier 2017.
- US DoD (2011), « Technology readiness assessment », Department of Defense, www.acq.osd.mil/chieftechologist/publications/docs/TRA2011.pdf.
- Whang, T. et al. (dir.pub.) (2012), « Advanced manufacturing technology in China: A roadmap to 2050 », Chinese Academy of Sciences, réimpression, Springer, Beijing.
- Xinhua (2016), « China establishes fund to invest in advanced manufacturing », 8 juin 2016, http://english.gov.cn/news/top_news/2016/06/08/content_281475367382490.htm.
- Xinhua (2015), « China unveils Internet plus action plan to fuel growth », 22 mai 2015, <http://english.cntv.cn/2015/05/22/VIDE1432284846519817.shtml>.

ANNEXE 11.A.1

Description des instituts d'innovation industrielle avancée

Cette annexe présente les 13 instituts d'innovation industrielle avancée qui ne sont pas décrits dans le corps du texte de ce chapitre.

L'**Institut pour l'innovation dans la conception et la fabrication numériques (Digital Manufacturing and Design Innovation Institute, DMDII)** a été créé en 2014 à partir d'un pôle situé à Chicago. La fabrication numérique implique d'utiliser des systèmes informatiques intégrés, y compris des outils de simulation, de visualisation en trois dimensions, d'analytique et de collaboration, pour créer simultanément des définitions de produit et de procédé de fabrication. L'innovation dans la conception est la capacité à mettre en œuvre ces techniques, ces outils et ces produits pour réinventer l'ensemble du processus de fabrication, de bout en bout.

Le DMDII compte 201 membres, parmi lesquels des entreprises de premier plan opérant dans une grande diversité de secteurs, de nombreuses entreprises plus petites et 11 universités. Le financement de 70 millions USD reçu dans le cadre du programme technologique industriel (*Manufacturing Technology Program, Mantech*) du Département de la Défense s'est accompagné d'un cofinancement de 248 millions USD provenant des entreprises industrielles et des États. La mission du DMDII porte sur une fabrication numérique susceptible d'abaisser le coût de conception des produits en favorisant des liens étroits entre fournisseurs. Elle vise également à réduire les coûts de production et les besoins en capital, par une amélioration des interactions durant tout le cycle de vie du produit. Parmi ses autres objectifs figurent la réduction du délai de mise sur le marché grâce à des itérations plus rapides, et le développement et la mise en œuvre d'innovations dans la conception numérique ainsi que d'usines et de chaînes logistiques numériques. De façon générale, le DMDII cherche à la fois à mettre au point de nouveaux produits et à améliorer les produits existants.

L'**Institut des innovations de demain dans les métaux légers (Lightweight Innovations for Tomorrow Institute, LIFT)**, fondé en 2014, s'intéresse aux métaux légers et aux métaux modernes. Son pôle principal se situe à Detroit (Michigan) ; d'autres sites dans le Michigan, l'Ohio, l'Indiana, le Tennessee et le Kentucky viennent le compléter. Les métaux légers et avancés permettent des gains de performance majeurs et une plus grande efficacité énergétique qui peuvent améliorer le fonctionnement de nombreux systèmes dans les domaines de la défense, de l'énergie, des transports et des produits techniques en général. Les métaux légers ont des applications dans les éoliennes, la technologie médicale, les cuves sous pression et les sources d'énergie de substitution.

Le LIFT compte 78 membres, parmi lesquels des entreprises de toutes tailles et de différents secteurs – métallurgie, aérospatiale et automobile, entre autres – et 17 universités, qui ont apporté globalement un cofinancement égal aux 70 millions USD de fonds fédéraux octroyés par le programme Mantech de la marine (Navy Mantech) et le Bureau de la recherche navale (Office of Naval Research). La mission du LIFT est d'innover dans la production de métaux légers haute performance et de permettre l'application des techniques ainsi développées dans différents secteurs industriels. L'Institut travaille sur des projets touchant à la fusion, aux procédés thermo-mécaniques, au traitement des poudres, à un outillage agile et économique, aux revêtements et à l'assemblage, avec un large éventail d'applications dans l'automobile, l'aérospatiale, la construction navale, les chemins de fer, la fabrication et d'autres secteurs encore.

L'institut **Power America – pour une électronique de puissance nouvelle génération** a été créé en 2015 pour développer la technologie des semi-conducteurs à large bande. L'objectif est une augmentation majeure de l'efficacité énergétique et de la fiabilité de l'électronique de puissance grâce à des matériaux semi-conducteurs moins volumineux, plus rapides et plus efficaces. Ces technologies non fondées sur le silicium peuvent fonctionner à des températures plus élevées, bloquer des tensions plus élevées et assurer une commutation plus rapide avec une perte de puissance moindre ; elles sont potentiellement plus fiables et offrent de gros avantages au niveau système. Leurs capacités permettent des réductions de poids, de volume et de coût du cycle de vie dans un large éventail d'applications. Cette technologie de semi-conducteurs aura de nombreuses applications, y compris dans les systèmes de moteurs industriels, les équipements électroniques grand public et les centres de données, ainsi que dans la conversion des sources d'énergie renouvelable (solaire et éolien). Une adoption généralisée de ces technologies, même dans un petit nombre d'applications, permettrait des économies substantielles d'électricité, notamment dans la production industrielle. Le coût des technologies à large bande est plus élevé, mais il devrait baisser à mesure que les niveaux de production augmenteront.

Soutenu par le Bureau de l'industrie avancée (Advanced Manufacturing Office) rattaché au Bureau de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE) au sein du Département de l'Énergie, Power America est implanté à Raleigh (Caroline du Nord) et réunit 17 partenaires industriels, cinq universités et trois laboratoires.

L'Institut pour l'innovation dans la fabrication de composites à haute performance (Institute for Advanced Composites Manufacturing Innovation, IACMI) a été créé en 2015 pour développer et démontrer les technologies qui permettront, dans les dix prochaines années, de fabriquer des composites polymères renforcés de fibre pour un coût réduit de moitié, en utilisant 75 % d'énergie en moins et en permettant la réutilisation ou le recyclage de 95 % ou plus des matériaux. L'IACMI est implanté à Knoxville, dans le Tennessee.

Il a été établi que les matériaux composites légers dotés de grandes qualités de résistance et de rigidité constituaient une technologie essentielle, susceptible d'intéresser de multiples secteurs industriels, et à même de renforcer l'efficacité énergétique des transports, de rendre plus efficace la production électrique et d'accroître la celle des énergies renouvelables. La palette d'applications de ces composites légers et très résistants est vaste, des automobiles aux pales d'éoliennes, en passant par les aéronefs. Les défis à relever sont le coût élevé, la faible vitesse de production (cycles longs), la forte intensité énergétique

nécessaire à la fabrication des matériaux composites, la recyclabilité et la nécessité d'améliorer les outils de conception, de modélisation et d'inspection et de respecter les exigences réglementaires. Une accélération technologique et des travaux de recherche industrielle s'imposent si l'on veut atteindre les objectifs de coût et de performances de fabrication, de la production des matériaux constitutifs à la fabrication des structures composites finales.

L'IACMI a reçu du Bureau de l'industrie avancée, rattaché au Bureau de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables au sein du Département de l'Énergie une allocation de 70 millions USD, complétée par un cofinancement de 180 millions USD. L'IACMI réunit 57 entreprises, 15 universités et laboratoires et 14 entités d'autres types.

L'Institut américain pour la fabrication de systèmes photoniques intégrés (American Institute for Manufacturing Integrated Photonics, AIM Photonics) a été constitué en 2015 à partir de pôles situés à Albany et Rochester, dans l'État de New York. Son but est de favoriser la transmission à ultra-haute vitesse de signaux pour les télécommunications, la nouvelle informatique et les capteurs à haute performance, ainsi que l'imagerie pour les percées du secteur de la santé.

La photonique intégrée nécessite d'intégrer de multiples dispositifs photoniques et électroniques (lasers, détecteurs, guides d'onde et structures passives, modulateurs, commandes électroniques et interconnexions optiques, par exemple) sur un substrat unique doté de caractéristiques à l'échelle nanométrique. Les avantages d'une telle intégration pourraient être considérables : conception simplifiée des systèmes, amélioration de leurs performances et de leur fiabilité, encombrement réduit des composants et diminution de la consommation électrique, le tout permettant des capacités et une fonctionnalité nouvelles essentielles, à moindre coût. Le secteur actuel de la fabrication photonique couvre un ensemble d'entreprises, d'organisations et d'activités liées entre elles, mais largement indépendantes. Il représente un écosystème potentiel, mais manque de l'organisation et du pouvoir global de marché indispensables à une innovation efficace dans les technologies industrielles nécessaires à la conception, la fabrication, l'essai, l'assemblage et l'habillage de dispositifs photoniques intégrés.

AIM Photonics a pour principal objectif de bâtir un écosystème de la photonique de bout en bout, comprenant les fonderies nationales, les outils de conception intégrée ainsi que la production, l'habillage, l'assemblage et l'essai automatisés, et d'assurer la valorisation de la main-d'œuvre. L'allocation de fonds fédéraux s'est accompagnée d'un cofinancement de plus de 200 millions USD, apporté par les États et les industriels.

L'institut **Flexible Hybrid Electronics (NextFlex)** a été créé en 2015 à partir d'un pôle situé à San José, dans la Silicon Valley. Son but est de produire des dispositifs extrêmement adaptables sur des substrats flexibles, extensibles, qui combinent des semi-conducteurs fins à oxydes métalliques complémentaires afin d'obtenir des composants de circuits intégrés, auxquels on ajoute de nouveaux composants au moyen de procédés d'impression. Ces composants représentent des possibilités de flexibilité et d'hybridation pour les circuits, les communications, la détection et les sources d'énergie, sans équivalent dans les processeurs au silicium actuels.

L'électronique hybride flexible conserve la pleine fonctionnalité des circuits électroniques traditionnels, mais dans des architectures flexibles innovantes susceptibles de s'intégrer à des objets courbés, irréguliers et extensibles. Elle pourrait étendre l'habillage électronique traditionnel à de nouvelles formes, ouvrant la voie à de nouvelles technologies

dans le domaine commercial et celui de la défense. À titre d'exemples, citons les dispositifs médicaux, les prothèses et les capteurs ; les capteurs utilisés pour surveiller les performances des structures ou des véhicules ou ceux qui interagissent via l'internet ou encore les grappes de capteurs servant à contrôler les positions physiques ; les dispositifs de mesure des performances ou d'information que l'on porte sur soi ; les systèmes d'interface homme-robot ; et les systèmes électroniques légers portables.

L'allocation octroyée dans le cadre du programme Mantech du Département de la Défense s'est élevée à 75 millions USD, pour un partage des coûts par les entreprises industrielles et les administrations des États et les administrations locales à hauteur de 96 millions USD. NextFlex réunit 22 entreprises membres venues d'horizon divers : fabricants de semi-conducteurs et leurs fournisseurs, entreprises aérospatiales et entreprises spécialisées dans les sciences de la vie. L'Institut compte aussi 17 universités, des organismes d'État et des organisations régionales.

Lancé en avril 2016, l'institut **Advanced Functional Fabrics of America (AFFOA)** a commencé sa période de démarrage, fort de plus de 80 membres, à la fin de cette même année. L'institut a son siège social dans le Massachusetts et prévoit la mise en place d'une série d'antennes régionales.

Des avancées scientifiques ont permis d'obtenir des fibres et des textiles dotés de propriétés extraordinaires, comme une plus grande solidité, une résistance au feu et une conductivité. Ces fibres pourraient devenir des composants électroniques et des composants de capteurs et de télécommunication. Cette nouvelle gamme se compose de tissus spéciaux, de tissus industriels, de textiles électroniques et d'autres formes de textiles de pointe. Ces matériaux pourraient fournir communication, éclairage, refroidissement, surveillance médicale, stockage dans des batteries et bien d'autres fonctions nouvelles. Ces textiles techniques sont élaborés sur une base formée d'un mélange de fibres synthétiques et naturelles, et de fibres multimatériaux, qui offrent, dans le secteur commercial et celui de la défense, une palette d'applications bien plus vaste que celle des tissus vestimentaires traditionnels.

Le siège social de l'AFFOA se trouve à Cambridge (Massachusetts). L'institut combine une allocation de 75 millions USD octroyée dans le cadre du programme Mantech du Département de la Défense avec quelque 240 millions USD d'aide financière fournie par des entreprises industrielles et des États. L'AFFOA se veut un partenariat public-privé au service d'un écosystème d'innovation de bout en bout aux États-Unis pour la fabrication de fibres et de textiles révolutionnaires. L'institut vise également à utiliser des installations de production nationales pour développer et transposer à plus grande échelle des processus de fabrication. Il prévoit d'ouvrir rapidement des perspectives de réalisation de produits, à partir d'outils de conception et de simulation, d'installations de production pilotes, d'une infrastructure de collaboration destinée aux fournisseurs et de possibilités de valorisation de la main-d'œuvre. L'institut est déterminé à opérer une révolution dans la fibre et le textile, en incorporant des avancées informatiques et en intégrant des dispositifs intelligents dans des fibres.

L'**Institut pour l'innovation dans la fabrication intelligente (Smart Manufacturing Innovation Institute)** a été annoncé en juin 2016 et est aujourd'hui en phase de démarrage et de recrutement de ses membres (The White House, 2016). Son siège social se trouve à Los Angeles.

On peut définir la fabrication intelligente comme le fait de faire converger technologies de l'information et de la communication et procédés de fabrication afin d'accéder à un

nouveau niveau de contrôle en temps réel de l'énergie, de la productivité et des coûts dans l'ensemble des usines et des entreprises. La fabrication intelligente a été désignée dans le rapport AMP2.0 du Partenariat pour une industrie avancée (Advanced Manufacturing Partnership, AMP) comme un domaine technologique industriel hautement prioritaire nécessitant un investissement fédéral. Par sa capacité à combiner une nouvelle génération de capteurs, de commandes, de processus et de plateformes informatiques, et des systèmes évolués de gestion de l'énergie et de la production, la fabrication intelligente a les moyens d'accroître l'efficacité énergétique et la capacité de fabrication d'un large éventail de secteurs industriels.

Sur son budget de 140 millions USD, l'Institut pour l'innovation dans la fabrication intelligente dispose déjà d'une allocation de 70 millions USD sur cinq ans de fonds fédéraux octroyés par le Bureau de l'industrie avancée du Département de l'Énergie. Le reste provient de cofinancements. L'Institut pour l'innovation dans la fabrication intelligente se concentrera sur l'intégration des technologies de l'information dans le processus de fabrication au moyen de dispositifs tels que des capteurs intelligents réduisant l'utilisation d'énergie. Ainsi, l'Institut prévoit de nouer un partenariat avec l'Institut pour l'innovation dans la fabrication de composites à haute performance du Département de l'Énergie pour procéder à des essais de capteurs de nouvelle génération dans la production de fibre de carbone. L'Institut pour l'innovation dans la fabrication intelligente pense s'associer à plus de 200 entreprises, universités, laboratoires nationaux et organisations à but non lucratif. Microsoft Corp., Alcoa Inc., Corning Inc., ExxonMobil, Google, le National Renewable Energy Laboratory et de nombreuses entreprises de plus petite taille font partie des partenaires de l'Institut. Ce dernier prévoit de lancer cinq centres, axés sur le développement et le transfert technologiques et sur la formation de la main-d'œuvre ; ces centres seront répartis dans le pays et dirigés par des universités ou des laboratoires : en Californie (UCLA), au Texas (Texas A&M), en Caroline du Nord (université de l'État de Caroline du Nord) et dans l'État de New York (Rensselaer Polytechnic Institute) et celui de Washington (Pacific Northwest National Laboratory).

Institut pour des progrès rapides dans le déploiement de l'intensification des procédés (Rapid Advancement in Process Intensification Deployment Institute, RAPID) – le 9 décembre 2016, le Bureau de l'efficacité énergétique et des énergies renouvelables a annoncé qu'un consortium conduit par l'Institut américain des ingénieurs chimistes (American Institute of Chemical Engineers) allait constituer le quatrième institut financé par le Département de l'Énergie, précisant qu'il s'agissait là d'une étape essentielle dans l'action menée par l'administration pour doubler la productivité énergétique des États-Unis d'ici à 2030. S'appuyant sur des fonds fédéraux pouvant aller jusqu'à 70 millions USD et sur des engagements de partage des coûts dépassant ce chiffre et émanant de plus de 130 partenaires, l'institut RAPID axera ses efforts sur le développement de technologies de rupture visant à accroître la productivité et l'efficacité énergétiques nationales de 20 % en cinq ans en agissant sur les procédés de fabrication dans des secteurs tels que le pétrole et le gaz, la pâte à papier et le papier, et différents fabricants nationaux de produits chimiques.

La fabrication traditionnelle de produits chimiques repose sur un processus à grande échelle, énergivore. Le nouvel institut fera appel à des stratégies d'intensification des procédés chimiques modulaires – y compris en combinant plusieurs procédés complexes tels que le mélange, la réaction et la séparation pour en faire une seule étape –, l'objectif étant d'améliorer la productivité et l'efficacité énergétiques et de réduire les coûts d'exploitation et les déchets. Des innovations de procédé peuvent réduire drastiquement la

surface au sol des équipements nécessaires dans une usine ou éliminer les déchets grâce à une utilisation plus efficace des facteurs de production. Ainsi, en simplifiant et en resserrant le processus, cette approche pourrait permettre un raffinage du gaz naturel directement au niveau de la tête de puits, ce qui économiserait jusqu'à la moitié de l'énergie perdue avec le procédé actuel de craquage de l'éthanol. Dans la seule industrie chimique, ces technologies pourraient faire économiser plus de 9 milliards USD par an sur les coûts de transformation aux États-Unis.

Le 16 décembre 2016, la Secrétaire au Commerce, Penny Pritzker, a annoncé l'octroi d'une allocation de 70 millions USD au nouvel **Institut national pour l'innovation dans la fabrication de produits biopharmaceutiques (National Institute for Innovation in Manufacturing Biopharmaceuticals, NIIMBL)**. Cet institut est le premier dont le principal domaine d'action a été proposé par les industriels et le premier à être financé par le Département du Commerce. L'organisme a mis en place une approche « ouverte » concernant les thèmes à traiter : un nouvel institut peut couvrir tout domaine non encore visé par un institut existant. L'Institut national de normalisation et de développement technologique (National Institute of Standards and Technology, NIST) avait lancé un concours intitulé « Industry-proposed Institutes Competition » permettant à des consortiums dirigés par des entreprises industrielles de proposer des domaines technologiques considérés comme critiques par les fabricants régionaux. Ce concours se voulait un moyen d'inverser le processus de sélection en le faisant partir de la base. Le résultat a été le NIIMBL.

L'institut aura pour objectif de transformer le processus de fabrication des produits biopharmaceutiques. De façon générale, il cherchera à renforcer le rôle prépondérant des États-Unis dans ce secteur, à améliorer les traitements médicaux et à faire en sorte que l'on dispose d'une main-d'œuvre qualifiée, élaborant pour ce faire de nouveaux programmes de formation qui répondent aux besoins de compétences spécifiques de ce secteur. L'annonce a été faite à l'université du Delaware, laquelle coordonnera l'institut en partenariat avec le NIST du Département du Commerce. Outre le financement fédéral, le nouvel institut reçoit un cofinancement privé initial de 129 millions USD d'un consortium de 150 entreprises, établissements d'enseignement, centres de recherche, organes de coordination, organismes à but non lucratif et partenariats de vulgarisation industrielle, répartis dans tout le pays.

La dotation permettant de créer l'**Advanced Regenerative Manufacturing Institute (ARMI)** a été annoncée le 21 décembre 2016 par le Département de la Défense, lors d'une manifestation organisée à la Maison Blanche pour célébrer les progrès du Réseau national des instituts d'innovation industrielle, aujourd'hui rebaptisé Manufacturing USA. Ce nouvel institut était le septième dirigé par le Département de la Défense.

Au même moment, les sénateurs et le gouverneur du New Hampshire annonçaient dans leur État une allocation sur cinq ans de 80 millions USD soutenue par les deux partis pour créer le consortium de biofabrication, dont le siège social se trouvera à Manchester Millyard. L'institut, conduit par une coalition comprenant DEKA R&D Corporation, l'université du New Hampshire et le système de soins de santé Dartmouth-Hitchcock, a pour mission le développement et la biofabrication de tissus et d'organes susceptibles d'être transplantés chez des patients. Dean Kamen, fondateur de DEKA, en assurera la direction. L'institut ouvrira la voie à une nouvelle génération de techniques de fabrication permettant de réparer et de remplacer des cellules et des tissus. S'il y parvient, cette technologie pourrait conduire à la fabrication d'une nouvelle peau ou d'organes vitaux pour les nombreux

américains en attente d'une greffe. L'institut se concentrera sur la résolution des problèmes industriels transversaux qui bloquent la production de nouveaux tissus et organes de synthèse, comme l'amélioration de la disponibilité, de la reproductibilité, de l'accessibilité et de la normalisation des matériaux, des technologies et des procédés de fabrication. Des collaborations sont attendues entre de multiples disciplines : bio-impression 3D, cytologie et étude de procédé, méthodes pharmaceutiques de dépistage automatisé ou expertise logistique nécessaire pour produire et transporter rapidement les matériaux vitaux.

L'**Institut pour la réduction de l'énergie grise et la diminution des émissions dans la fabrication de matériaux (Institute for Reducing Embodied Energy and Decreasing Emissions in Materials Manufacturing, REMADE)**, créé par le Département de l'Énergie, a été sélectionné le 4 janvier 2017. Son siège social se trouvera à Rochester, dans l'État de New York, et il sera dirigé par l'Alliance pour une innovation durable dans l'industrie (Sustainable Manufacturing Innovation Alliance, SMIA). L'institut REMADE obtiendra jusqu'à 70 millions USD de fonds fédéraux, sous réserve de l'ouverture des crédits, ainsi qu'un cofinancement de même montant correspondant à des engagements privés de partage des coûts auxquels ont souscrit plus de 100 partenaires. L'institut aura comme principal objectif de réduire le coût des technologies nécessaires pour réutiliser, recycler ou refabriquer des matériaux tels que des métaux, des fibres, des polymères et des déchets électroniques, et cible un gain de 50 % d'efficacité énergétique globale d'ici à 2027. D'après le Département de l'Énergie, ces mesures d'efficacité pourraient faire économiser des millions sur les coûts de l'énergie et améliorer la compétitivité économique des États-Unis grâce à des techniques de fabrication innovantes.

L'institut s'efforcera de réduire l'utilisation d'énergie sur la durée de vie des matériaux fabriqués en développant de nouvelles techniques, du berceau au berceau, permettant la réutilisation, le recyclage et la refabrication de ces matériaux. L'industrie manufacturière des États-Unis représente près d'un tiers de toute l'énergie consommée annuellement dans le pays, la majeure partie de cette énergie étant incorporée dans les produits fabriqués. Des technologies innovantes facilitant le réemploi de ces matériaux à d'autres fins pourraient économiser aux fabricants des États-Unis et au pays jusqu'à $1.6 \cdot 10^{15}$ BTU d'énergie par an, c'est-à-dire l'équivalent de 280 millions de barils de pétrole, soit un mois d'importations.

Le Département de la Défense a proposé à l'**Institut de robotique avancée (Advanced Robotics Manufacturing Institute, ARM)** de s'employer à renforcer la primauté des États-Unis en robotique collaborative intelligente, laquelle permet à des robots évolués de travailler aux côtés d'humains sans heurt et de façon sûre et intuitive pour soulever les charges lourdes sur une chaîne d'assemblage ou effectuer avec précision des tâches délicates ou dangereuses. Le Département de la Défense a indiqué que la robotique d'assistance pouvait changer une grande diversité de secteurs manufacturiers, de la défense à la santé en passant par l'automobile et l'espace, permettant une fabrication fiable et efficiente de produits personnalisés de haute qualité.

L'ARM, quatorzième et dernier institut du réseau Manufacturing USA de l'administration Obama a été annoncé le 13 janvier 2017. Son siège social sera à Pittsburgh et le groupe chargé de la proposition a été convoqué par l'université Carnegie Mellon. L'institut réunira une très large équipe, composée de 84 partenaires industriels, 35 universités et 40 autres groupes dans 31 États. Les fonds fédéraux et le partage des coûts par les industriels et les États fourniront un budget de 250 millions USD, l'engagement de l'administration fédérale s'élevant à 80 millions. Le Centre de valorisation de la main-d'œuvre (Center for

Workforce Development) de l'université de Clemson dirigera les programmes de formation du nouvel institut.

Dans son annonce, le Département de la Défense expliquait ainsi ce qui nécessitait la création de ce nouvel institut :

« La robotique est déjà présente sur les sites de fabrication, mais les robots d'aujourd'hui sont généralement onéreux, prévus à une seule fin et délicats à reprogrammer ; de plus, ils doivent être isolés des humains pour des raisons de sécurité. Alors qu'il est de plus en plus nécessaire de faire appel à la robotique pour atteindre le niveau de précision requis dans la défense et d'autres secteurs manufacturiers, le coût de l'investissement et la complexité d'utilisation empêchent souvent les fabricants de petite et moyenne taille d'accéder à cette technologie. La mission de l'institut ARM est donc de créer puis de déployer la technologie robotique, en intégrant l'ensemble divers des pratiques industrielles et des connaissances institutionnelles disséminées dans de nombreuses disciplines – technologie de détection, développement d'effecteurs, logiciel et intelligence artificielle, science des matériaux, modélisation du comportement des humains et des machines et assurance qualité – pour tenir les promesses d'un écosystème dynamique d'innovation dans l'industrie. Les technologies relevant de l'institut ARM et qui sont à l'orée d'une importante évolution sont notamment les suivantes : robotique collaborative, maîtrise des robots (apprentissage, adaptation et réaffectation à d'autres tâches), manipulation habile, navigation et mobilité autonomes, perception et détection, et essai, vérification et validation. » (US DoD, 2017).

Le Département de la Défense a qualifié les capacités nationales actuelles en matière de technologie robotique industrielle de « fragmentées », mentionnant la nécessité d'une amélioration de l'organisation et de la coordination pour mieux armer les États-Unis face à la concurrence mondiale dans ce secteur.

Un autre institut pourrait être instauré par le Département du Commerce, portant le total à 15. Le processus de sélection du thème, géré par le NIST, est maintenant terminé, mais la sélection finale est conditionnée par la disponibilité des fonds en 2017.

Les instituts sont déjà en pleine action. L'administration a présenté une série d'exemples de ce qu'ils ont accompli (The White House, 2016) :

- Pour aider à ancrer la production des nouvelles technologies de semi-conducteurs aux États-Unis et à accélérer la commercialisation de l'électronique de puissance avancée, en mars, l'institut d'innovation industrielle Power America a noué un partenariat fructueux avec la société X-FAB de Lubbock (Texas) en vue de moderniser une fonderie de 100 millions USD qui produira la prochaine génération de semi-conducteurs à large bande à un prix compétitif. Les nouveaux débouchés commerciaux ainsi créés permettront de maintenir des centaines d'emplois.
- S'appuyant sur des techniques de fabrication de métaux de nouvelle génération, l'Institut des innovations de demain dans les métaux légers (LIFT), implanté à Detroit et spécialisé dans les métaux légers, a démontré avec succès comment réduire le poids de pièces métalliques essentielles sur les automobiles et les camions. L'institut est parvenu à réduire ce poids de 40 %, avec à la clé une amélioration de la consommation spécifique moyenne des véhicules et une économie sur les coûts de carburant. Outre cela, le LIFT a introduit dans 22 États un programme de formation des travailleurs à l'utilisation des métaux légers. À l'été 2016, 38 entreprises accueillaient des étudiants pour des stages rémunérés de longue durée dans l'industrie, en partenariat avec le LIFT.

- America Makes a drainé des centaines de millions de dollars d'investissements nouveaux dans l'industrie de sa région. L'institut a notamment contribué à attirer le nouveau pôle mondial d'impression 3D de General Electric, un investissement de 32 millions USD, et incité Alcoa à investir 60 millions USD dans ses installations de New Kensington, en Pennsylvanie. Ces deux investissements tireront avantage de la proximité avec America Makes et son expertise dans l'impression 3D à l'aide de poudres métalliques.
- Par ailleurs, America Makes, en collaboration avec Deloitte et d'autres partenaires, a créé un cours en ligne gratuit sur les principes de l'impression 3D pour les entreprises. Durant l'année écoulée, plus de 14 000 dirigeants ont suivi ce cours pour comprendre ce que l'impression 3D pouvait apporter à leur entreprise.

À la demande du Département de la Défense et dans le cadre du programme Mantech, Deloitte a mené une évaluation indépendante du modèle des instituts en 2016. Ses constatations générales, publiées dans un rapport de janvier 2017, sont plutôt positives (Deloitte, « Manufacturing USA, A Third-Party Evaluation of Program Design and Progress », Washington, DC). Les auteurs ont constaté que l'adoption de l'industrie avancée était critique pour que les progrès accomplis dans l'économie nationale générale améliorent la croissance de la productivité, le déficit commercial et la création d'emplois. À cet égard, l'examen a permis d'établir que le modèle de partenariat public-privé des instituts était à même de créer des collaborations elles-mêmes susceptibles d'améliorer l'investissement dans la R-D industrielle, de résoudre les problèmes d'action concertée dans le secteur, de réduire les obstacles à l'innovation, de permettre un meilleur accès à la propriété intellectuelle et de diminuer les risques et les coûts grâce à un accès partagé aux actifs. Sur le plan de la facilitation technologique, l'examen a permis de constater que les instituts pouvaient avoir un rôle non négligeable dans la réduction des risques auxquels sont exposés les investissements dans la R-D industrielle, surtout compte tenu de l'inégalité des investissements consentis par des entreprises de tailles et d'horizons différents. Le partage d'équipements de pointe, la mise en commun de la R-D, la planification technologique et le partage des connaissances que permettent les instituts pouvaient créer des avantages notables pour les industriels participants qui, seuls, n'auraient pas les moyens de les obtenir.

Concernant la formation de la main-d'œuvre, Deloitte a constaté que le modèle des instituts pouvait atténuer le déficit de compétences auquel les entreprises industrielles font face désormais à mesure qu'elles s'engagent dans l'industrie avancée. Les programmes des instituts dans ce domaine comprenaient des évaluations de l'offre et de la demande de main-d'œuvre, une accréditation et une certification des salariés et des programmes de formation et d'apprentissage centrés sur les technologies. L'examen a également permis d'observer des progrès notables dans la création d'écosystèmes améliorés de production. Que l'on considère la palette des domaines technologiques qu'il cible ou sa portée géographique, le portefeuille d'instituts représentait une force du système. Le grand nombre de ses membres et la diversité de taille et de type des entreprises concernées étaient un signe du succès initial du modèle. Il a aussi été établi que les instituts avaient une part dans le renforcement des pôles économiques régionaux, essentiels au développement des régions. Le rapport de Deloitte formulait aussi des recommandations sur le programme, dont certaines complètent la liste donnée dans ce chapitre des défis que les instituts doivent relever. Globalement, cet examen a constitué une première assurance, par une source autorisée indépendante, que le modèle des instituts allait dans le bon sens.

PARTIE II

Chapitre 12

La Chine et la prochaine révolution de la production

par

Qian Dai

Administrateur, Département de la coopération internationale,
ministère chinois de la Science et de la Technologie, et consultant à la
Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE

La République populaire de Chine (ci-après « la Chine ») est le premier contributeur à la valeur ajoutée manufacturière mondiale. Ces dernières années, de nombreuses entreprises chinoises ont considérablement progressé dans la création et l'utilisation de nouvelles technologies de production. Ainsi, la Chine est aujourd'hui le premier utilisateur mondial de robots industriels. Ces progrès sont allés de pair avec un ensemble d'initiatives majeures et d'investissements publics, dont l'un des objectifs primordiaux est d'accroître l'utilisation des technologies numériques dans le secteur de la fabrication. Le but que s'est fixé la Chine – accroître l'intensité de connaissance de sa production – va élargir l'éventail des marchés sur lesquels elle peut affronter la concurrence. Il n'en reste pas moins que la modernisation du secteur manufacturier chinois constitue un défi complexe. Les capacités technologiques demeurent très inégales entre les entreprises. L'enjeu n'est pas seulement d'accroître les investissements publics dans la science et l'innovation, mais aussi de commercialiser la recherche, d'améliorer les infrastructures, de favoriser un fonctionnement plus efficient des marchés et d'encourager l'innovation dans le secteur privé. Les pouvoirs publics doivent en outre faire face à toute une série de bouleversements connexes tels que les perturbations du marché du travail, l'importance croissante de la cybersécurité et la nécessité de mieux coordonner les actions publiques.

Les données statistiques concernant Israël sont fournies par et sous la responsabilité des autorités israéliennes compétentes. L'utilisation de ces données par l'OCDE est sans préjudice du statut des hauteurs du Golan, de Jérusalem-Est et des colonies de peuplement israéliennes en Cisjordanie aux termes du droit international.

Introduction

Le présent chapitre s'intéresse au développement et à l'utilisation d'un ensemble de technologies nouvelles et émergentes dans le secteur manufacturier en République populaire de Chine (ci-après « la Chine »). Il s'agit plus précisément de cinq familles technologiques – les technologies de l'information et des communications (TIC), la biotechnologie industrielle, l'impression 3D, les nanotechnologies et les nouveaux matériaux –, qui sont appelées à jouer un rôle central dans ce que l'on appelle la « prochaine révolution de la production ». Le chapitre examine par ailleurs les récentes initiatives prises par l'administration chinoise pour faciliter la modernisation du secteur manufacturier, comme par exemple *Made in China 2025* et « Internet Plus ». Il décrit en outre les politiques publiques mises en œuvre pour chacune des technologies en question avec, en regard, des suggestions de mesures de l'OCDE. La dernière section du chapitre relate les principales difficultés que rencontrent les entreprises et les dirigeants chinois pour moderniser le secteur manufacturier.

On verra dans ce chapitre que beaucoup d'entreprises chinoises ont accompli ces dernières années des progrès considérables dans le développement et l'utilisation de nouvelles technologies de production. La Chine est aujourd'hui le premier utilisateur de robots industriels au monde, ainsi que le premier marché mondial des services de communication de machine à machine. En avril 2015, elle se classait au troisième rang mondial pour le nombre de brevets relatifs à l'impression 3D. En 2010, elle arrivait en tête pour le nombre de publications sur les nanotechnologies recensées dans le *Science Citation Index*. Ces progrès se sont accompagnés d'initiatives et d'investissements publics extrêmement vastes et ambitieux, dont l'objectif central est d'atteindre l'excellence en matière d'utilisation des technologies numériques dans le secteur manufacturier.

Malgré des progrès rapides, la modernisation du secteur de la fabrication connaît de sérieuses difficultés, à commencer par la grande inégalité des capacités technologiques des entreprises. L'enjeu n'est pas seulement d'accroître les investissements publics dans la science, la recherche et l'innovation, mais aussi de commercialiser la recherche, d'améliorer les infrastructures, de favoriser un fonctionnement plus efficient des marchés et d'encourager l'innovation dans le secteur privé. De nombreux dispositifs encouragent l'adoption des technologies nécessaires à la modernisation de la fabrication, mais les pouvoirs publics doivent en outre faire face à toute une série de bouleversements connexes tels que les perturbations du marché du travail et l'importance croissante de la cybersécurité. Il leur faut aussi agir sur le plan de la gouvernance, notamment en ce qui concerne la coordination entre les ministères ainsi qu'entre l'État et les administrations régionales.

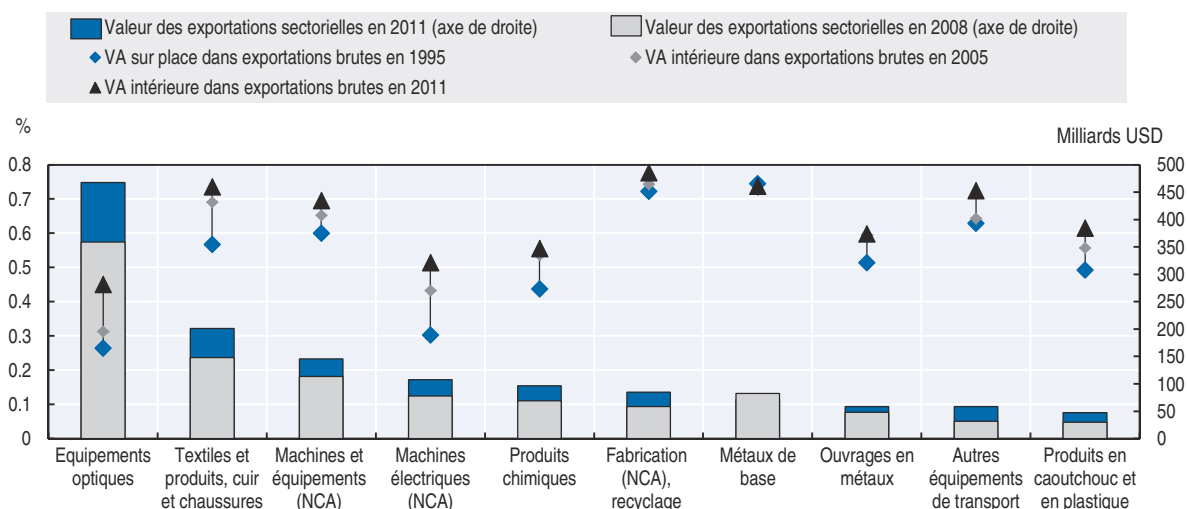
Le secteur manufacturier en Chine : principales technologies et évolutions récentes

Cette section passe en revue les progrès accomplis dans le secteur manufacturier chinois en ce qui concerne le développement et l'utilisation de tout un éventail de technologies : technologies numériques, robotique, impression 3D, biotechnologie,

nanotechnologies et nouveaux matériaux. Chacune de ces catégories de technologies fait l'objet de suggestions de l'OCDE concernant les actions appropriées à mener, en regard des mesures adoptées par les autorités chinoises. Un certain nombre de lacunes dans les politiques publiques chinoises sont ainsi mises en évidence. Les mesures prises par les pays de l'OCDE sont également indiquées à titre de comparaison.


Le poids de la Chine dans le secteur manufacturier mondial a de nombreuses répercussions, à la fois pour le pays et pour la production mondiale. Le secteur manufacturier est un pilier de l'économie chinoise. En 2014, il représentait 19 % de la valeur ajoutée manufacturière mondiale et 35,9 % du produit intérieur brut (PIB) du pays (Chinese Academy of Engineering, 2015), et arrivait en tête du classement mondial pour la cinquième année consécutive. Par ailleurs, on constate depuis quelques décennies dans les principaux secteurs exportateurs de la Chine une augmentation de la valeur ajoutée sur place dans les exportations brutes (graphique 12.1). Le Premier ministre chinois a récemment souligné que la modernisation des industries manufacturières – nouvelles et traditionnelles – était indispensable au développement à long terme du pays (Li K., 2015).

Graphique 12.1. **Évolution de la valeur des exportations sectorielles et de la part de la valeur ajoutée sur place dans la valeur des exportations brutes**



Note : NCA = non classé ailleurs.

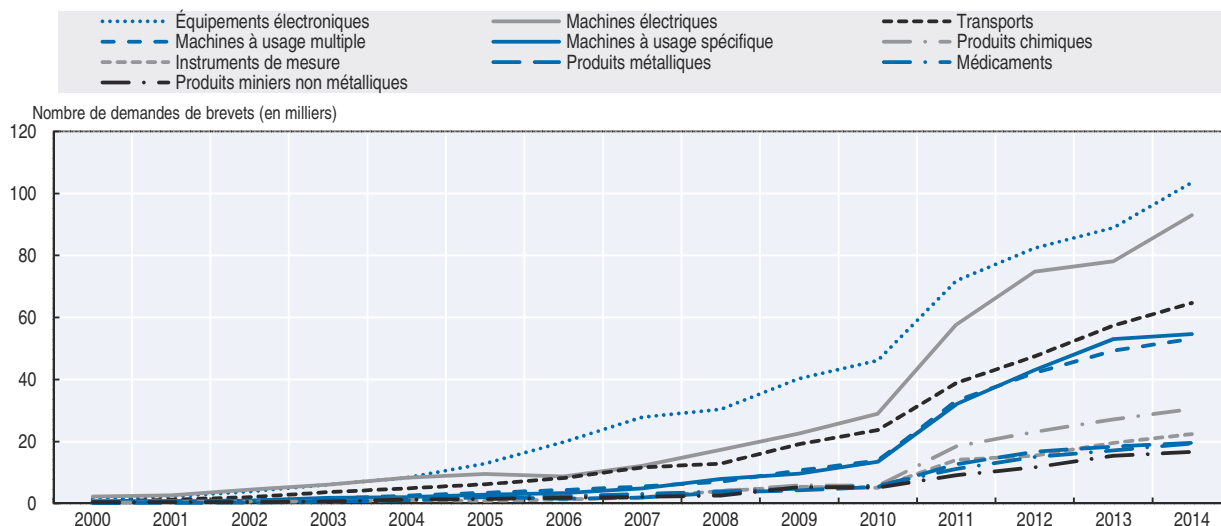
Source : OCDE (2017e), Base de données TiVA, <https://stats.oecd.org/index.aspx?queryid=66237> (consultée en janvier 2017).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679887>

Dans le cadre de sa stratégie gouvernementale de développement tiré par l'innovation, la Chine tente également de gagner du terrain dans le domaine de la fabrication de pointe. Les vols spatiaux habités, les submersibles d'exploration en eau profonde habités, le train à grande vitesse et le supercalculateur le plus rapide du monde sont autant de réussites qui témoignent de ce dynamisme. Ces réalisations vont de pair avec les progrès accomplis dans les domaines de la recherche, de l'éducation et des infrastructures (ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, 2015c). Les dépenses brutes de recherche et de développement de la Chine étaient légèrement supérieures à 2 % du PIB en 2014, soit plus élevées que celles de l'Union européenne et nettement plus que celles des pays enregistrant un PIB par habitant comparable (OCDE, 2017a). En 2014, le secteur manufacturier arrivait en tête pour les demandes de brevets en Chine (graphique 12.2).


Graphique 12.2. **Progression des demandes de brevets, 2000-14**

Les dix secteurs enregistrant le plus de demandes de brevets en 2014



Note : Les données chronologiques par secteur industriel ne sont disponibles en Chine que pour les entreprises dont le chiffre d'affaires dépasse un certain montant. Cela dit, toutes les entreprises concernées ne sont pas tenues de déclarer leurs données. Par ailleurs, plusieurs modifications ont nui à l'homogénéité des données chronologiques. Durant la période examinée, trois ajustements majeurs sont intervenus : i) 2000-06, les entreprises déclarantes incluent également les entreprises privées ayant un chiffre d'affaires supérieur à 5 millions CNY, ainsi que l'ensemble des entreprises publiques ; ii) 2007-10, les entreprises déclarantes sont celles dont le chiffre d'affaires dépasse 5 millions CNY ; et iii) 2011-14, les entreprises déclarantes sont celles dont le chiffre d'affaires dépasse 20 millions CNY. Suite au changement de méthodologie intervenu en 2010, le nombre d'entreprises déclarantes a considérablement augmenté (de 41 002 en 2010 à 301 630 en 2011), ce qui explique la hausse manifeste des demandes de brevets à partir de cette date.

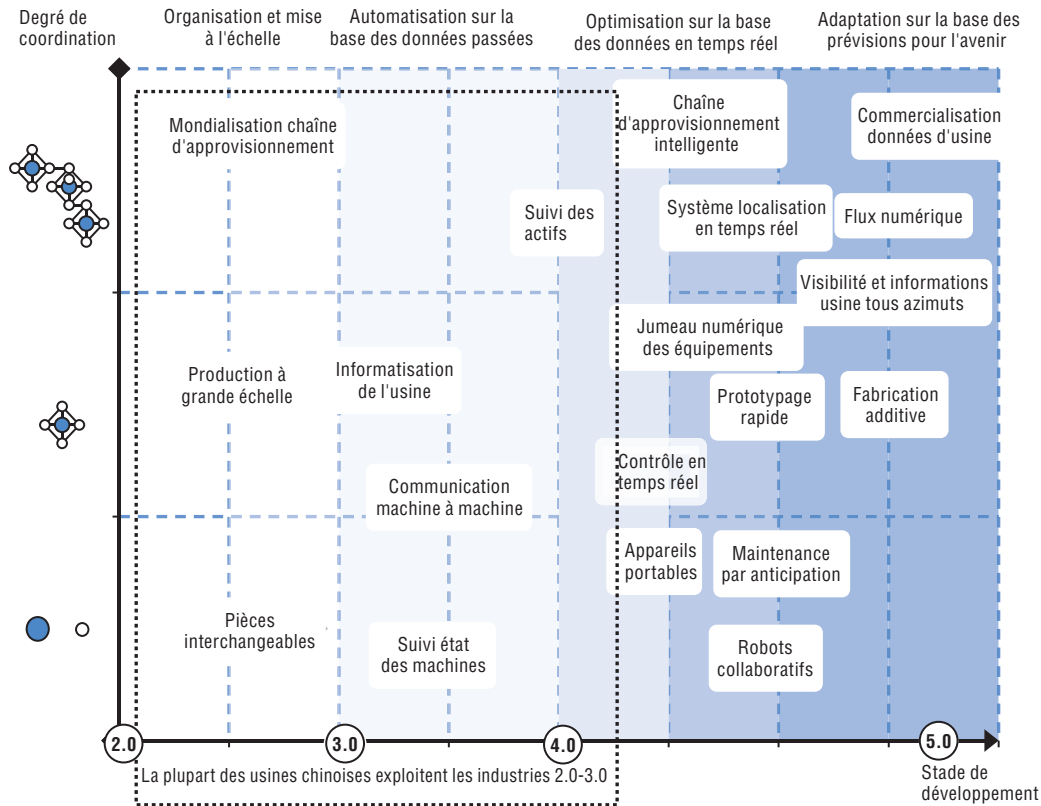
Source : Bureau national des statistiques de Chine (2015), *China Statistics on Science and Technology Activities of Industrial Enterprises*.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679906>

Le but que s'est fixé la Chine d'accroître l'intensité de connaissances de sa production – va élargir l'éventail des marchés sur lesquels elle peut affronter la concurrence et contribuer au développement des technologies de production sur ces marchés. Selon une étude récente portant sur 25 pays, la part des exportations chinoises de produits de haute technologie est passée de 6 % en 2000 à 37 % en 2013, et le pays est aujourd'hui le plus gros exportateur de ce type de produits (HSBC, 2014).


Pour autant, le secteur manufacturier chinois connaît de multiples difficultés. Les technologies de pointe y sont en général peu répandues (graphique 12.3), et bien que la productivité du travail ait augmenté en Chine depuis dix ans, elle demeure très inférieure à celle des États-Unis (et d'autres pays développés) (OCDE, 2015a). La compétitivité de la Chine dans les chaînes de valeur mondiales reste cantonnée à la transformation et l'assemblage (OCDE, 2013), souvent grâce à une main-d'œuvre et des matières premières bon marché. Toutefois, la rémunération des salariés de ce secteur s'est accrue de 66 % entre 2010 et 2014, soit plus que les 54 % enregistrés en moyenne dans l'ensemble de l'économie (Bureau national des statistiques de Chine, 2014). Pour le projet *Made in China*, la qualité des produits et la notoriété des marques font toujours défaut. Face à l'aggravation de la pollution de l'air, de l'eau et des sols causée par la production industrielle, de nouvelles voix se font entendre pour réclamer une fabrication plus respectueuse de l'environnement. Malgré une nette intensification de la recherche-développement (R-D) dans le pays, la Chine continue d'importer massivement pour la fabrication de pointe. En 2013, les importations de semi-conducteurs dépassaient celles de pétrole, premier produit importé en Chine (ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, 2015c).

Graphique 12.3. **Évolution de l'utilisation de différents types de TIC selon les stades de développement industriel**



Note : Les symboles figurant à côté de l'axe vertical indiquent le degré de coordination. La plupart des usines de fabrication chinoises sont au stade 2.0-3.0.

Source : STM Stieler et IoT ONE (2016), « Growing from big to strong », www.stm-stieler.de/files/558:A_Pragmatic_Assessment_of_Chinese_Industrial_Automation_2016_08_22.pdf.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679925>

Un nombre important d'entreprises manufacturières chinoises présentent des lacunes en matière de gestion et de capacités numériques. Le rôle du secteur privé dans certains domaines de la R-D est par ailleurs limité, faute de ressources ou d'incitations appropriées. Les évolutions technologiques entraînent en outre une demande accrue de gestionnaires, de chercheurs et de techniciens qualifiés, qui n'est pas facile à satisfaire. La sécurité de l'information est un autre sujet de préoccupation croissante. Parallèlement, la concurrence mondiale s'est intensifiée à l'heure où la fabrication de pointe devient une priorité stratégique pour beaucoup de pays développés ; certaines entreprises multinationales rapatrient par ailleurs leurs activités manufacturières haut de gamme dans leur pays d'origine.

En Chine, deux approches cohabitent dans le secteur manufacturier. D'un côté, les entreprises de fabrication chinoises cherchent à conserver leur compétitivité dans leurs créneaux traditionnels (tels que la transformation et l'assemblage) en augmentant l'efficacité et la qualité des produits, et en réduisant les coûts. De l'autre, de nombreux fabricants sont également actifs dans le domaine de l'innovation de produit, en espérant trouver des débouchés dans de nouveaux secteurs. Dans ce contexte, comme on l'a vu plus haut, les technologies génériques sont de plus en plus utilisées.

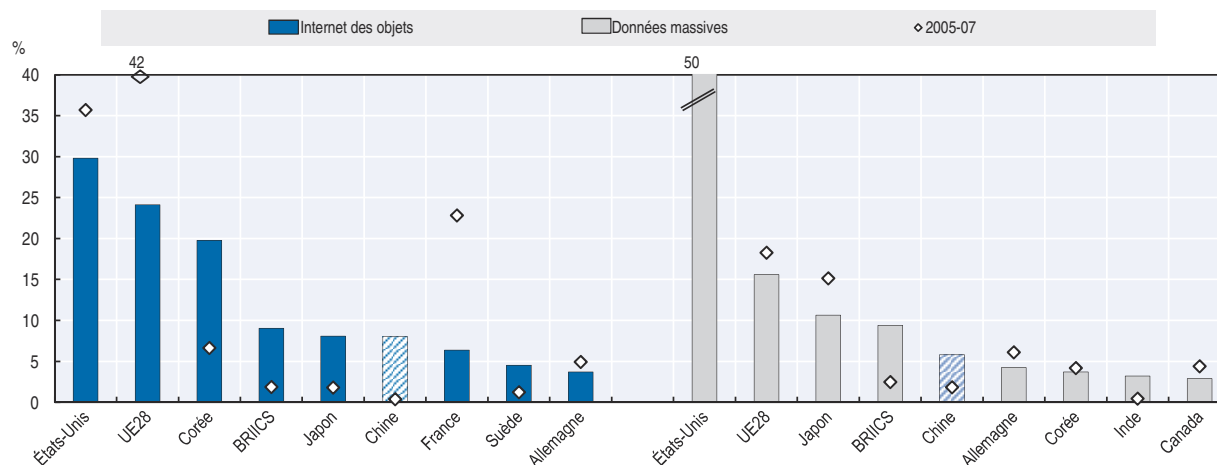
Les technologies numériques

L'importance des TIC – telles que l'internet des objets (IdO), l'informatique en nuage et les données massives – est un fait attesté par les principaux chiffres de l'industrie chinoise. Jack Ma, fondateur et directeur exécutif du groupe Alibaba – qui détient un grand nombre de marques à succès basées sur l'internet chinois – a déclaré : « La principale source d'énergie pour la fabrication du futur n'est pas le pétrole, mais les données. » (Li Q., 2015). Les TIC sont utilisées actuellement dans l'ensemble des processus de fabrication, de la logistique à la production, en passant par la gestion et les services.

En 2014, le marché de l'IdO en Chine se chiffrait à plus de 600 milliards CNY (94 milliards USD), et enregistrait un taux de croissance annuelle cumulé de plus de 30 % depuis 2011¹. La Chine devrait devenir l'un des premiers marchés mondiaux dans le domaine, avec près d'une unité industrielle connectée sur cinq (comme les machines, outils et composants) d'ici à 2020 (IDC, 2015). En 2014, le marché des services infonuagiques publics s'élevait à 7.02 milliards CNY (environ 1.1 milliard USD), soit une hausse de 47.5 % par rapport à 2013 (China Academy of Information and Communication Technology, 2015b). Le marché des données massives chiffrait quant à lui à quelque 8.4 milliards CNY (1.3 milliard USD) en 2014. Il devrait croître d'environ 40 % par an entre 2016 et 2018 (China Academy of Information and Communication Technology, 2015a). En 2014 également, le chiffre d'affaires de l'industrie électronique chinoise était supérieur à 14 000 milliards CNY (2 200 milliards USD) (ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, 2015b)². Enfin, la Chine est en train de rattraper son retard en matière de capacités de R-D par rapport aux leaders mondiaux du secteur (graphique 12.4).

Graphique 12.4. Pays leaders dans les technologies de l'internet des objets et des données massives (2005-07 et 2010-12)

Part des pays ayant déposé des familles de brevets IP5 auprès de l'US Patent Office et de l'Office européen des brevets pour les TIC concernées



Note : Ces données font référence aux familles de brevets IP5 déposées auprès de l'Office européen des brevets (OEB) ou de l'US Patent Office aux États-Unis (USPTO), en tenant compte de la première date de dépôt et du pays de résidence du demandeur selon un comptage fractionnaire. Au Royaume-Uni, l'Intellectual Property Office (IPO) répartit les brevets selon les secteurs technologiques. BRIICS = Brésil, Fédération de Russie, Inde, Indonésie, Chine et Afrique du Sud.

Sources : Calculs de l'OCDE d'après IPO (2014), « Eight Great Technologies: the Patent Landscapes », www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/360986/Eight_Great_Technologies.pdf et OCDE (2015c), STI Micro-data Lab: Intellectual Property database, <http://oe.cd/ipstats> (consulté en juin 2015).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679944>

L'internet des objets (IdO)

Selon les estimations, l'utilisation de l'IdO dans le secteur manufacturier chinois pourrait faire augmenter le PIB de 196 milliards USD au cours des 15 prochaines années (Accenture, 2015). En Chine, c'est dans le domaine de la construction de machines, du secteur automobile et de la sidérurgie que l'IdO connaît le plus de succès (CCID Consulting, 2015a). Il est surtout utilisé pour gérer la chaîne d'approvisionnement, optimiser les processus, commander les équipements et contrôler la consommation d'énergie (China Academy of Telecommunication Research, 2014b). Les services de communication de machine à machine (M2M) se sont également multipliés dans le pays. Fin 2014, on comptait au niveau national 74 millions de connexions entre les machines, ce qui faisait de la Chine le plus grand marché mondial des communications M2M (GSMA, 2015).

La ville de Wuxi, dans la province de Jiangsu, a participé à l'initiative *Smart Cities* de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Wuxi No.1 Cotton Mill, l'une des plus grandes usines de fabrication de textiles de la ville (créée en 1919), est considérée comme un exemple de modernisation réussie grâce à l'utilisation de l'IdO. L'entreprise a équipé sa chaîne de production de plus de 90 000 capteurs et de 28 systèmes permettant de contrôler la production, la qualité et la consommation d'énergie. Le nombre de travailleurs pour 10 000 broches de filature a été ramené de plus d'une centaine à 25, et les économies d'énergie se chiffrent à plus de 8 millions CNY par an (1.6 million USD) (Su, 2014).

L'IdO permet aussi d'inventer de nouveaux services et de nouvelles activités pour les entreprises manufacturières. En 2007, par exemple, Sany Heavy Industry, un fabricant d'équipements pour chantier, a mis au point un système de contrôle interne qui collecte des données et surveille les opérations au moyen de capteurs et d'instruments de contrôle préinstallés dans les produits. En fonction de ces données, des informations et des recommandations sont fournies aux clients grâce au suivi en temps réel, à la maintenance corrective et à l'assistance à la résolution des problèmes. Ces données facilitent également la R-D interne. D'après les informations communiquées par l'entreprise, plus de 200 000 machines sont désormais reliées à ce système.

L'informatique en nuage

En Chine, les entreprises de fabrication recourent surtout à l'informatique en nuage (ou « infonuagique ») pour améliorer leur utilisation des infrastructures informatiques et réduire les coûts de la planification de leurs ressources. En 2014, les principaux services infonuagiques proposés aux industries chinoises étaient l'infrastructure en tant que service (IaaS) – comme par exemple l'hébergement, le stockage et la création d'un réseau en nuage – et le logiciel en tant que service (SaaS) (CCID Consulting, 2015b) (encadré 12.1).

Rendue possible par l'informatique en nuage, l'idée d'une fabrication en nuage intelligente (*cloud manufacturing* en anglais) a également été proposée en Chine : elle consiste à mettre les ressources et les capacités manufacturières à la disposition des utilisateurs finaux via l'internet ou des plateformes infonuagiques. Le groupe Shenyang Machine Tool (SMTCL), qui était le deuxième fabricant mondial de machines-outils en 2014 (Statista, 2014), s'est inspiré de cette idée pour mettre au point sa machine-outil intelligente i5, qui se connecte à une plateforme infonuagique. Une application conçue spécialement à cet effet est fournie aux utilisateurs finaux ; elle leur permet de créer des maquettes et des modèles qui sont ensuite téléchargés sur la plateforme et fabriqués par les machines disponibles. Pour aller plus loin dans son projet de « concrétisation des idées », l'entreprise a mis en place

une autre plateforme qui analyse les données provenant des clients, des concepteurs et des machines, et favorise la collaboration dans des domaines variés (de la mise en évidence de la demande à la conception et à la production). Dans cette démarche, SMTCL cherche à ne plus être une simple entreprise de fabrication mais à devenir un fournisseur de services axés sur la productivité industrielle, et à réaliser des bénéfices non plus seulement en vendant des machines mais en facturant leur utilisation (OFweek, 2015).

Les données massives

Le développement de l'utilisation des technologies numériques entraîne l'augmentation des volumes de données. En fait, dans le secteur des plateformes en tant que services, l'analyse des données massives est le service le plus utilisé par les industries chinoises (China Academy of Information and Communication Technology, 2015b). L'année 2014 est considérée comme celle de l'émergence du marché des données massives industrielles en Chine (China Academy of Information and Communication Technology, 2015a).

Dans le secteur manufacturier, plus de 75 % des applications des données massives ont pour but d'établir des liens plus étroits avec les clients, principalement en les attirant et en améliorant leur expérience. Dans 10 % des cas seulement, l'objectif est d'assurer le suivi des produits ou d'analyser le fonctionnement des équipements (Minglamp Consulting, 2015). Ces pourcentages correspondent à la tendance générale de l'utilisation des données massives en Chine, où ces données sont générées principalement au sein des entreprises et analysées selon des procédures traditionnelles, puis utilisées à des fins de marketing sur le web ou pour améliorer les produits et services existants (China Academy of Telecommunication Research, 2014a).

Grâce aux données massives, Motorola Mobility peut prédire les préférences des clients concernant la couleur et les matériaux des téléphones portables, et préparer la production en conséquence. L'entreprise a mis au point *Moto Maker*, qui permet aux clients de faire des choix pour leurs portables parmi plus de 2 000 combinaisons. Le groupe Haier, principal fabricant chinois d'électroménagers et de produits électroniques grand public, travaille également avec le groupe Alibaba, qui possède la plus grande plateforme de vente en ligne en Chine : il utilise ainsi les données recueillies par Alibaba sur les préférences des clients pour offrir des produits finaux personnalisés.

Les fabricants chinois jouent par ailleurs un rôle important en fournissant l'infrastructure des technologies numériques. En Chine, les serveurs informatiques sont fabriqués en majorité par des entreprises nationales, et les quatre principaux acteurs du marché (Inspur Electronics, Lenovo, Huawei et Sugon) ont vu leurs recettes globales augmenter de 19.5 % par an du fait de la robustesse du marché intérieur (IDC, 2016).

Les technologies numériques ont ouvert le secteur manufacturier aux entreprises de l'internet chinoises

Les entreprises de l'internet chinoises ne se contentent pas de dominer le marché intérieur de l'informatique en nuage (encadré 12.1), de l'IdO et des données massives, mais exercent également leur influence sur les industries traditionnelles comme la fabrication. Pour citer un exemple, la société Baidu Inc., qui a créé le plus important moteur de recherche internet de Chine, a mis au point début 2015 un système de plateforme croisée – *CarLife* –, qui établit un lien entre son service de cartographie en ligne, les constructeurs automobiles et les clients. L'entreprise a également, en décembre 2016, achevé les essais d'un système de mobilité sans chauffeur qui a atteint une vitesse maximale de 100 km/heure (Baidu, 2015).

Après avoir investi 6 milliards CNY (944 millions USD) dans son activité AliCloud, le groupe Alibaba projette une transition ambitieuse, à savoir passer des technologies de l'information aux technologies de données (AliResearch, 2015). Forte de ses énormes réserves de données, l'entreprise ambitionne de mettre en œuvre des applications interprofessionnelles dans des domaines variés (robotique, IdO, biotechnologie, financement et infrastructure). Dans le cadre de ce projet, elle organise désormais une conférence annuelle sur l'informatique dans la ville de Hangzhou. D'autre part, l'équipe principale de développement des gammes de véhicules électriques i3 et i8 de BMW a rejoint en avril 2016 Future Mobility Corp, une start-up chinoise financée par Tencent Holdings, autre grande entreprise chinoise de l'internet (Boston, 2016).

Encadré 12.1. **L'informatique en nuage et le Nouvel an chinois**

Depuis quelques années, à l'approche du Nouvel an chinois, de nombreux Chinois utilisent l'informatique en nuage lors de trois grands événements : pour effectuer des achats en ligne lors du « double 11 » ; pour acheter des billets de train pour la fête du printemps sur le site www.12306.cn ; enfin, pour offrir de l'argent (*hongbao*) sur les réseaux sociaux à la veille du Nouvel an lunaire. Comme on le voit ci-dessous, ces trois exemples montrent comment la taille du marché chinois a dynamisé et façonné l'utilisation de l'informatique en nuage, et comment l'informatique en nuage a elle-même entraîné la création d'un marché.

Pour les jeunes Chinois, le 11 novembre est la Journée des célibataires, c'est-à-dire le jour où les jeunes sans partenaires fêtent leur célibat. Le 11 novembre 2009, l'entreprise Alibaba a lancé une opération promotionnelle en ligne qui lui a rapporté 52 millions CNY. En 2013, les ventes d'Alibaba le 11 novembre ont atteint un niveau deux fois plus élevé que les ventes en ligne effectuées aux États-Unis lors du *Black Friday* et du *Cyber Monday* cumulés (Yan, 2014). Depuis 2015, une structure infonuagique hybride est utilisée : les systèmes de vente et de paiement sont hébergés sur le nuage public, alors que les autres activités sont hébergées sur le nuage privé. Ce système a permis au site de faire face à l'afflux de visites pendant une courte période sans avoir à se doter de serveurs supplémentaires. En 2016, l'entreprise Alibaba a enregistré à elle seule 120.7 milliards CNY de ventes. Son site web a traité 120 000 transactions par seconde au plus fort des visites, et plus de 1 milliard de transactions en un seul jour (Xinhua, 2016).

S'il n'est pas facile de trouver à l'occasion du « double 11 » des articles en édition limitée vendus à moitié prix, il l'est encore moins de se procurer un billet de train pour rentrer chez soi à l'occasion de la fête du printemps. Le site officiel chinois de vente de billets de train – www.12306.cn – a mal résisté lors de son ouverture en 2012, puisqu'un afflux inattendu de 1.4 milliard de demandes en un seul jour a provoqué son effondrement (Caijing, 2012). La difficulté à gérer la vente de ces billets de train est due non seulement au fait que le site est consulté simultanément par d'innombrables visiteurs, mais aussi à la complexité intrinsèque des billets. Dans le cadre de la vente en ligne, le calcul du nombre d'articles disponibles peut se faire en retranchant des stocks le nombre d'articles vendus ; cela n'est en revanche pas possible dans le cas des billets de train. Prenons l'exemple d'un voyage comprenant des arrêts de A to E. Lorsqu'une personne achète un billet pour aller de B à D, cela modifie la disponibilité des billets pour l'ensemble des trajets qui le recoupent partiellement (par exemple entre A et C). Il faut également tenir compte des différents types de sièges et coordonner les ventes avec celles réalisées hors ligne. Le site [12306.cn](http://www.12306.cn) a commencé à utiliser l'informatique en nuage en 2014 et collabore avec Alibaba depuis 2015. Le nuage traite plus de 75 % des demandes de billets et a permis d'éviter d'importants blocages du site (Li X., 2016). Ce dernier a fait l'objet lors de la fête du printemps 2015 d'un nombre record de visites (29.7 milliards par jour) et a enregistré en 2016 une hausse d'efficacité de 30 %, avec seulement 1.8 seconde d'attente en ligne (Nandu Daily, 2015).

Encadré 12.1. **L'informatique en nuage et le Nouvel an chinois** (suite)

Lorsque les Chinois rentrent chez eux pour la fête du printemps – après avoir acheté des billets de train sur le site 12306.cn et des cadeaux pour le « double 11 » –, il est probable qu'ils vont aussi préparer le *hongbao* pour la famille. Traditionnellement, le *hongbao* est une somme d'argent placée dans une enveloppe rouge, qui est offerte et reçue avec une révérence et un cérémonial. Aujourd'hui, le *hongbao* est également disponible sous la forme d'une application. En 2015, WeChat – l'application de messagerie la plus répandue en Chine, conçue par Tencent – a collaboré avec China Central TV (CCTV) pour organiser la fête du Nouvel an lunaire la plus regardée, au cours de laquelle les organisateurs demandaient à certains moments aux membres du public de secouer leurs téléphones portables pour recevoir un *hongbao*. Plus de 1 milliard de *hongbao* ont ainsi été envoyés et reçus. Une application d'une telle ampleur ne serait pas possible sans l'informatique en nuage, qui permet de gérer un afflux massif d'utilisateurs et d'assurer la sécurité des échanges financiers (Teng, 2016). Ces évolutions ont permis au citoyen ordinaire de se familiariser davantage avec les technologies. Un récent sondage a révélé que 75 % des utilisateurs de moyens de paiement mobiles en Chine utilisent quotidiennement ces mêmes modes de paiement dans les magasins traditionnels (Alvin Wu, 2016).

Le cadre d'action concernant les technologies numériques

Pour encourager le développement des technologies numériques et leur utilisation dans l'industrie, il est suggéré aux pouvoirs publics dans le chapitre 2 (qui traite des technologies numériques et de la production) d'élaborer des cadres de gouvernance des données cohérents et de promouvoir des normes ouvertes ainsi qu'un usage responsable des données personnelles. Les pouvoirs publics sont également encouragés à mettre en place un ensemble de mesures en faveur de l'innovation, afin de stimuler les investissements dans les données (collecte, curation et réutilisation) et de développer la R-D dans des domaines comme l'analyse de données massives, l'infonuagique et l'informatique à haut rendement, l'internet des objets ainsi que les technologies de renforcement de la sécurité et de la protection de la vie privée. Les obstacles à la réutilisation, au partage des données, à la concurrence sur le marché et à l'adoption des TIC doivent être passés en revue et, le cas échéant, éliminés. Des mesures agissant sur la demande peuvent être envisagées pour encourager l'adoption des principales TIC génériques, en particulier par les petites et moyennes entreprises (PME). Le développement d'une culture de la gestion du risque numérique est également conseillé, de même que l'amélioration des compétences en matière de TIC, notamment en collaboration avec les entreprises.

Les mesures relatives aux données récemment examinées en Chine concernent surtout les données massives

Le plan d'action pour la promotion du développement des données massives, rendu public par le Conseil des Affaires d'État en août 2015, a recensé trois grands axes d'action pour développer les données massives en Chine : un accès ouvert et une meilleure gouvernance des données publiques ; des modèles économiques innovants au sein des secteurs et entre eux ; la sécurité des données. La Chine a mis sur pied dix projets importants concernant notamment le partage des données entre les ministères ou l'utilisation des données intersectorielles (dans la fabrication, les services et l'agriculture).

Dans son 13^e plan quinquennal, rendu public en mars 2016, la Chine considère les données massives comme une ressource stratégique et formule à leur sujet une stratégie

nationale axée principalement sur l'accès ouvert aux données publiques, la R-D et l'application des technologies ayant trait aux données massives. Un mécanisme interministériel aura pour tâche de coordonner différents organismes publics. Placé sous la direction du ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, de la Commission d'État pour le développement et la réforme, ainsi que de l'Administration chinoise du cyberspace, ce mécanisme met l'accent sur l'échange de données entre les organes gouvernementaux, l'innovation industrielle, les formats de données et les normes qui s'y rattachent.

Un système de normalisation des données est en cours de développement. Il recouvre la collecte, le classement, l'échange, le formatage, la vente et la sécurité des données. Des projets de démonstration seront mis sur pied pour évaluer les normes et les échanges de données (l'approche adoptée est celle d'une libéralisation descendante des données publiques, et non d'un accès ascendant non discriminatoire)

Les initiatives *Made in China 2025* et « Internet Plus » qui seront décrites plus avant dans le présent chapitre ont pour but de mettre en place un cyberspace industriel et de créer des flux de données plus ouverts et mieux synchronisés entre les différentes étapes de la fabrication.

De nombreuses provinces (comme Pékin, Shanghai, Zhejiang, Guangdong et Guizhou) ont rendu publics des plans visant à promouvoir les données massives. Guizhou, notamment, a émis la première réglementation régionale chinoise sur les données massives, qui énonce les principales mesures à mettre en œuvre pour garantir l'utilisation, le partage et la sécurité des données massives. En 2015, le projet *Global Big Data Exchange* a été mis sur pied dans la ville de Guiyang – capitale de la province de Guizhou – dans le but de promouvoir les flux et les échanges de données. Ces données ont trait à des domaines comme les finances, l'éducation, l'énergie et la logistique. Des échanges similaires sont en train d'être mis en place à Pékin, Shanghai et d'autres villes chinoises.

De grands projets nationaux de recherche sur les TIC ont été lancés et l'adoption des technologies est encouragée

Dans son programme national de R-D sur les technologies essentielles – datant de 2016 –, l'administration centrale chinoise a alloué une enveloppe d'environ 58 millions USD pour l'informatique en nuage et les données massives, dont 46 millions pour le calcul hautes performances. Un fonds pour le développement de l'IdO a en outre été constitué en 2011 par le ministère des Finances et le ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, avec un budget initial de pas moins de 75 millions USD par an. Après l'émission en 2013 des avis du Conseil des Affaires d'État concernant la promotion du développement coordonné de l'IdO, un plan d'action a été élaboré entre plusieurs ministères. Ce plan détaille la stratégie nationale, les normes, les applications, les modèles économiques, les dispositions relatives à la sécurité, ainsi que la législation et la réglementation applicables, et les besoins en ressources humaines.

L'intégration de l'industrialisation et de l'informatisation est une initiative de premier plan lancée en 2007. Des fonds publics ont favorisé l'application de la conception et du contrôle numérique dans des secteurs traditionnels comme l'acier, la construction navale, le textile et l'exploitation minière. Une norme nationale applicable aux systèmes de gestion (GB/T23000-23999), en cours d'élaboration, permettra de guider les entreprises qui cherchent à utiliser davantage les TIC.

En ouvrant certains marchés au secteur privé, le gouvernement chinois souhaitait éliminer les obstacles à l'adoption des TIC, comme par exemple le niveau élevé des prix et

l'absence de concurrence. Depuis 2013, les opérateurs de réseaux mobiles ont accès à des marchés autrefois réservés aux entreprises publiques. Depuis 2015, le service haut débit est également ouvert au secteur privé. La réglementation concernant la création d'entreprise a été simplifiée (notamment avec la réduction du nombre d'autorisations requises), et des dispositifs ont été mis en place pour faciliter le financement des activités et des nouveaux services basés sur l'internet (par exemple, services de transport à la demande).

Les politiques publiques visent à élargir l'accès à l'internet, à accroître le débit, à développer l'internet industriel et à encourager la création de start-ups en rapport avec l'internet

L'objectif de la Stratégie nationale en matière d'information (2006-20) est de mettre en place d'ici à 2020 une infrastructure nationale d'information desservant la majorité de la population. En 2013, l'initiative *Broadband China* visait à fournir un accès au haut débit à 70 % des familles et au haut débit mobile à 85 % des ménages à l'horizon 2020. Le Conseil des Affaires d'État a par ailleurs émis en 2015 des avis d'orientation sur le débit et les tarifs de l'internet. Ces avis recommandaient l'accroissement sans frais du débit minimal (jusqu'à 4 Mégabits par seconde), ainsi que la baisse des tarifs de l'internet mobile.

Le cadre stratégique national publié en juillet 2016 concernant les technologies de l'information fixe les objectifs suivants pour 2025 : accès au très haut débit (fibre) dans les zones rurales, couverture du réseau 4G sur l'ensemble du pays et de la bande passante internationale de 48 Térabits par seconde. En juin 2016, 710 millions de personnes avaient accès à l'internet, dont 92.5 % à l'internet mobile. Un grand écart subsiste néanmoins entre les zones urbaines et rurales (les premières sont couvertes à 67.3 %, et les secondes à 31.7 %).

Le gouvernement cherche comment assurer la cybersécurité

En novembre 2016, la première loi chinoise sur la cybersécurité nationale a été approuvée par le Comité permanent de l'Assemblée populaire nationale. Cette loi prévoit des réglementations sur la cybersouveraineté, les responsabilités des fournisseurs de cyberservices et des opérateurs de réseaux, la protection des informations personnelles et des infrastructures, et la transmission transfrontalière des données. Il n'existe en Chine aucune loi nationale consacrée spécialement à la protection de la vie privée.

Le second dialogue conjoint de haut niveau sur la cybercriminalité entre les États-Unis et la Chine s'est tenu en juin 2016 à Pékin. Des dispositions ont été prises concernant l'échange d'informations, la coopération en matière judiciaire et la protection du réseau. Près de 31 millions USD ont été affectés à la sécurité du cyberspace dans le programme national de R-D sur les technologies essentielles de 2016.

Des mesures sont prises pour développer les compétences numériques

En 2000, le ministère de l'Éducation a émis des lignes directrices concernant l'enseignement des TIC dans les établissements primaires et secondaires. Les cours sur les TIC sont obligatoires depuis 2005 dans tous les établissements du secondaire, ainsi que dans les écoles primaires dans les régions plus développées. En 2013, le ministère a lancé un projet national de formation visant à accroître les compétences en matière de TIC des enseignants des écoles primaires et secondaires (y compris les maternelles). L'objectif est de couvrir 10 millions d'établissements scolaires à la fin 2017. Cela fait partie du plan décennal chinois sur les technologies de l'information dans l'éducation (2011-20). Le ministère de l'Éducation

est en train d'élaborer des lignes directrices sur l'enseignement de la robotique dans les établissements scolaires du primaire et du secondaire.

Des cours sur l'utilisation des TIC vont être institués dans l'enseignement supérieur et la formation professionnelle. Le plan d'action pour la promotion du développement des données massives encourage les établissements à établir des programmes sur la science et l'ingénierie des données.

La robotique industrielle

En Chine, l'utilisation de la robotique – en particulier des robots industriels – est une réponse directe au manque de main d'œuvre et à la demande de produits de haute qualité. Au cours de la période 2008-13, l'offre de robots industriels s'est accrue dans le pays d'environ 36 % par an en moyenne. La Chine était le plus grand marché mondial de ce type de robots en 2013 et 2014, et devrait, d'ici 2017, en compter pas moins de 428 000 unités, soit plus que n'importe quel pays au monde (International Federation of Robotics, 2015). Parmi les 56 000 robots industriels vendus en Chine en 2014, 16 000 provenaient de fabricants chinois, et le reste d'entreprises étrangères comme ABB, Kuka, Yaskawa et FANUC (Reuters, 2015). Dans le domaine de la R-D, la Chine figurait dans le classement des cinq pays ayant déposé le plus de brevets sur la robotique pendant la période 2005-11 (Organisation mondiale de la propriété intellectuelle, 2015). Les technologies connexes (comme l'intelligence artificielle) se développent elles aussi rapidement (encadré 12.2).

Encadré 12.2. Création de nouveaux matériels pour l'intelligence artificielle

Dans le domaine de l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique a suscité des demandes énormes – et spécifiques – en termes de puissance de calcul et d'efficacité. La gamme de matériels *DianNao* (qui signifie « ordinateur ») et la puce Cambricon-1A sont parmi les derniers en date à saisir cette occasion unique qui pourrait apporter beaucoup.

L'apprentissage automatique est déjà très répandu, dans des applications comme la reconnaissance vocale de Google Assistant et Siri, la reconnaissance faciale dans les applications visuelles, ou encore la conduite sans chauffeur. À l'heure actuelle, les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) et les réseaux d'apprentissage profond (DNN) font partie des algorithmes d'apprentissage les plus sophistiqués et les plus utilisés, mais tous deux nécessitent une grande puissance de calcul et beaucoup de mémoire. Habituellement, ces algorithmes sont associés à des processeurs génériques (unité centrale et processeur graphique) qui, souvent, ne sont pas les options les plus performantes, ces processeurs n'étant pas conçus pour ce type de tâche (Keutzer, 2016). Ainsi, pour apprendre à un DNN à reconnaître une tête de chat, il a fallu à une équipe de chercheurs de Google 1 000 machines, 16 000 processeurs et 3 jours (Le et al., 2012). On voit donc que les applications d'apprentissage automatique deviennent des acteurs incontournables du calcul hautes performances (Chen et al., 2014).

Le projet *DianNao* a vu le jour dans ce contexte. Il s'agissait au départ d'une collaboration internationale entre le State Key Laboratory of Computer Architecture chinois et l'Institut français de recherche en informatique et en automatique. Leurs chercheurs ont conçu la gamme matérielle *DianNao*, un ensemble d'accélérateurs pensés spécialement pour l'apprentissage automatique. Un système *DaDianNao* (c'est-à-dire un ordinateur de grande taille doté d'une architecture à plusieurs puces *DianNao*) peut fonctionner 450.6 fois plus vite qu'un processeur graphique, et consommer 150.3 fois moins d'énergie en moyenne (Chen et al., 2016). Ce projet de recherche a reçu deux *Best Paper Awards* dans le domaine du matériel informatique (ASPLOS 2014 et MICRO 2014).

Encadré 12.2. **Création de nouveaux matériels pour l'intelligence artificielle** (suite)

Partant de ces travaux, les chercheurs chinois ont ensuite développé Cambricon, une architecture de jeux d'instructions polyvalente destinée aux réseaux neuronaux, conçue au départ par essaimage sous le même nom. La puce Cambricon-1A a ensuite été mise au point, présentée comme la première à être conçue pour les applications des réseaux neuronaux hautes performances (Gu, 2016). Cette puce a été sélectionnée comme l'une des 15 plus grandes réalisations scientifiques et technologiques de l'internet lors de la 3^e Conférence mondiale sur l'internet (CCTV, 2016).

Malgré l'accroissement rapide de l'utilisation de robots industriels, la densité robotique en Chine était de 36 unités pour 100 000 salariés en 2014, soit moins que la moyenne mondiale de 66 unités. Dans l'industrie automobile, la densité était de 305, alors qu'elle était supérieure à 1 000 dans les pays ayant une industrie automobile de premier plan (comme le Japon, l'Allemagne, les États-Unis et la Corée) (International Federation of Robotics, 2016).

Si les robots industriels sont devenus une composante fondamentale de l'industrie automobile, leur utilisation dans le secteur de l'électronique est également en progression. Depuis 2010, Hon Hai Precision Industry – une célèbre entreprise chinoise qui fabrique des iPhones pour Apple – utilise des robots conçus en interne dans son usine de Kunshan, située dans le delta du Yangzi. L'entreprise a réduit les effectifs de son usine de 110 000 à 50 000 travailleurs, tandis que ses recettes auraient augmenté (Zhu, 2015). Son objectif est d'atteindre une automatisation de 30 % dans ses usines chinoises à l'horizon 2020. De même qu'Alibaba, Hon Hai détient 20 % du capital de la société japonaise SoftBank Robotics Corp. Depuis juin 2015, celle-ci fabrique et vend Pepper, un robot capable de comprendre certaines émotions humaines (Inagaki, 2015).

Le marché des robots industriels est approvisionné en majorité par des fabricants étrangers, mais la progression rapide de ces robots et leur utilisation en Chine ont conduit les entreprises nationales à fabriquer leurs propres robots. Les ventes de robots chinois ont ainsi bondi de 77 % entre 2013 et 2014 (Shen, 2015).

L'entreprise SIASUN Robot & Automation, affiliée à l'Académie des sciences chinoise, occupe une place dominante dans le secteur chinois de la robotique. Les trois quarts des 1 600 salariés de l'entreprise travailleraient dans la R-D, et 200 personnes seulement seraient affectées à la chaîne d'assemblage (Liu, 2015). Une usine intelligente numérique a été mise en place en 2014. Elle utilise des robots pour fabriquer des robots, et met à profit les capacités internes de l'entreprise en matière de robotique pour ses activités de logistique, d'assemblage et de contrôle qualité ; sa capacité de production est de 5 000 robots industriels par an (He, 2015).

Les entreprises manufacturières chinoises qui souhaitent accéder au marché des robots industriels mais qui n'ont pas d'expérience en la matière ont recours aux acquisitions. En mai 2016, par exemple, le fabricant chinois d'électroménagers Midea a présenté une offre de 4.5 milliards EUR pour racheter Kuka, une entreprise allemande leader dans le domaine de la robotique. Midea a annoncé en août qu'elle avait présenté une offre pour 81 % du capital de Kuka (Thompson, 2016). La transaction est aujourd'hui en cours d'approbation par les instances réglementaires.

Le cadre d'action concernant la robotique

Dans son plan national de développement de la robotique (2016-20), l'administration chinoise insiste sur la nécessité de mettre en place un système de robotique capable de fabriquer des robots industriels ayant des spécifications techniques et des atouts similaires à ceux des concurrents internationaux, et fixe pour objectif que les entreprises chinoises représentent d'ici à 2020 45 % du marché des robots haut de gamme (ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, 2015d). Hormis les robots industriels, le gouvernement souhaite également faciliter la production en série et l'utilisation de robots de service pour les personnes âgées et les soins de santé.

Une feuille de route technologique a été établie pour assurer le suivi de la mise en œuvre de *Made in China 2025*. Elle répertorie les technologies et composants nécessaires pour mettre au point des robots industriels et de service, et propose d'améliorer la coordination, au niveau national, entre la recherche, la mise en application, la normalisation, le contrôle qualité et la certification. En novembre 2016, la Chine a annoncé la mise en place d'une certification pour les robots et a délivré les premiers certificats à une vingtaine de fabricants environ.

Certaines régions de Chine ayant une longue tradition de fabrication de produits mécaniques et électriques – notamment le delta du Yangzi et le delta de la Rivière des Perles – ont lancé de vastes programmes de « remplacement des humains par des robots ». Ainsi, entre 2015 et 2017, la province de Guangdong s'est fixé pour objectif de promouvoir ce programme auprès de plus de 1 950 entreprises ayant un chiffre d'affaires annuel de 20 millions CNY au moins (3.1 millions USD) (Gouvernement du Guangdong, 2015).

L'impression 3D

L'impression 3D – plus communément appelée « fabrication additive » en Chine – est une autre technologie considérée par le Conseil des Affaires d'État comme essentielle pour la modernisation du secteur manufacturier.

L'impression 3D se développe rapidement en Chine. Entre 1988 et 2014, 79 602 imprimantes 3D industrielles ont été installées dans le monde. Durant cette période, la Chine se classait au troisième rang sur le marché mondial des imprimantes 3D (coûtant au minimum 5 000 USD) – avec 9.2 % de l'ensemble des unités en utilisation – derrière les États-Unis (38.1 %) et le Japon (9.3 %) (Parker, 2015). Entre 2013 et 2014, le marché chinois des imprimantes 3D est passé de 2 milliards CNY (315 millions USD) à 3.7 milliards CNY (582 millions USD) (Huang, 2015), et devrait atteindre 10 milliards CNY (1.6 milliards USD) d'ici à 2016, selon l'Alliance chinoise de l'industrie des technologies d'impression 3D. En avril 2015, la Chine arrivait à la troisième place pour le nombre de brevets sur l'impression 3D déposés dans le monde, derrière les États-Unis et le Japon (Feng F., 2015). En Chine, l'impression 3D industrielle est utilisée par exemple dans le secteur aéronautique et spatial, la biomédecine et l'industrie automobile.

La COMAC (Commercial Aircraft Corporation of China) a utilisé l'impression 3D pour fabriquer l'avion régional ARJ 21 ; elle prévoit de l'utiliser également pour le C919, premier avion commercial chinois conçu sur le territoire national. Grâce à cette technologie, la fabrication des cadres des hublots du cockpit du C919 – de forme hyperboloïde – prendra environ 55 jours et coûtera moins de 200 000 USD l'unité, contre deux ans et 2 millions USD avec un mode de fabrication traditionnel (Ren, 2014).

Annoncée en septembre 2015 et approuvée par l'Administration nationale de l'alimentation et du médicament, la première prothèse de hanche chinoise imprimée en

3D a été mise à la disposition des patients. Le coût de cette prothèse hautement personnalisable varie de la moitié au tiers de celui des prothèses qui étaient auparavant importées (Xinhua, 2015).

S'agissant des produits de consommation, l'impression 3D est de plus en plus utilisée dans le secteur de la bijouterie et pour des applications personnalisées, par exemple pour la réalisation de portraits et de jouets. La moitié environ des bijoutiers de la ville de Guangzhou utilisent cette technologie pour concevoir des bijoux (Cui et Liu, 2015). Un centre d'impression 3D qui a ouvert en juillet 2015 dans la ville de Foshan (province de Guangdong) revendique le plus haut niveau de précision dans le monde. Ce centre, qui est le plus grand de ce type en Chine, utilise jusqu'à un millier d'imprimantes *Stratasys Solidscape* et s'est fixé pour objectif d'approvisionner, entre autres, le secteur chinois de la bijouterie (China South Daily, 2015).

Cela dit, à l'heure actuelle, la plupart des imprimantes 3D utilisées en Chine le sont dans des secteurs comme la recherche, l'éducation, l'aéronautique et le design, qui privilégient les applications de R-D, en particulier la fabrication de prototypes (Min, 2015). Du fait de l'absence de normalisation concernant la qualité des objets imprimés en 3D, du prix élevé des matériaux de base des imprimantes, et de la demande limitée du marché pour une production ajustable et personnalisée, l'impression 3D met du temps à passer d'une technologie de grande précision utilisée pour une production à faible échelle centrée sur le design à une production à l'échelle industrielle.

Les entreprises manufacturières chinoises qui utilisent l'impression 3D bénéficient généralement de financements de la part de grandes universités et d'instituts de recherche chinois, ou sont issues de ces structures. Ainsi, dans le domaine de l'impression 3D industrielle, la société Shaanxi Hengtong Intelligent Machines, qui héberge également le premier centre de recherche en ingénierie pour le prototypage rapide, a été créée à l'origine à l'université de Xi'an Jiaotong. De même, Wuhan Binhu Mechanical & Electrical, qui a fabriqué la première imprimante 3D chinoise avec des droits de propriété intellectuelle indépendants, est une création de l'Université des sciences et technologies de Huazhong.

Les applications bureautiques de l'impression 3D sont elles aussi en plein essor en Chine. Tiertime, qui était à l'origine une start-up créée à l'Université de Tsinghua, est aujourd'hui le premier fabricant d'imprimantes 3D en Asie, et 70 % de ses ventes sont réalisées à l'étranger (Li H., 2015). De même, l'entreprise AOD 3D Printing a été fondée par le titulaire d'un doctorat de l'Université de Tsinghua, et a reçu des financements de l'incubateur X-lab de ladite université. La société a collecté presque 5 millions CNY (787 000 USD) en l'espace de 24 heures en faisant appel au financement participatif sur WeChat, qui est l'application de messagerie instantanée la plus populaire en Chine (X-lab, 2014). Le principal produit de l'entreprise, l'imprimante 3D AOD Artist – conçue pour les artistes et les designers –, est vendu en ligne sur le site JD.com, l'une des plus grandes plateformes de vente en ligne chinoises.

Le cadre d'action concernant l'impression 3D

Dans le chapitre 5, consacré à l'impression 3D et ses impacts environnementaux, il est suggéré que pour améliorer la durabilité de cette activité, les pouvoirs publics devraient surtout encourager l'utilisation de procédés d'impression peu gourmands en énergie, ainsi que de matériaux ayant une faible empreinte environnementale (comme les biomatériaux compostables) et présentant des caractéristiques de fin de vie intéressantes. Les obstacles liés à la propriété intellectuelle pour des applications potentielles de l'impression 3D devront

peut-être également être supprimés, par exemple pour la fabrication de pièces de rechange pour des produits obsolètes pour lesquels il n'existe pas de chaîne d'approvisionnement.

Un plan national de promotion de la fabrication additive (2015-16) a été rendu public en 2015. Les axes de recherche préconisés sont notamment les produits de base (métalliques, non métalliques et matériaux spécifiques pour les usages médicaux), les techniques de production (fusion et processus chimiques) et les principaux instruments utilisés (dispositifs de fusion et d'alimentation, têtes d'impression haute précision). Le plan préconise également la création d'un système industriel standard et la mise sur pied de projets de démonstration. Les secteurs industriels ciblés à des fins d'application et de commercialisation sont notamment l'aérospatial et l'aéronautique, la construction des moteurs automobiles, le prototypage industriel et les équipements médicaux haute précision.

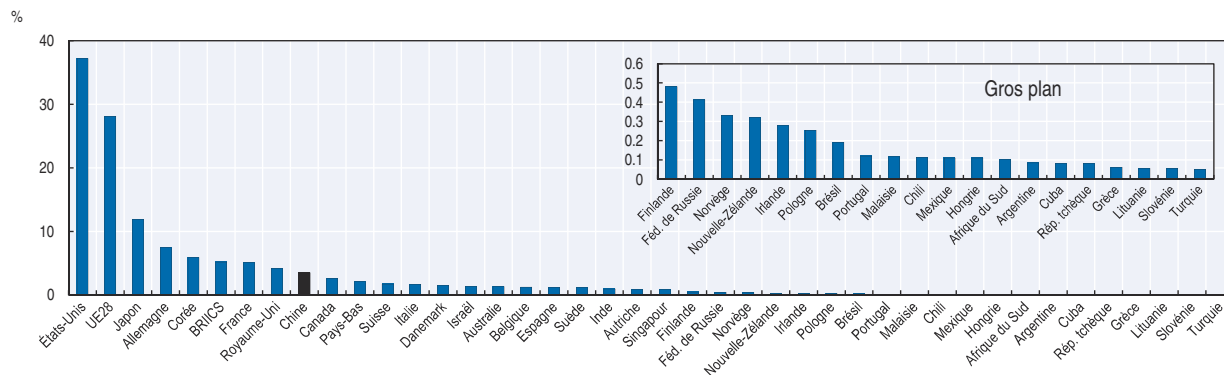
En 2016 a été lancé un projet de recherche national consacré à la fabrication additive et à la fabrication au laser, et doté d'un budget de 400 millions CNY. Parmi les sept priorités du projet, cinq ont trait à la commercialisation et sont confiées aux entreprises. Un comité de normalisation technologique et une alliance des industries de la fabrication additive ont également été créés en 2016. Un projet financé par l'Académie des sciences sociales de Chine avait en outre été mis sur pied en 2014 pour étudier le développement de l'impression 3D et les modifications qu'il pourrait s'avérer nécessaire d'apporter au régime de propriété intellectuelle.

Au niveau régional, des certifications volontaires ont été instaurées pour la fabrication additive (par exemple par le Centre d'inspection et de contrôle des produits issus de la fabrication additive de la province de Jiangsu). Ces certifications tiennent davantage compte de la qualité que de la durabilité.

La biotechnologie


La biotechnologie est citée dans les Lignes directrices du programme national pour le développement des sciences et technologies à moyen et long termes (2006-20) comme l'une des huit technologies « d'avant-garde ». De 2010 à 2013, la Chine se classait au septième rang mondial pour le pourcentage de brevets relatifs aux biotechnologies (graphique 12.5) (OCDE, 2015b). En Chine, la production bioindustrielle atteignait 3 160 milliards CNY (497 milliards USD)

Graphique 12.5. Part des pays dans les brevets relatifs aux biotechnologies, 2010-13



Note : Ces données font référence aux familles de brevets déposées auprès des cinq plus grands offices de propriété intellectuelle (IP5), dont les membres ont effectué les demandes auprès de l'Office européen des brevets (OEB) ou de l'US Patent Office aux États-Unis (USPTO), en tenant compte de la première date de dépôt et du pays de résidence du demandeur selon un comptage fractionnaire. BRIICS = Brésil, Fédération de Russie, Inde, Indonésie, Chine et Afrique du Sud. Les données de 2013 sont des estimations.

Source : OCDE (2016b), base de données STI Micro-data Lab: Intellectual Property, <http://oe.cd/ipstats> (consultée en octobre 2016).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679963>

en 2014, soit l'équivalent de 4.6 % du PIB (Fu et Feng, 2015). Dans le cadre de l'initiative *Made in China 2025*, les biomédicaments et les biomatériaux sont considérés comme des composantes à part entière de la fabrication de pointe.

La production de biomédicaments est l'activité dominante de la bioindustrie chinoise

En 2009, la production de biomédicaments se montait à 1 040 milliards CNY (environ 164 milliards USD) (la production globale de la bioindustrie s'élevait cette année-là à 1 400 milliards CNY) (ministère de la Science et de la Technologie, 2011). Entre 2013 et 2015, l'administration chinoise s'est fixé trois grands objectifs : développer et industrialiser la biomédecine ; améliorer la qualité de la médecine allopathique ; normaliser la médecine traditionnelle chinoise (Conseil des Affaires d'État, 2013).

Le gouvernement a renforcé les normes de fabrication des médicaments tout en prenant des mesures pour attirer les talents et encourager les progrès dans le domaine pharmaceutique. Les entreprises chinoises s'efforcent de rattraper leur retard dans le domaine de la biomédecine, tant sur le plan de la fabrication que du développement des produits. Les entrepreneurs ayant acquis une formation et une expérience à l'étranger jouent un rôle très important. Pour citer un exemple, la société WuXi AppTec, créée par un Chinois ayant vécu à l'étranger, occupe une place de premier plan dans la recherche contractuelle et la fabrication de produits pharmaceutiques. Elle fabrique le composant IMP321 (pour le laboratoire pharmaceutique français Immutep), qui est utilisé pour le traitement biologique des cancers à un stade avancé. Comme l'a déclaré le directeur général d'Immutep, Frederic Triebel : « Il y a cinq ans, personne n'aurait envisagé d'aller produire en Chine. Mais aujourd'hui, il est admis que c'est là qu'il faut aller. » (Deng, 2014). AppTec fabrique également l'Ibalizumab, une substance biologique permettant de lutter contre le virus HIV, pour le compte du laboratoire chinois TaiMed Biologics, dont le siège est à Taipei. L'Ibalizumab a été désigné en 2015 « thérapie d'avant-garde » par la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis (Chizkov et Million, 2015). Selon la société AppTec, si l'Ibalizumab est approuvé par la FDA, ce sera le premier biomédicament fabriqué en Chine à être commercialisé aux États-Unis.

En décembre 2014, Chidamide, un médicament chimique mis au point par Chipscreen Ltd., a été approuvé par l'Administration nationale de l'alimentation et du médicament pour le traitement du lymphome T périphérique. Le Chidamide est considéré comme le premier médicament entièrement développé en Chine, et a été cité comme un exemple de l'évolution de l'industrie pharmaceutique chinoise de la copie à l'innovation (Peng, Feng et Bai, 2015). Lu Xianping, cofondateur de l'entreprise et ancien expatrié, estime que les coûts de recherche-développement du Chidamide se sont élevés à quelque 70 millions USD, soit un dixième environ de la somme qui aurait été nécessaire aux États-Unis (Wang S., 2015).

Le génie biomédical en Chine

Développée conjointement par China Regenerative Medicine International (CRMI) et le Tissue Engineering R&D Centre de la quatrième université médicale militaire, Acornea est une cornée issue des biotechnologies, dont la recherche a été financée sur fonds publics (cette cornée a été homologuée en avril 2015 par l'Administration nationale de l'alimentation et du médicament). Aujourd'hui fabriqué à grande échelle, le produit devrait remédier à la grave pénurie de cornées en Chine (Chen, 2015). « Il s'agit de la première cornée artificielle à avoir été créée dans le monde à partir de biotechnologies, à avoir passé avec succès tous les essais cliniques et à avoir obtenu une certification médicale », a indiqué le directeur général de CRMI (Yang Jing, 2015).

L'entreprise BGI, qui est l'un des leaders chinois dans le domaine du séquençage de l'ADN et des tests génétiques, s'est fixé pour objectif de fournir des services de médecine de précision en s'appuyant sur ses connaissances poussées en matière de génomique, de données massives et d'intelligence artificielle. BGI travaille avec des partenaires locaux, notamment Huawei et le National Super Computer Centre, sur les questions du stockage et du traitement des données massives. La société a également créé une plateforme en ligne – GeneBook – qui fournit des tests génétiques prénataux, des diagnostics du cancer du sein et de la démence, ainsi que des évaluations génétiques de la tolérance à l'alcool.

Les prévisions de 2012 établissaient que les ventes de biomatériaux se chiffraient à 750 milliards CNY en 2015 (118 milliards USD), et que ces matériaux joueraient un rôle de plus en plus important en remplaçant les produits issus de la pétrochimie et les technologies de traitement chimique (Conseil des Affaires d'État, 2013). La Chine mène des travaux de recherche sur les polyhydroxyalkanoates (PHA), qu'elle produit également. Ce matériau biosourcé et respectueux de l'environnement est utilisé pour fabriquer des bioplastiques. Le pays est également de plus en plus actif dans les domaines de la fermentation industrielle, des biocarburants et des implants biologiques (Chen et Wang, 2015).

La Chine produit chaque année quelque 700 millions de tonnes de biomasse de paille (ministère de la Science et de la Technologie, 2015a). Des projets pilotes ont été mis sur pied pour produire du sucre industriel et des biocarburants, et des bioraffineries devraient être installées pour développer l'usage de la biomasse de paille. Une bioraffinerie de deuxième génération, dont la capacité de traitement serait comprise entre 970 000 et 1.3 million de tonnes de biomasse de paille par an, est en cours de construction dans la province d'Anhui à l'est du pays, sous le contrôle d'une co-entreprise constituée du groupe chinois Anhui Guozhen et de l'entreprise italienne M&G Chemicals (Voegele, 2014).

La biologie de synthèse – qui permet notamment de fabriquer des matériaux biosourcés – est financée depuis 2011 par le Programme national pour la recherche fondamentale. BluePHA, une start-up de l'Université de Tsinghua, développe actuellement un procédé de fermentation à base d'eau de mer pour produire du PHA à bas coût (Yue, Ling et Yang, 2014). L'une des utilisations envisagées pour le PHA est l'impression 3D.

Le cadre d'action concernant la biotechnologie

Le chapitre 3, consacré à la biotechnologie et à la production de demain, indique que les politiques de soutien à l'innovation dans le domaine des produits chimiques biosourcés devraient favoriser la création de chaînes d'approvisionnement durables pour la bioproduction et tenir compte de la nécessité d'installer des bioraffineries axées sur la démonstration et la commercialisation. Il incombe également souvent aux pouvoirs publics de combler les lacunes en matière de recherche et de formation, d'améliorer le cadre de réglementation, et de jouer un rôle moteur dans la tenue du marché au travers de la passation de marchés publics.

Depuis son 11^e plan quinquennal, la Chine annonçait des mesures et des programmes pour développer sa bioindustrie. Dans son 12^e plan (2011-15), qui accorde des financements pour la recherche fondamentale et le développement des principaux matériaux et produits chimiques biosourcés, elle prévoyait des projets nationaux consacrés à la bioindustrie. Vers la fin 2012, le Conseil des Affaires d'État a publié une stratégie nationale pour la bioindustrie qui, entre autres choses, prévoyait la mise en œuvre de projets de démonstration des matériaux et produits chimiques biosourcés. En 2015, les produits chimiques biosourcés

arrivaient en troisième place des demandes de brevets de la bioindustrie en Chine, après la biomédecine et les appareils biomédicaux.

Selon la réglementation chinoise, la bioproduction doit utiliser des cultures non céréalières. Un plan d'action associé à la stratégie nationale pour la bioindustrie de 2012 prévoyait la mise en place d'un système d'approvisionnement en produits non céréalières qui incluait de cinq à dix zones de production de produits végétaux multiples sur des terres non cultivables, comme par exemple le sorgho sucrier et le manioc. Pour autant, la disponibilité d'un approvisionnement stable et durable de matière de base pour la bioproduction demeure un défi de taille.

Si des projets de démonstration sont en cours, en revanche il n'existe pas en Chine de politique publique concernant les bioraffineries.

En ce qui concerne les ressources humaines, un plan national de développement à moyen et long termes des talents dans les biotechnologies (2010-20) a été lancé en 2011. Son but est de susciter l'émergence de chercheurs et d'équipes de recherche par l'intermédiaire de projets nationaux et d'organismes de recherche tels que les laboratoires et les centres d'ingénierie nationaux. Le plan concerne également l'industrie, et mise sur les parcs de haute technologie nationaux pour lancer des projets de démonstration et accroître le nombre de travailleurs expérimentés. Des programmes nationaux de formation sont par ailleurs prévus pour former les gestionnaires.

Un comité technique chargé de la normalisation des matériaux biosourcés et des produits biodégradables, constitué en 2008, figure dans les Lignes directrices du système normatif de la fabrication verte. D'autres normes nationales sur les matériaux biosourcés sont cependant nécessaires. Au niveau régional, de nombreuses provinces (Jiangsu et Shangdong, par exemple) ont émis des réglementations sur l'économie circulaire (telles que la promotion des produits biosourcés et biodégradables, par exemple en interdisant les sacs en plastique non dégradables).

Les déchets organiques représentent en Chine 11 % des déchets solides industriels, et moins de 10 % d'entre eux ont été recyclés en 2010 (ministère de la Protection de l'environnement, 2012). Un projet national d'utilisation des déchets organiques était prévu dans le 12^e plan quinquennal. L'un de ses objectifs techniques était l'utilisation de 90 % des déchets organiques de l'industrie pour produire du gaz combustible. Des approches similaires ont été adoptées pour les ordures ménagères.

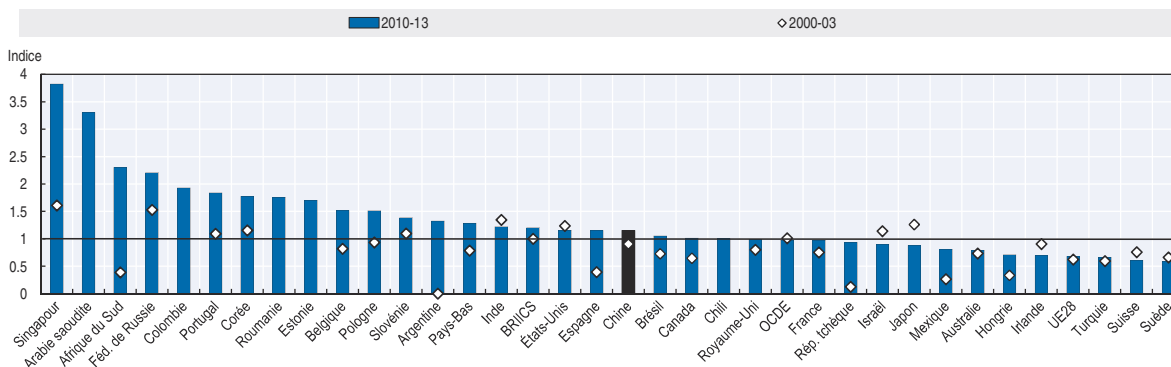
Dans un document du Conseil des Affaires d'État datant de 2009, il était envisagé de favoriser le développement de la bioindustrie via les marchés publics. Cela s'est concrétisé au niveau régional. La ville de Shenzhen a par exemple établi une liste de marchés publics écologiques, et a inclus dans les critères d'évaluation de la qualité des hôtels et des restaurants celui de l'utilisation de matériaux biosourcés et dégradables.

La nanotechnologie

La Chine a commencé à mener des recherches sur les nanotechnologies au milieu des années 80. À la fin de son 11^e plan quinquennal (2006-10), elle se classait au premier rang pour le nombre de publications sur les nanotechnologies figurant dans le *Science Citation Index*, et au deuxième rang pour le nombre total de citations (ministère de la Science et de la Technologie, 2012a). Pendant la période 2010-13, le pays occupait le quatrième rang mondial pour son pourcentage de brevets relatifs aux nanotechnologies, et augmentait son avantage technologique révélé dans le domaine des nanotechnologies (graphique 12.6) (OCDE, 2015b).


Forte de ses progrès dans le domaine de la recherche, la Chine vise désormais à en faire un usage commercial. Des applications industrielles concluantes des nanotechnologies ont ainsi vu le jour, souvent dans le cadre de collaborations entre les instituts de recherche, les universités et l'industrie.

Graphique 12.6. **Avantage technologique révélé dans le domaine des nanotechnologies, 2000-03 et 2010-13**



Note : Ces données font référence aux familles de brevets déposées auprès des cinq plus grands offices de propriété intellectuelle (IP5), dont les membres ont effectué les demandes auprès de l'Office européen des brevets (OEB) ou de l'US Patent Office aux États-Unis (USPTO), en tenant compte de la première date de dépôt et du pays de résidence du demandeur selon un comptage fractionnaire. L'indice de l'avantage technologique révélé correspond à la part du pays (ou de l'économie) au regard du nombre de brevets relatifs aux nanotechnologies par rapport à la part du pays (ou de l'économie) au regard du nombre total de brevets. Seuls les pays et les économies comptabilisant plus de 100 brevets au cours des deux périodes sont représentés sur le graphique.

Source : OCDE (2016b), base de données STI Micro-data Lab: Intellectual Property, <http://oe.cd/ipstats> (consultée en octobre 2016).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933679982>

Les brevets chinois déposés dans le domaine des nanotechnologies concernent en grande majorité les nanomatériaux. Le concept des « nouveaux matériaux » recouvre un très large éventail de matériaux. Le 12^e plan quinquennal recensait plus de 400 matériaux de première importance (métalliques, semi-conducteurs, composites, polymères, inorganiques, avancés, etc.). Selon les données les plus récentes, la production dans le secteur des nouveaux matériaux s'est accrue de 600 milliards CNY en 2010, pour atteindre 2 000 milliards CNY en 2015.

S'agissant des nanomatériaux, les nanotubes de carbone font l'objet en Chine d'un nombre de recherches et d'applications qui augmente particulièrement rapidement. Aujourd'hui, les écrans tactiles sont composés principalement de verre et d'un film d'oxyde d'étain et d'indium (ITO). Or, du fait de la réduction de la taille des écrans et du prix élevé de l'indium, l'ITO est mis en concurrence avec d'autres technologies, dont les nanotubes de carbone (Heo, 2013). La société CNTouch, créée conjointement par l'Université de Tsinghua et le groupe Foxconn, est capable de remplacer l'ITO par lesdits nanotubes, ce qui permet à la fois de réduire les coûts de production et l'épaisseur des écrans. CNTouch collabore avec les principaux fabricants chinois de téléphones portables, notamment Huawei, ZTE et Lenovo ; en 2013, ses recettes s'élevaient à quelque 400 millions CNY (63 millions USD) (Commission municipale de la science et de la technologie de Tianjin, 2014).

Les entreprises chinoises sont par ailleurs des acteurs de premier plan sur le marché mondial des nanotubes de carbone. Cnano Technology Limited – qui peut produire 500 tonnes de nanotubes par an – et TimesNano – qui est affiliée à l'Académie des sciences de Chine et possède une capacité de production de 200 tonnes par an – devraient, à mesure que leur production augmente, dominer le marché mondial des nanotubes de carbone

(Johnson, 2014). Les deux entreprises sont également de grands fabricants de pâtes conductrices, qui sont utilisées pour accroître les performances des batteries au lithium-ion.

Outre les nanotubes de carbone, les nanocomposites sont de plus en plus utilisés en tant que matériaux de revêtement, et leurs applications industrielles se retrouvent dans le secteur du génie électrique. La Chine est en train de mettre en place à l'échelle nationale un réseau de transport d'électricité à très haute tension. Or, les conditions climatiques et la pollution atmosphérique compliquent l'opération, et un revêtement d'isolation électrique hautes performances est nécessaire pour prévenir toute rupture due à la pollution (Zhang et al., 2013). Pour répondre à ce besoin, un revêtement en nanocomposite est mis au point conjointement par la compagnie nationale d'électricité et l'Académie des sciences ; il a été utilisé dans le cadre de projets anti-pollution sur un certain nombre de transformateurs-déphaseurs de 500 kV (kilovolts) et 220 kV.

Des nanocatalyseurs sont utilisés en Chine pour produire de l'éthylène glycol à partir de charbon. Ces catalyseurs, développés par l'Institut de recherche sur la structure de la matière de Fujian (qui fait partie de l'Académie des sciences), sont considérés comme essentiels à la production de ce type de glycol. L'Institut de recherche de Fujian travaille aujourd'hui en collaboration avec les sociétés Danhua Chemical Technology et Shanghai Gem Chemicals Hi-tech pour une production d'ampleur industrielle, avec un objectif de 3 millions de tonnes par an (Hanhua Technology, 2013). Il coopère également avec la province de Guizhou pour lancer la deuxième génération d'éthylène glycol à base de charbon. Compte tenu de l'utilisation très répandue d'éthylène glycol dans l'industrie chimique, ainsi que de la richesse en charbon de la Chine, la production à l'échelle industrielle d'éthylène glycol à base de charbon est considérée comme un progrès important pour le pays (ministère de la science et de la technologie, 2012b).

Une équipe de recherche de l'Institut de physique-chimie de Dalian a réussi une conversion directe, sans oxydation, de méthane en éthylène, aromatiques et hydrogène (Guo, 2014). Il s'agissait de l'une des dix plus grandes prouesses scientifiques réalisées en Chine en 2014 (Sciencenet, 2015). Si l'industrialisation de cette technologie aboutit, elle permettra d'utiliser plus efficacement le gaz naturel et le gaz de schiste.

Une autre technologie porteuse de promesses est l'impression nanographique qui, associée à des nanomatériaux métalliques, pourra être utilisée dans l'industrie pour des applications d'électronique imprimée telles que les circuits d'identification par radiofréquence (RFID), les tickets électroniques, les antennes, ainsi que les écrans et les éclairages variables. La société NanoTop Electronic Technology, soutenue financièrement à la fois par l'administration municipale de Pékin, le groupe Lenovo et l'Académie des sciences, fabrique des tickets électroniques en utilisant l'impression nanographique et une pâte composite en nano-argent. Un projet pilote de 200 000 tickets RFID a été mis en œuvre pour le métro de Pékin. Ces tickets, recyclables à 97 % et entièrement compatibles avec la norme sur la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses, sont plus respectueux de l'environnement que ceux fabriqués selon les méthodes traditionnelles (Science China, 2013).

Le cadre d'action concernant les nanotechnologies

Le chapitre 4, consacré aux nanotechnologies et à la production de demain, suggère que pour favoriser le développement de la nanotechnologie et son utilisation dans l'industrie, les pouvoirs publics encouragent la collaboration entre institutions et créent des réseaux pluridisciplinaires, en particulier concernant les infrastructures de R-D sur la

nanotechnologie. Le chapitre conseille également que les pouvoirs publics soutiennent les efforts d'innovation et de commercialisation des petites entreprises, ainsi que la définition de règles permettant d'apprécier, selon une procédure fluide et transparente, les risques présentés par les produits issus des nanotechnologies.

Le chapitre 6 appelle l'attention sur les questions de fond que soulèvent les découvertes dans le domaine des nouveaux matériaux. On y suggère aux pouvoirs publics d'être attentifs aux craintes que pourraient susciter ces nouveaux matériaux (par exemple, que les matériaux créés à l'aide de techniques de simulation n'induisent de nouveaux risques de cybersécurité) et de prendre des mesures efficaces dans un certain nombre de domaines qui sont souvent importants pour des raisons antérieures (généralement en rapport avec l'interface science-industrie et des questions comme les données ouvertes, la science ouverte et la qualité du régime de propriété intellectuelle). Il peut également être nécessaire de favoriser la recherche et l'éducation pluridisciplinaires.

La coopération internationale dans le domaine des nanotechnologies figurait comme l'un des objectifs clés du 12^e plan quinquennal. Entre 2000 et 2009, le nombre d'articles en co-autorat Chine-États-Unis a été presque multiplié par dix (de 126 à 1 238). En 2012, un centre d'innovation sur les nanotechnologies Chine-Finlande a été établi dans la Nanopolis de la ville de Suzhou. Une conférence internationale sur les nanosciences et les nanotechnologies se tient tous les deux ans depuis 2005 ; l'édition de 2015, la dernière en date, a attiré plus de 1 300 participants venus de plus d'une quarantaine de pays et de régions. Pour autant, le pourcentage de publications en co-autorat sur les nanotechnologies demeure inférieur à celui des documents en co-autorat international publiés en Chine dans l'ensemble des domaines scientifiques.

Un comité directeur national sur les nanosciences et les nanotechnologies a été créé pour coordonner les principaux ministères, organismes de financement et instituts de recherche. Les nanotechnologies figuraient en tête des objectifs du programme national pour le développement des sciences et technologies à moyen et long termes (2006-20). Elles ont donc bénéficié d'un important financement de la part des principaux bailleurs de fonds chinois. En 2016, le ministère de la Science et de la Technologie a investi plus de 600 millions CNY (87 millions USD) dans la recherche sur les nanotechnologies.

Les PME utilisant les nanotechnologies peuvent solliciter des financements auprès du fonds national pour l'innovation technologique dans les PME, ainsi qu'un remboursement d'impôts et un soutien pour leurs achats. Une initiative nationale a été engagée en 2015 pour ouvrir au public les infrastructures et équipements de recherche de premier plan (y compris des universités, des sociétés et des organismes de recherche sociale) financés sur fonds publics. Les dispositifs détaillés de mise en œuvre sont encore à définir.

Les nouveaux matériaux ont été mis en avant à la fois dans les 12^e et 13^e plans quinquennaux relatifs aux sciences et technologies. Dans le 13^e plan quinquennal, le projet à long terme « Innovation 2030 » centre son attention sur la production et l'utilisation de nouveaux matériaux présentant de l'importance tels que la fibre de carbone, les composites, les métaux composés résistant à de fortes températures, ainsi que les matériaux d'affichage. Le caractère transdisciplinaire du développement des nouveaux matériaux est reconnu dans le plan national de développement à moyen et long termes des talents pour les nouveaux matériaux, dont l'objectif est de former d'ici à 2020 plus d'un millier de scientifiques, d'ingénieurs et de gestionnaires polyvalents. Toutefois, aucune politique publique spécifique n'a encore été mise en œuvre.

Les stratégies et les politiques gouvernementales

Un certain nombre d'initiatives publiques à haut niveau ont été engagées pour promouvoir le développement des technologies et la modernisation du secteur manufacturier chinois. Les initiatives les plus importantes sont les suivantes (avec indication de l'année de leur annonce) :

- lignes directrices du programme national pour le développement des sciences et technologies à moyen et long termes (2006-20) – 2006
- décision d'accélérer la promotion et le développement des industries émergentes d'importance stratégique – 2010
- 12^e plan quinquennal pour le développement économique et social du pays – 2011
- *Made in China 2025* – 2015
- « Internet Plus » – 2015
- 13^e plan quinquennal pour le développement économique et social du pays – 2016.

Ces initiatives sont importantes car elles fixent des objectifs, des orientations, des priorités et des cadres essentiels. Très générales et concises, elles sont généralement suivies de plans d'action plus détaillés et orientés vers la mise en œuvre. Ces plans s'appuient eux-mêmes sur des outils et des mesures comme les investissements publics, les programmes de R-D, les projets de démonstration, les incitations fiscales, l'aide au financement et les dispositifs en matière de ressources humaines.

L'enchaînement chronologique de ces initiatives montre par ailleurs que les priorités ont changé en l'espace de dix ans. L'importance accrue accordée à la modernisation du secteur manufacturier est l'exemple le plus flagrant : alors qu'elle n'était, dans les premières initiatives, abordée que dans quelques chapitres, cette modernisation est devenue dans *Made in China 2025* un sujet phare. Dans le même temps, l'accent qui est mis sur les technologies génériques (autrefois centré sur la R-D) est progressivement orienté vers la commercialisation et l'utilisation industrielle.

L'intégration des technologies numériques (en particulier les TIC et l'internet) dans les activités de fabrication est considérée comme le principal moteur de la modernisation du secteur manufacturier. Parallèlement, les innovations et les avancées qui ont lieu au regard des priorités stratégiques (comme les biotechnologies, les nouveaux matériaux et les nouvelles formes d'énergie) apportent un indispensable nouvel élan.

Les approches et les instruments utilisés par les pouvoirs publics changent eux aussi. Alors que les technologies génériques sont transférées des laboratoires vers l'industrie, les investissements et les incitations publics – qui étaient autrefois les principaux outils utilisés – laissent place à des réformes systémiques et des mesures visant à améliorer l'environnement des entreprises, dans lequel les marchés devraient jouer un rôle accru. Une importance grandissante est en outre accordée aux politiques concernant la coopération internationale, les infrastructures ouvertes et l'accès aux données, ainsi que les PME.

Les administrations locales encouragent également la modernisation du secteur manufacturier, notamment en mettant en place des fonds de contrepartie, des politiques d'incitation personnalisées et des parcs industriels.

Les principales initiatives gouvernementales

Les Lignes directrices du programme national pour le développement des sciences et technologies à moyen et long termes (2006-20) (ci-après « les Lignes directrices ») mettent l'accent sur l'importance stratégique de l'innovation. Leur but est de soutenir l'instauration d'un système de mise en œuvre global en coordonnant les politiques ayant trait aux dépenses de R-D, aux incitations fiscales, au soutien financier, aux marchés publics, à la propriété intellectuelle et à l'éducation (tableau 12.1).

Tableau 12.1. **Système de mise en œuvre des Lignes directrices**

Objectif d'action	Institutions et mesures
Dépenses de R-D	Dispositifs de gestion du financement des programmes nationaux relatifs aux hautes technologies, à la recherche fondamentale et aux technologies génériques ; dispositifs de R-D au service de l'intérêt général.
Régime fiscal	Remboursement des taxes à l'importation de matériel de R-D et de formation ; politiques à l'égard des start-ups ; incitations à la R-D à l'intention des entreprises.
Soutien financier	Garantie de prêts aux PME ; fonds d'investissement au profit des sciences et technologies dans les PME ; assurance- crédit à l'exportation pour les entreprises de haute technologie ; financement de grands projets nationaux de R-D par les banques d'entreprise.
Marchés publics	Dispositifs de gestion des marchés publics pour les produits scientifiques et technologiques.
Acquisition de technologies	Liste des technologies dont l'acquisition est encouragée.
Ressources humaines	Mesures visant à attirer les talents étrangers ; orientations pour l'emploi dans les instituts de R-D ; politiques en matière de ressources humaines pour les projets de R-D nationaux ; 11 ^e plan quinquennal pour les étudiants en post-doctorat.
Propriété intellectuelle	Programme national de soutien aux principales normes technologiques et à leur application ; avis pour améliorer les services publics du régime de propriété intellectuelle.
Éducation	Principales matières enseignées au niveau national ; bourse de l'État pour les études à l'étranger ; formation en alternance dans les établissements de formation professionnelle ; universités ouvertes et instituts de R-D.
Plateformes d'innovation	Centre de recherche national sur l'ingénierie ; laboratoires nationaux d'ingénierie ; centre de R-D pour les entreprises certifié par l'État.

Source : Analyse de l'auteur.

La Décision d'accélérer la promotion et le développement des industries émergentes d'importance stratégique (ci-après « la Décision ») arrive à un moment important dans la modernisation de la structure industrielle chinoise, et définit sept industries émergentes d'importance stratégique³. Ces sept industries devraient représenter environ 15 % du PIB à l'horizon 2020. Pour atteindre ses objectifs, la Décision essaie de combiner le soutien public et le marché, et encourage à la fois les grandes entreprises et les PME à participer.

Les plans quinquennaux nationaux couvrent chaque secteur important du développement économique et social de la Chine, et mettent notamment l'accent sur la compétitivité de l'industrie chinoise. Après le 12^e plan quinquennal, des plans plus détaillés ont été établis, notamment le plan quinquennal pour la transformation et la modernisation de l'industrie, le 12^e plan quinquennal pour les industries émergentes d'importance stratégique et le 12^e plan quinquennal pour les sciences et les technologies.

L'initiative *Made in China 2025* marque une étape importante car elle correspond à la première, sur dix ans, d'une série d'initiatives stratégiques nationales visant le développement global à long terme du secteur manufacturier chinois. *Made in China 2025* a défini à l'intention de l'industrie des indicateurs en matière d'innovation, de qualité, de développement du numérique et de respect de l'environnement. Les objectifs fixés pour 2025 sont par exemple les suivants : pourcentage des dépenses de R-D par rapport aux ventes du secteur manufacturier égal à 1.68 % ; augmentation de la productivité du travail de 7.5 % par

an d'ici à 2020, puis de 6.5 % à l'horizon 2025 ; couverture du haut débit passant de 50 % en 2015 à 82 % en 2025 ; baisse de 34 % de la consommation énergétique par unité de valeur ajoutée à l'horizon 2025 (encadré 12.3).

Encadré 12.3. **L'initiative Made in China 2025**

Made in China 2025 énonce neuf axes d'action pour réaliser ses ambitions :

1. **Accroître les capacités d'innovation.** Le but est de créer un système national d'innovation dans lequel les entreprises sont aux commandes, les pouvoirs publics fournissent des services et un soutien à la R-D dans les technologies clés, et les résultats des recherches menées par les universitaires peuvent être commercialisés efficacement.
2. **Promouvoir le développement du numérique.** La transformation numérique de la production est l'objectif visé. Cela concerne non seulement les équipements (par exemple les machines-outils et les robots commandés par ordinateur), mais aussi les processus de fabrication intelligents et les infrastructures correspondantes.
3. **Mettre l'accent sur les fondamentaux.** Les quatre « fondamentaux » tels qu'ils sont énoncés dans *Made in China 2025* sont : les composants de base, les technologies de traitement fondamentales, les matériaux de base, et les services industriels essentiels.
4. **Améliorer la qualité et construire la notoriété des marques.** Gestion de la qualité, inspections et normes seront mises en place pour résoudre les problèmes de qualité. Des efforts seront également déployés pour mieux faire connaître les marques et aider les entreprises à gérer leurs marques et à les mettre en avant.
5. **Pour un secteur manufacturier plus respectueux de l'environnement.** Cela consiste à introduire des technologies vertes dans les secteurs de production traditionnels, mais aussi à développer les industries sobres en carbone (par exemple celles qui utilisent des nouveaux matériaux et la biotechnologie), à promouvoir le recyclage des ressources, à mettre en place des chaînes d'approvisionnement et une logistique respectueuses de l'environnement, ainsi qu'à renforcer les normes écologiques et les contrôles environnementaux.
6. **Cibler les technologies et les produits prioritaires.** Ces priorités sont notamment les TIC, les outils et les robots à commande numérique, le matériel aérospatial, les équipements d'exploration océanique et les navires haute technologie, le matériel ferroviaire, les véhicules à faible consommation d'énergie, les équipements d'alimentation électrique, les machines agricoles, les nouveaux matériaux, la biomédecine et les appareils médicaux.
7. **Restructurer l'industrie.** Cet objectif recouvre l'utilisation de nouvelles technologies dans les entreprises, la gestion de l'excédent de capacité, la coordination entre les grandes entreprises et les PME, ainsi que la planification industrielle au niveau régional.
8. **Concevoir la production comme un service et mettre en place des services d'aide à la production.** Le but est d'aider le secteur manufacturier à élargir la chaîne de valeur et à concevoir/commercialiser à la fois des produits et des services. Les services d'aide à la production vont de la logistique aux ressources humaines, en passant par la gestion de la propriété intellectuelle et le service après-vente. L'accent est mis sur les services favorisant l'adoption des TIC et le développement des activités basées sur l'internet mobile.
9. **S'ouvrir à la coopération internationale.** L'objectif est d'aider les entreprises chinoises à investir et à faire des affaires à l'étranger, tout en attirant en Chine des investissements étrangers au profit des industries de haute technologie et des centres de recherche internationaux.

Encadré 12.3. **L'initiative Made in China 2025** (suite)

Pour ces neuf axes d'action, *Made in China 2025* recense huit domaines de mise en œuvre : réforme systémique, introduction d'une concurrence loyale sur le marché, financement, régime fiscal, ressources humaines, PME, ouverture à l'international et mécanismes de coordination. Une feuille de route répertoriant les technologies et les produits prioritaires a été publiée en octobre 2015. En août 2016, des lignes directrices pour la mise en œuvre de cinq projets phares (qui correspondent aux premières dispositions de mise en œuvre de *Made in China 2025*) ont été élaborées pour lancer des projets concernant l'innovation, la fabrication intelligente, les fondamentaux de l'industrie, l'écologisation du secteur manufacturier et les équipements haut de gamme (respectivement les axes d'action 1, 2, 3, 5 et 6).

Jusqu'à ce jour, la mise en œuvre a été centrée sur les technologies et a pris la forme du financement des projets par l'administration centrale. Le gouvernement a constitué un fonds d'investissement pour la modernisation du secteur manufacturier de 20 milliards CNY (2.9 milliards USD), dont 6 milliards proviennent du budget de l'État. En plus des projets pilotes de démonstration, l'administration centrale a également lancé, dans le cadre de *Made in China 2025*, un projet de villes expérimentales dans lequel les villes sélectionnées sont encouragées à recenser et développer leurs avantages concurrentiels dans le secteur manufacturier. Ningbo et Wuhan font partie des premières villes sélectionnées (He, 2016). Cela dit, les pistes et les orientations adoptées dans *Made in China 2025* ont suscité la demande d'une approche de mise en œuvre plus globale, non centrée sur les besoins particuliers des différentes technologies.

Annoncée deux mois après *Made in China 2025*, l'initiative « Internet Plus » vise à accroître l'utilisation de l'internet dans l'industrie. Elle promeut le développement du numérique dans 11 domaines⁴ et vise à faire de la Chine, à l'horizon 2025, un écosystème industriel interconnecté et orienté vers les services. Dans le secteur manufacturier, intégrer l'internet signifie en premier lieu mettre en place ce que l'on appelle des « usines intelligentes » utilisant l'informatique en nuage, l'internet des objets, la robotique et la fabrication additive. Une autre priorité est la production personnalisée à grande échelle qui, grâce à l'utilisation de l'internet et de modes de fabrication flexibles, permettra de satisfaire les besoins variés de la clientèle. Il faudra aussi que le secteur manufacturier accroisse son offre de services.

« Internet Plus » est une initiative axée sur la mise en œuvre. Chaque priorité est gérée par un ministère désigné pour assurer son suivi. Peu de fonds publics y sont cependant affectés. L'accent est mis sur l'amélioration des infrastructures publiques, le renforcement des capacités au service de l'innovation et la mise en place d'un environnement réglementaire plus souple. L'ouverture est également mise en avant, avec des objectifs comme le développement du logiciel libre, des données ouvertes, ainsi que des infrastructures et des installations ouvertes.

Les mesures et politiques publiques complémentaires

Outre les programmes financés sur fonds publics – qui sont la mesure phare devant permettre de mener à bien les initiatives décrites plus haut –, la Chine a également mis en place des dispositifs complémentaires concernant la réforme systémique, le financement et l'imposition, la propriété intellectuelle et les ressources humaines. Ces dispositifs sont présentés succinctement ci-après.

Réforme systémique

Le rôle des pouvoirs publics évolue de plus en plus vers la planification stratégique, la mise en œuvre des politiques et l'amélioration des services publics. Le pays a amorcé en 2013 une réduction radicale du nombre d'opérations nécessitant la délivrance d'une autorisation administrative. Plus de 700 procédures d'autorisation administrative auraient ainsi été annulées ou transférées à des échelons inférieurs de l'administration, nombre d'entre elles ayant trait à la réalisation d'investissements dans l'industrie (Conseil des Affaires d'État, 2016). Pour accélérer la simplification des démarches administratives, l'État chinois utilise une approche fondée sur une liste négative des secteurs et des activités économiques. Hormis les secteurs figurant dans cette liste, les autres (notamment les secteurs et entreprises d'un nouveau type, par exemple les formes multiples de projets faisant appel au financement participatif ou relevant de l'économie collaborative) peuvent exercer leur activité sans avoir à demander une autorisation administrative (Conseil des Affaires d'État, 2015a).

L'industrie a longtemps été présentée comme la principale force en matière d'innovation technologique. C'est la raison pour laquelle de nombreux programmes nationaux de R-D sont conçus pour être conduits par elle. Les laboratoires et centres technologiques industriels peuvent bénéficier d'incitations et d'exonérations fiscales. L'innovation technologique est également utilisée comme un indicateur de performances pour les entreprises publiques. Par ailleurs, de plus en plus d'efforts sont faits pour faciliter et encourager la modernisation et l'innovation technologiques dans les PME, ainsi que pour améliorer les conditions cadres (comme l'accès aux prêts).

L'initiative *Mass Innovation and Entrepreneurship* symbolise un récent changement de cap de la politique chinoise en matière d'innovation, à savoir son orientation vers l'innovation locale et la généralisation de l'esprit d'entreprise. Elle entraîne une importante mutation du système de « sélection des gagnants » vers des formes plus générales de soutien à l'entrepreneuriat et l'innovation (Liu et al., 2017). Les politiques publiques s'adaptent par ailleurs aux besoins des différents types d'entrepreneurs. S'agissant des chercheurs, par exemple, un délai de trois ans leur est accordé pour commercialiser leurs travaux ; pendant ce temps, ils conservent leur emploi à l'université ou dans un institut de recherche.

L'État chinois investit en outre dans les infrastructures requises pour utiliser les nouvelles technologies, en particulier les TIC et celles relatives aux nouvelles sources d'énergie. Des normes et des labels nationaux (comme le *National Energy Label*) ont par ailleurs été créés pour faciliter le choix des consommateurs.

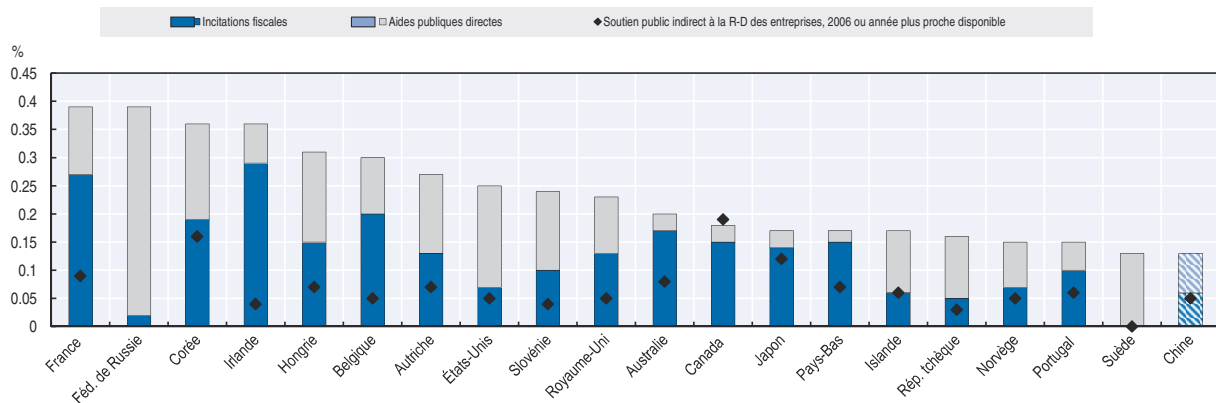
Des efforts sont également déployés pour créer un marché national intégré : les politiques régionales qui sont incompatibles ou font double emploi sont donc abolies. D'autres réformes systémiques ont été entreprises pour promouvoir l'autonomie dans les instituts de recherche, la collaboration entre les universités et l'industrie, l'innovation régionale et la réforme des entreprises publiques.

Financement et fiscalité

Le soutien financier et la fiscalité sont utilisés pour orienter les investissements du secteur privé et encourager la R-D dans les domaines prioritaires. Le financement est un outil auquel l'administration centrale a de plus en plus recours pour mobiliser les ressources des gouvernements régionaux et des acteurs privés ; prenant auparavant la forme de subventions directes pour l'achat de matériels, il consiste aujourd'hui en incitations fondées sur les performances. En ce qui concerne les incitations fiscales, les pouvoirs publics ont

récemment modifié les conditions requises pour en bénéficier et renforcé les contrôles, afin que le dispositif soit plus efficace et plus efficient. En 2013, la Chine, les États-Unis et la France étaient les pays qui octroyaient le plus d'aides fiscales pour la R-D en valeur absolue (graphique 12.7).

Graphique 12.7. **Aides financières publiques directes à la R-D des entreprises et incitations fiscales à la R-D, 2014 (en pourcentage du PIB)**



Note : Les données concernant la Chine se rapportent à 2009 et 2013. Pour les autres pays, voir les notes qui s'y rapportent dans les sources.
Sources : OCDE (2017b), *R&D Tax Incentive Indicators*, <http://oe.cd/rdtax> (consulté en février 2017) ; OCDE (2017c), *Principaux indicateurs de la science et de la technologie*, <http://oe.cd/msti> (consulté en février 2017).

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933680001>

Depuis 2006, 150 % des dépenses consacrées à l'innovation technologique et à la R-D sont déductibles aux fins du calcul de l'impôt des sociétés. En 2014, les déductions se sont élevées au total à 237 milliards CNY (Administration fiscale nationale, 2015). En 2015, ce dispositif a été étendu afin d'être plus accessible aux PME. Un taux d'imposition de 15 % est appliqué aux entreprises de haute technologie implantées dans des parcs industriels nationaux (le taux normal d'imposition des sociétés est de 25 %), avec une exonération fiscale pendant les deux premières années (Ministère des Finances, 2006). Les articles utilisés dans le cadre de la R-D scientifique et technologique sont exonérés de taxes à l'importation (ministère des Finances, 2007a). Ces taxes sont également remboursées lorsqu'elles se rapportent aux principaux composants et matériaux utilisés pour fabriquer des équipements de première importance (ministère des Finances, 2007b). L'une des incitations consiste également à exonérer les transferts de technologie de la taxe sur la valeur ajoutée (mesure introduite en 2010) (Ministère des Finances, 2010), et à accélérer l'amortissement des actifs fixes dans des secteurs comme la biomédecine et les TIC (mesure de 2014) (Ministère des Finances, 2014).

S'agissant du financement sur fonds propres, le premier fonds de fonds public national a été constitué en 2006. Il permet de créer des fonds de capital-risque pour investir dans les start-ups de haute technologie et les PME. Doté initialement de 100 millions CNY en 2007, le fonds de fonds contenait 1.3 milliard en 2014 (Ministère de la Science et de la Technologie, 2014). D'autres fonds de capital-risque ont été constitués sur ce modèle après 2010. Certains ont pour but de promouvoir le transfert et la commercialisation des technologies (encadré 12.4) ; d'autres visent à soutenir les industries émergentes, en particulier les TIC, la biotechnologie, la fabrication de pointe et les nouveaux matériaux. En 2015, un fonds de 40 milliards CNY a été créé pour aider les industries émergentes. Il introduira de nouveaux

Encadré 12.4. **Fonds national pour le transfert et la commercialisation des technologies**

Créé en 2014, le Fonds national pour le transfert et la commercialisation des technologies (NFTTC) vise à promouvoir le transfert et la commercialisation des technologies, notamment en ce qui concerne les projets de recherche financés sur fonds publics. En 2015, environ 1 milliard CNY (145 millions USD) du NFTTC a été investi pour créer trois fonds de capital-risque dotés au total de 4.2 milliards CNY (610 millions USD). Le NFTTC présente quatre grandes caractéristiques :

- Une base de données nationale regroupe tous les résultats et toutes les découvertes des projets de recherche.
- Une fonction de capital-risque. Le NFTTC gère un fonds de capital-risque, en partenariat avec une sélection d'organismes de placement, qui investissent dans le transfert et la commercialisation des technologies figurant dans la base de données.
- Couverture des risques de crédit des banques. Une couverture ne dépassant pas 2 % du montant des crédits est dispensée aux banques qui financent les PME actives dans le transfert et la commercialisation de technologies.
- Incitations aux résultats. Une incitation non renouvelable peut être offerte aux entreprises, instituts de recherche, établissements d'enseignement supérieur ou organismes obtenant des résultats exceptionnels.

mécanismes de gestion fondés sur le marché, et ses gestionnaires bénéficieront de plus d'autonomie (Conseil des Affaires d'État, 2015c).

Les gros équipements technologiques fabriqués par les entreprises chinoises mettent généralement du temps avant d'inspirer confiance aux utilisateurs. Suite au lancement de *Made in China 2025*, un programme pilote a été mis sur pied pour fournir aux entreprises manufacturières des subventions publiques. Lorsque les entreprises peuvent conclure un accord avec les compagnies d'assurance et vendre leurs équipements aux clients (les bénéficiaires de l'assurance), lors de la première vente effectuée, 80 % du coût de l'assurance est subventionné. Une liste récapitulative a été diffusée en 2015. L'avion de transport à turbopropulseur Harbin Y-12 fait partie des premiers équipements à être assurés de cette manière.

Propriété intellectuelle

Afin de coordonner la stratégie de la Chine en matière de propriété intellectuelle avec les grandes initiatives décrites ci-dessus, des mesures ont été adoptées concernant les demandes de brevets, les services et la protection. Ces mesures surviennent dans le contexte d'une activité de dépôt de brevets subventionnée et en augmentation rapide, mais avec des brevets de qualité médiocre dans l'ensemble, un taux important de violation de la propriété intellectuelle et l'idée très répandue dans les entreprises selon laquelle les brevets ne protègent pas correctement l'innovation (OCDE, 2017a).

Une liste des principaux produits et technologies du secteur de l'information et des communications a été établie pour guider et encourager le développement de la propriété intellectuelle en Chine (ministère de la Science et la Technologie, 2007). S'agissant des industries émergentes stratégiques, des dispositifs ont été mis en place pour améliorer la propriété intellectuelle ; des lignes directrices d'évaluation des brevets ont ainsi été diffusées

à l'échelle nationale, et la demande de brevets a été facilitée grâce à des procédures accélérées (Conseil des Affaires d'État, 2012). D'autres mesures ont été prises pour accroître les capacités de financement des entreprises fondé sur la propriété intellectuelle, comme par exemple les prêts garantis par des brevets (China Banking Regulatory Commission, 2013). Les entreprises et les instituts de recherche chinois sont également encouragés à déposer des brevets à l'étranger.

Depuis le lancement de *Made in China 2025*, des projets pilotes de conseil sur les brevets industriels ont été mis sur pied par le Bureau d'État de la propriété intellectuelle (Bureau d'État de la Propriété Intellectuelle de la République Populaire de Chine, 2015). Ces projets consistent en une analyse des brevets et débouchent, pour certains secteurs, sur des recommandations stratégiques. Une première série de projets a été lancée dans les domaines de la nanofabrication, de l'internet mobile et des matériaux superdurs.

Des mesures seront également prises pour renforcer la protection des brevets, notamment la mise en place d'un service de propriété intellectuelle simplifié et coordonné à l'échelle nationale, ainsi que d'un système de gestion et de contrôle (Conseil des Affaires d'État, 2015b). Une protection renforcée de la propriété intellectuelle sera mise en place dans de nouveaux domaines comme les données massives, la production participative et le financement participatif.

Ressources humaines

« Les talents sont la ressource la plus importante de la Chine pour son développement économique et social », peut-on lire dans le document de présentation du plan national de développement à moyen et long termes des talents (2010-20). Première initiative chinoise de développement des talents à long terme, ce plan vise à amener le pourcentage de travailleurs très qualifiés à 28 % et les investissements dans le capital humain en pourcentage du PIB à 15 % d'ici à 2020. Les domaines considérés comme prioritaires pour le développement des compétences sont notamment la fabrication d'équipements, les TIC, les biotechnologies et les nouveaux matériaux (Conseil des Affaires d'État, 2010).

Pour développer les compétences dans ces secteurs prioritaires, des initiatives complémentaires permettront d'accroître les capacités des cadres et des travailleurs hautement qualifiés. Douze projets de développement des ressources humaines sont en outre mis en œuvre à l'échelle nationale, le but étant d'orienter les investissements nationaux vers la formation des jeunes chercheurs et techniciens, l'utilisation des talents étrangers et le perfectionnement des cadres et des techniciens.

Made in China 2025 insiste sur l'importance de la mise en place d'un système global de compétences dans les domaines de la R-D, de la transposition et de l'application de la recherche, de la production et de la gestion. Un nombre croissant d'établissements d'enseignement universitaire pré-licence sont en train d'être transformés en établissements d'enseignement professionnel afin de renforcer la formation professionnelle et continue. Des projets pilotes sont mis sur pied pour expérimenter des formes d'apprentissage modernes.

Suite à *Made in China 2025* et « Internet Plus », des modifications ont été introduites dans le Catalogue national des disciplines et des spécialités des établissements d'enseignement professionnel et technique (qui sert de guide pour l'élaboration des cours). L'une de ces modifications est l'ajout de nouvelles disciplines comme la robotique industrielle, l'ingénierie fondée sur l'internet des objets, l'impression 3D pour l'aéronautique,

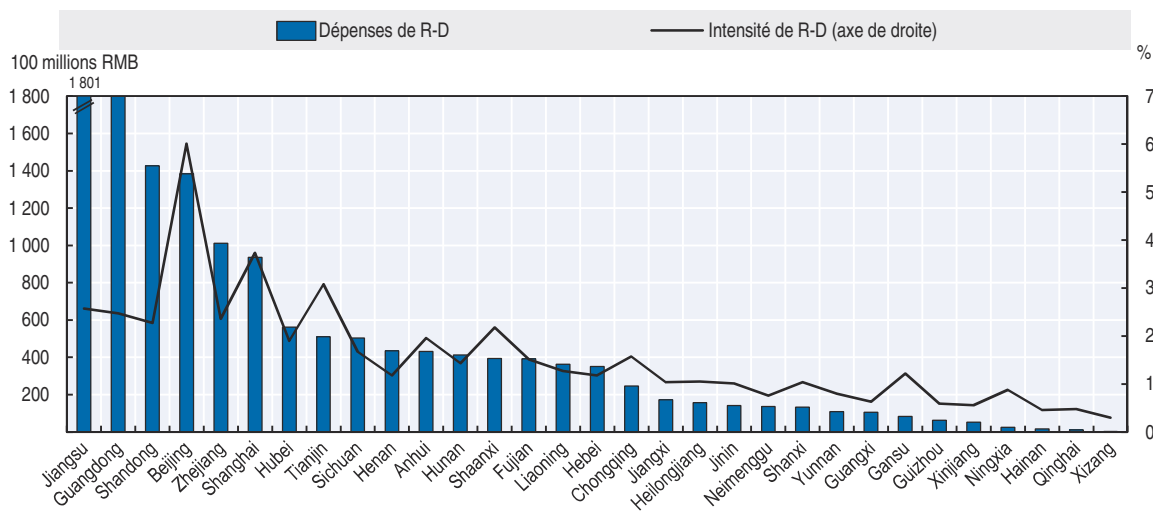
l'informatique en nuage et les données massives. D'autres initiatives ayant trait à l'enseignement sont en préparation. Ainsi, alors que les TIC sont enseignées depuis longtemps dans les établissements d'enseignement primaire et secondaire, un programme national d'enseignement de la robotique est actuellement à l'étude (Ren, 2016).

Outre l'éducation de base, des mesures seront prises pour élargir les possibilités de formation à l'étranger et attirer des étrangers qualifiés. À cette fin, le ministère de l'Éducation a élaboré un programme de développement des talents pour le secteur manufacturier (2016-20). D'autre part, certains dispositifs sont aménagés pour s'adapter aux besoins des chercheurs et des universitaires. À titre d'exemple, leur emploi dans les universités ou les instituts de recherche est préservé pendant une période maximale de trois ans s'ils commercialisent leurs travaux. Enfin, des services et des incubateurs seront fournis dans les universités pour aider les étudiants à monter des start-ups qui, par ailleurs, bénéficieront d'un régime fiscal privilégié.


Initiatives régionales

Le développement industriel de la Chine est très variable selon les régions (graphique 12.8). *Made in China 2025* est devenue en 2016 l'une des initiatives les plus fréquemment citées dans les rapports des administrations régionales, car les provinces ont commencé à mettre en place leurs propres initiatives (Ma, 2016). Cette situation suscite des problèmes en termes de double emploi des investissements et de concurrence entre les régions, et appelle une amélioration de la coordination et de la gouvernance aux niveaux central et régional.

Graphique 12.8. Dépenses de R-D des différentes régions de Chine, 2015



Source : Ministère de la Science et de la Technologie (2015c), « 2015 年全国科技经费投入统计公报 » [Dépenses de R-D 2015], www.most.gov.cn/kjbgz/201611/P0201611118627899534071.doc.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933680020>

Certaines régions, en particulier les plus développées situées le long des côtes à l'est du pays, ont pour projet de développer les secteurs de la robotique, de l'internet des objets et des drones, par exemple, en lançant des programmes de « remplacement des humains par des robots ». D'autres régions privilégient la modernisation des industries existantes par l'introduction de nouvelles technologies. Ainsi, la province de Hebei, qui produit

d'importantes quantités d'acier, de ciment et de verre, a pour ambition de réformer son industrie et de faire avancer la croissance verte grâce à *Made in China 2025*.

Les nouvelles technologies offrent aussi aux régions de l'intérieur du pays des possibilités d'évolution. Ainsi, la province de Sichuan est l'une des premières à avoir élaboré une feuille de route pour la fabrication additive (2014-23) ; elle a en outre défini des priorités pour l'impression 3D dans l'aéronautique et pour le secteur de la fabrication de machines de précision (Wu, 2014). De son côté, la province moins développée de Guizhou, au centre-ouest de la Chine, a pour ambition de devenir le centre de données du pays et a émis la première réglementation régionale sur les données massives.

La Chine compte actuellement plus de 145 parcs de haute technologie. Les administrations régionales jugent ces parcs importants pour promouvoir le progrès technologique. De nombreuses villes chinoises ont également mis en œuvre *Smart City*, qui est une autre initiative gouvernementale. En 2015, on dénombrait en Chine quelque 300 projets pilotes *Smart City* (ministère du Logement et du Développement urbain-rural, 2015). L'objectif est d'introduire l'utilisation de l'internet des objets, des données massives, de l'informatique en nuage et de l'internet mobile dans les domaines de l'infrastructure, de la gouvernance publique, des transports, de la santé et de la production industrielle.

Principaux défis et considérations intéressant l'action gouvernementale

La modernisation du secteur manufacturier chinois est un défi complexe. La question n'est pas seulement de développer les technologies les plus avancées. Il faut aussi intensifier l'utilisation de ces technologies, de même que mettre à niveau et restructurer une capacité de production de grande ampleur qui en est toujours au stade d'évolution 2.0 (voire, souvent, 1.0) (Yang Jun, 2015). Les principales difficultés sont non seulement d'accroître l'investissement public dans la science, la recherche et l'innovation, mais aussi de commercialiser les résultats de la recherche et d'encourager le secteur privé à prendre les devants en matière d'innovation. Le matériel doit être amélioré (par exemple l'infrastructure des TIC), ainsi que les logiciels et les compétences. Les défis à relever concernent non seulement les administrations (centrale et locales), mais aussi les instituts de recherche et les universités, les entreprises publiques et les PME. Si les politiques et les programmes mettent en avant les technologies nécessaires à la modernisation du secteur manufacturier, les pouvoirs publics doivent en outre faire face à toute une série d'évolutions et de répercussions connexes, telles que l'importance croissante de la cybersécurité et le dysfonctionnement du marché du travail. Il convient parallèlement d'accorder une attention particulière aux questions de gouvernance, notamment en ce qui concerne la coordination entre les ministères ainsi qu'entre les administrations centrale et régionales.

La polarisation des capacités technologiques

Le secteur manufacturier chinois est très polarisé. Les exemples cités dans le présent document montrent les progrès technologiques et l'utilisation de technologies de pointe dans les entreprises chinoises. Pourtant, dans beaucoup de secteurs, on constate de larges écarts entre les capacités de production de base, comme par exemple la maîtrise des principales technologies de traitement et la capacité de produire les matériaux nécessaires. En fait, la plupart des entreprises manufacturières chinoises sont en retard dans les capacités numériques et de gestion. Comme l'a déclaré Miao Wei, ministre de l'Industrie et des Technologies de l'information : « Le secteur manufacturier chinois en est toujours à un stade où les industries 2.0 et 3.0 cohabitent et doivent se développer simultanément pour

finaliser la mise en œuvre de l'industrie 2.0, faire connaître la 3.0 et expérimenter la 4.0. » (Feng B., 2015). Les enquêtes auprès des entreprises confirment cette observation (graphique 12.2). Une telle inégalité de développement, associée à une structure industrielle dans laquelle les secteurs à forte intensité de ressources et d'énergie conservent une place importante, entraînent d'importantes difficultés.

Dans la fabrication haut de gamme, les défis sont notamment les suivants : utilisation intensive de moyens de production de base importés, comme par exemple le matériel de pointe, les logiciels et les composants essentiels comme les servomoteurs des robots industriels et certains produits en acier de haute qualité (encadré 12.5) ; investissement insuffisant des instituts de recherche dans la recherche fondamentale et R-D insuffisante dans les entreprises ; absence de synergie entre les instituts de recherche et l'industrie, d'où une commercialisation inefficace des technologies. S'agissant de la fabrication de milieu de gamme, les difficultés sont par exemple la nécessité d'accroître la qualité des produits, le manque général d'efficacité, la faible notoriété des marques, ainsi que le besoin d'aller plus loin dans l'innovation technologique afin de s'élever dans les chaînes de valeur. Dans les secteurs à forte intensité de ressources et d'énergie, les défis de la modernisation sont particulièrement grands et complexes – des problèmes de surcapacité, une production qui n'est guère élaborée et la pollution de l'environnement.

Encadré 12.5. **Un stylo à bille « Made in China »**

Lors d'une récente réunion visant à régler les problèmes de surcapacité des industries de l'acier et du charbon – qui s'est tenue à Taiyuan, la capitale de la province de Shanxi, une région riche en charbon mais qui a aujourd'hui une croissance nulle –, le Premier ministre chinois, Li Keqiang, a fait remarquer que, malgré ses formidables capacités de production d'acier, la Chine a toujours besoin d'importer certains composants en acier de grande qualité, notamment ceux utilisés pour fabriquer les pointes des stylos à bille.

Ce problème a été observé pour la première fois en 2011 par Wan Gang, le ministre de la Science et de la Technologie, qui avait relevé que pour fabriquer en Chine 38 milliards de stylos, il fallait importer 90 % des pointes des stylos. En 2012, un projet national de recherche a été lancé concernant les principaux matériaux et équipements nécessaires à la fabrication des stylos. L'État y a investi 60 millions CNY et les principaux organismes de recherche le double, ce qui fait de ce projet le plus ambitieux à ce jour dans le secteur chinois de la fabrication de stylos. Ce projet a étudié trois aspects : l'encre, les pointes et l'adéquation entre la première et les secondes. Trois entreprises (une publique et deux privées) y ont participé. Le projet s'est achevé en 2015 avec la démonstration réussie que la Chine pouvait produire 1 000 tonnes d'acier par an pour les pointes des stylos à bille (ministère de la Science et de la Technologie, 2015b).

L'observation du Premier ministre, associée au projet précité, montrent bien la polarisation du secteur manufacturier chinois. L'exemple illustre également la stratégie adoptée par les pouvoirs publics pour résoudre le problème, l'industrie se chargeant à la fois de la R-D et des investissements, et l'État jouant un rôle de soutien.

Mettre les marchés au service de la modernisation de l'industrie

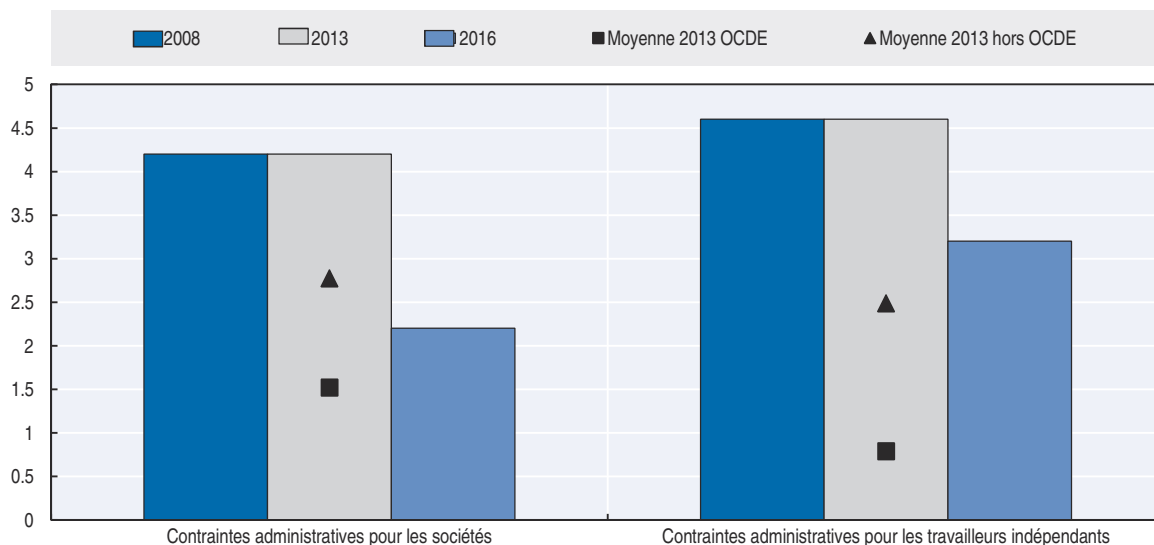
L'allocation des ressources humaines et financières se doit d'être plus efficace. Il convient à cet effet d'aligner les politiques-cadres visant à promouvoir la concurrence sur les marchés de produits, à assouplir les marchés du travail, ainsi qu'à supprimer les freins à la

sortie des entreprises et les obstacles à la croissance des plus prospères. Les ressources servant à la production doivent être bon marché et être orientées vers les entreprises qui sont en mesure de développer et d'utiliser les nouvelles technologies efficacement. Des conditions propices à l'allocation efficiente des ressources permettront en outre aux entreprises d'investir dans les processus, compétences et autres actifs immatériels qui peuvent amplifier les retombées des technologies, notamment numériques (OCDE, 2013). Cela dit, le poids excessif de la bureaucratie et de l'intervention directe des pouvoirs publics a souvent nui aux mécanismes du marché. Certaines politiques publiques fournissant des aides ciblées à des entreprises, technologies et produits particuliers ont ainsi entravé la concurrence. L'État est également intervenu de temps en temps dans la gestion des entreprises (Zhao, 2016). Nuisant également à la concurrence, des dispositifs variant selon le mode de contrôle et la taille des entreprises ont été mis en place. Bien que les obstacles à la création d'entreprises aient été réduits ces dernières années, il reste encore beaucoup à faire pour libérer l'entrepreneuriat (OCDE, 2017a).

En partie à cause des lacunes de l'action gouvernementale présentées ci-dessus, la politique industrielle de la Chine a donné des résultats mitigés. Dans la construction automobile, par exemple, elle n'a pas réussi à encourager l'augmentation des investissements intérieurs privés (Centre de recherche sur le développement, 2011). La politique industrielle a au contraire entravé ces investissements et rendu ce secteur fragile, fragmenté, peu développé et guère innovant. Dans le secteur automobile, les marques chinoises sont généralement peu connues, il n'y a pas de brevets indépendants dans les principaux domaines techniques, le personnel de R-D est rare et les travaux de recherche sont donc insuffisants (Jiang, 2016).


L'assouplissement des contraintes administratives pour les start-ups et la simplification des procédures ont permis de réduire dans l'ensemble les obstacles à l'entrepreneuriat (graphique 12.9). Néanmoins, la marge de progrès est encore grande pour rendre l'environnement plus propice à l'entrepreneuriat. Pour que le marché puisse fonctionner de façon optimale, il faut assouplir la réglementation économique, trop rigide, supprimer les mesures discriminatoires et réduire les obstacles à l'entrée et à la sortie (notamment en accélérant et en simplifiant les procédures de faillite) (OCDE, 2017a). Ces aménagements auront en outre pour avantage de créer un environnement plus équitable pour l'ensemble des acteurs. Parallèlement, il est important de prendre des mesures qui empêchent les leaders du marché de tirer avantage de leur technologie ou de leur puissance sur le marché pour faire obstacle aux nouveaux entrants. Une autre nécessité est d'évaluer en profondeur les impacts de la politique fiscale actuelle à la lumière des ambitions de *Made in China 2025* et « Internet Plus », et de simplifier les procédures fiscales (Administration fiscale nationale, 2016). Il sera peut-être aussi nécessaire de mettre en place des services financiers diversifiés afin de soutenir les entreprises travaillant dans les secteurs ayant un lien avec la prochaine révolution de la production (en particulier prêts à moyen et long termes, et financement sur fonds propres) (Banque populaire de Chine, 2016). Il convient également d'améliorer la qualité des brevets (déposés par les entreprises et les universités), notamment en rationalisant le dispositif de subventionnement des brevets et en veillant au respect des droits de propriété intellectuelle (en particulier ceux des petites entreprises) par l'imposition aux contrevenants d'amendes au montant dissuasif (OCDE, 2017a). Des mesures plus stratégiques peuvent aussi être nécessaires dans le domaine des normes, les projets de normes actuels tenant mieux compte des besoins de l'industrie (avec par exemple l'élaboration d'un ensemble de normes pour les données massives). Il pourrait également être utile que la Chine joue un rôle plus actif dans l'élaboration des normes internationales.

Graphique 12.9. **Les obstacles à l'entrepreneuriat**
Indicateur OCDE sur la réglementation des marchés de produits, 2008, 2013 et 2016



Note : La valeur de l'indicateur va de 0 à 6, soit du moins au plus restrictif.

Source : OCDE (2017d), Base de données sur la réglementation des marchés de produits (consultée en février 2017).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933680039>

L'expression « entreprises zombies » désigne des entreprises chinoises – souvent dans des secteurs en surcapacité – qui sont lourdement endettées, ont accumulé des pertes et ne sont maintenues à flot qu'à l'aide de prêts bancaires ou d'aides publiques. Ces entreprises produisent en continu, sans s'occuper de la hausse des coûts ni de la baisse des prix. En plus d'être incapables de se moderniser par elles-mêmes, elles absorbent les maigres ressources existantes et sont des concurrentes de taille pour les entreprises qui investissent dans les nouvelles technologies. En février 2016, le Conseil des Affaires d'État a émis des avis concernant la résolution du problème de surcapacité des secteurs du charbon et de l'acier. Outre les mesures de cessation ou de réduction de la production, l'introduction de la fabrication intelligente est mise en avant pour moderniser la sidérurgie et encourager un mode de production plus souple et plus ciblé. Dans cette réforme, des difficultés apparaissent, à savoir le contrôle de l'application des dispositions, ainsi que la gestion des disparitions d'emplois (1.8 million d'emplois environ risquent de disparaître dans le processus) (Zhong, 2016).

Améliorer l'innovation et la politique d'innovation

Le marché intérieur chinois demeure élastique par rapport au prix. Les entreprises parviennent généralement à obtenir des prix bas en ayant recours à l'imitation, à l'utilisation de matériaux de qualité médiocre, voire à la contrefaçon, ce qui est particulièrement décourageant pour les entreprises qui pourraient sinon investir dans l'innovation et la modernisation technologique. La mauvaise qualité des produits nuit par ailleurs globalement à l'image de *Made in China 2025*.

Le cas du stylo à bille présenté dans l'encadré 12.5 montre également combien il est difficile d'inciter les entreprises (en particulier celles du secteur privé) à s'engager sur la voie de la modernisation technologique et de la R-D. L'efficacité de la R-D du secteur privé est faible (OCDE, 2017a). De nombreuses entreprises privées chinoises hésitent à se doter

des toutes dernières technologies, que ce soit à cause de l'ampleur des investissements requis ou des incertitudes liées aux tendances et aux normes technologiques. Si on le compare avec celui des instituts de recherche ou des entreprises publiques, le rôle du secteur privé dans la recherche est également limité (tableau 12.2). Ainsi, plus de 70 % des brevets relatifs aux nanotechnologies et 50 % de ceux relatifs à la robotique sont déposés par les universités et les entreprises publiques (Organisation mondiale de la propriété intellectuelle, 2015). Il faut que les résultats des recherches faisant l'objet de ces brevets débouchent sur une commercialisation rentable.

Tableau 12.2. **Intensité de la R-D dans le secteur manufacturier et les industries de haute technologie d'une sélection de pays (en pourcentage)**

	Chine 2012	États-Unis 2007	Japon 2008	Allemagne 2007	France 2006	Royaume-Uni 2006	Corée 2006
Total du secteur manufacturier	1.1	3.4	3.4	2.3	2.5	2.4	1.9
Industries de haute technologie	1.8	16.9	10.5	6.9	7.7	11.1	5.9

Note : Dans le cas de la Chine, l'intensité de R-D correspond au pourcentage des dépenses de R-D par rapport au chiffre d'affaires de la principale activité.

Source : Ministère de la Science et de la Technologie (2013), *China High-Tech Industry Data Book*, d'après les données de Bureau national des statistiques, *China Statistics Yearbook on High Technology Industry (2013)* et base de données STAN de l'OCDE sur les dépenses de R-D dans les industries manufacturières 1995-2009 (<http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=STANI4#>).

Même les entreprises les plus innovantes rencontrent des problèmes lorsqu'elles essaient de mettre en œuvre de nouvelles technologies. Lors des sessions de 2016 de l'Assemblée populaire nationale (APN) et de la Conférence consultative politique du peuple chinois (CCPPC) – qui est la plus haute instance de consultation nationale en Chine, au sein de laquelle les grands administrateurs sont appelés à émettre des suggestions et des recommandations sur l'élaboration des politiques –, de nombreuses propositions ont été faites concernant les nouvelles technologies. Ces propositions insistaient surtout sur la nécessité d'établir des normes technologiques, de rationaliser la réglementation nationale applicable aux nouvelles formes d'activité générées par les nouvelles technologies (les services de transport à la demande Uber et Didi ont ainsi été légalisés en juillet 2016), et de modifier les lois et réglementations existantes afin d'encourager l'innovation individuelle.

La mondialisation est également source de nouvelles opportunités et de nouveaux défis pour le secteur manufacturier chinois. Ainsi, les entreprises chinoises considèrent de plus en plus les fusions et les acquisitions comme une possibilité de se moderniser (Deloitte et CMIF, 2015). À l'heure actuelle, les investissements à l'étranger réalisés par les entreprises chinoises se concentrent surtout dans les secteurs de l'exploitation minière, pétrolière et gazière. Or, des possibilités existent également dans les domaines des TIC, de la fabrication d'équipements haut de gamme et des nouveaux matériaux. La plus grosse opération de rachat réalisée en Chine, à savoir l'acquisition en 2015 par ChemChina du fabricant italien de pneus Pirelli, permettra à ChemChina de produire des pneus de première qualité et de s'élever dans la chaîne de valeur (KPMG, 2016). Toutefois, la faiblesse des capacités opérationnelles des entreprises chinoises (ressources humaines inadaptées et mauvaise compréhension des réglementations locales, par exemple) pourrait faire obstacle à leur expansion hors des frontières. Selon Bloomberg, des tentatives de rachat d'un montant de 47.5 milliards USD opérées par des entreprises chinoises ont échoué en 2015 (Gopalan et Langner, 2016). À mesure que la Chine oriente ses opérations de fusions-acquisitions à l'étranger vers des secteurs plus avancés, les difficultés risquent de s'accroître. Pour citer un exemple, en janvier, la société chinoise de capital-investissement Go Scale a été empêchée

par les États-Unis de racheter la branche éclairage de Philips (Lumileds), pour des motifs de sécurité (Sterling, 2016). La vente d'Aixtron, un fabricant de puces allemand, au fonds d'investissement chinois Fujian Grand Chip a également été bloquée (Chazan, 2016).

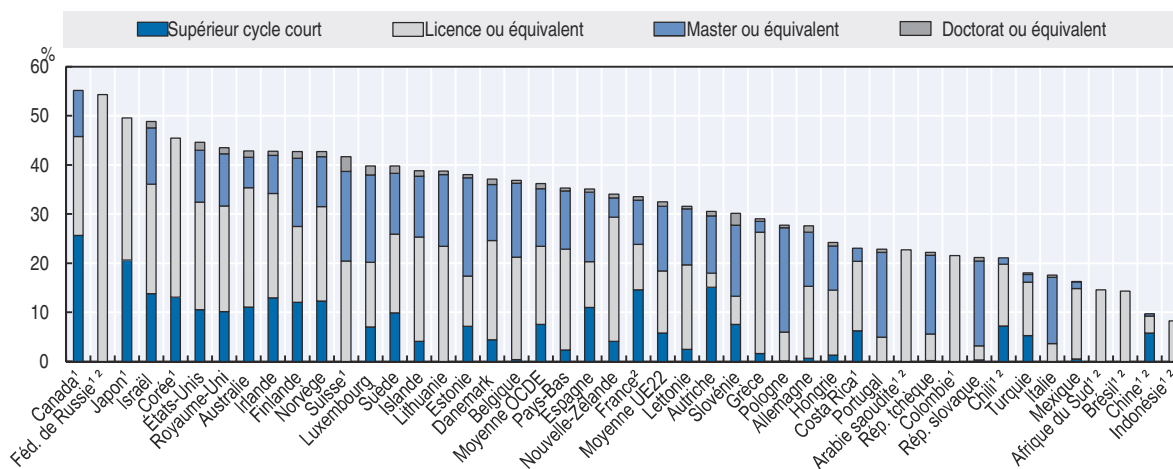
L'OCDE (2017a) suggère d'engager des réformes sur certains aspects de la politique publique qui ont des effets néfastes sur l'innovation. Plusieurs de ces réformes (comme la réduction des subventions pour les brevets) ont déjà été évoquées. D'autres mesures importantes doivent aussi être prises : remédier au faible niveau de collaboration entre les entreprises dans le domaine de l'innovation, et d'innovation collaborative entre les entreprises et les instituts de recherche ; garantir un traitement homogène entre les régions concernant la manière dont les aides sont accordées aux entreprises nouvelles et de haute technologie ; moderniser les services proposés par les parcs de haute technologie ; enfin, améliorer les procédures de sélection afin que le soutien à la R-D soit plus efficient.

Emploi et compétences

Les effets de la modernisation du secteur manufacturier se font sentir sur le marché du travail chinois, que ce soit en ce qui concerne les travailleurs étrangers, les ingénieurs ou les cadres. Xin Changxing, vice-ministre des Ressources humaines et de la Sécurité sociale, a indiqué début 2013 que le chômage structurel risquait de s'aggraver (Wang, 2013). La problématique de l'emploi est double : d'une part, il n'y a pas assez de travailleurs dotés de compétences adaptées ; d'autre part, il n'y a pas assez d'emplois pour les personnes non qualifiées. En 2013, on dénombrait en Chine 166 millions de travailleurs étrangers, dont 60 % âgés de moins de 30 ans et possédant un nombre d'années d'étude de 9.8 ans en moyenne (il faut 9 ans pour terminer le collège). Les rémunérations de ces travailleurs immigrés se sont accrues de 12 % par an entre 2011 et 2013 (Cai et Zhang, 2015). Dans ce contexte, les initiatives de remplacement des humains par des robots qui ont été lancées dans les provinces sont une réponse au manque de main-d'œuvre adaptée et à l'escalade des coûts des travailleurs plus instruits (Bai, 2014).

À mesure que le secteur manufacturier intègre plus de technologies (notamment les TIC), la demande de ressources humaines dotées de capacités et de compétences interdisciplinaires devrait s'accroître. Les résultats du Programme international pour le suivi des acquis des élèves (PISA) 2015 de l'OCDE montrent que les étudiants chinois arrivent dans les dix premières places du classement mondial pour les sciences et les mathématiques. En revanche, pour ce qui est des compétences en matière de programmation, de gestion et autres domaines non techniques, les résultats du PISA mettent en évidence des insuffisances (OCDE, 2015a). De manière plus générale, il existe en Chine une grande marge d'amélioration du niveau global d'éducation (graphique 12.10). La modernisation de l'industrie entraîne également la nécessité pour les cadres plus âgés de comprendre la technologie et ses répercussions pour le développement de l'entreprise. L'éducation et la formation continue sont importantes pour moderniser cet aspect de la gestion.

D'un autre côté, de nouvelles politiques s'imposent dans les domaines de l'éducation, de la santé et de la sécurité sociale afin de faire face aux besoins non seulement des travailleurs migrants internes, mais aussi d'une nouvelle vague de travailleurs indépendants. Une hausse du nombre des indépendants est à espérer suite au lancement des initiatives nationales de promotion de l'entrepreneuriat et de l'innovation à grande échelle, qui encouragent les citoyens – en particulier les chercheurs et les étudiants – à créer leur propre entreprise.


Graphique 12.10. **Pourcentage d'individus de 25-64 ans diplômés de l'enseignement supérieur, selon le niveau d'études (2015)**

1. Pour plus de détails, se reporter au tableau original.

2. L'année de référence n'est pas 2015 (Pour plus de détails, se reporter au tableau original).

Note : Les pays sont classés par ordre descendant du pourcentage d'individus de 25-64 ans diplômés de l'enseignement supérieur, tous niveaux confondus. Pour les autres notes, voir l'annexe 3 du document source.

Source : OCDE (2016a), *Regards sur l'éducation 2016 : les indicateurs de l'OCDE*, <http://dx.doi.org/10.1787/eag-2016-fr>.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933680058>

Infrastructures

La Chine obtient la note de 4.2 dans le *Network Readiness Index*, et arrive au 62^e rang parmi les 143 pays répertoriés (Dutta, Geiger et Lanvin, 2015). Le prix relativement élevé et le faible débit de l'internet chinois, ouvertement critiqués par le Premier ministre Li Keqiang, peuvent être améliorés. De gros écarts existent également entre les différentes régions et branches du secteur manufacturier en matière d'infrastructure (ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, 2015a). Il est important, pour la nouvelle génération de la production, qu'une nouvelle infrastructure industrielle soit mise en place (par exemple, des réseaux électriques décentralisés, l'internet des objets, l'internet mobile, l'informatique en nuage et les données massives), mais cela n'est pas encore totalement le cas.

Cybersécurité

En 2015, la Chine arrivait au 14^e rang parmi les 29 pays du *Global Cybersecurity Index* élaboré par l'Union internationale des télécommunications. Le nombre d'incidents de sécurité de l'information recensés entre décembre 2014 et novembre 2015 était en moyenne de 1 245, soit une hausse de 417 % par rapport à l'année précédente (PwC, 2015). À mesure que les TIC gagnent en importance dans les principales industries, et que l'internet des objets englobe un nombre et un éventail toujours plus grands d'appareils connectés, les enjeux de cybersécurité prennent de l'ampleur, de même que leurs implications financières. La société Hangzhou Xiongmai Technology, qui fabrique des caméras connectées, a rappelé plus de 10 000 webcams après que le service de gestion de noms de domaine Dyn aux États-Unis a fait l'objet d'une cyberattaque de grande ampleur ayant provoqué des perturbations sur les principaux sites web tels que Twitter, PayPal et Amazon. Les caméras auraient pu être piratées par des logiciels malveillants pour commettre des cyberattaques (Hern, 2016). C'est en rapport avec cet incident que la première loi chinoise sur la cybersécurité nationale a été approuvée par le Comité permanent de l'APN en novembre 2016. La Chine a peut-être besoin

de mener des études à long terme plus approfondies pouvant être utiles pour les lois et réglementations relatives à la cybersécurité et à la biotechnologie, notamment sur les questions de confidentialité des entreprises, de respect de la vie privée et de propriété intellectuelle (Centre de recherche sur le développement, 2016).

Gouvernance

Comme indiqué plus haut, la Chine a lancé un certain nombre d'initiatives pour moderniser sa production. Pourtant, il reste encore des marges d'amélioration. D'une part, malgré l'ampleur de ces récentes initiatives gouvernementales, il manque peut-être à l'action publique un caractère systématique. Dans toute économie moderne, le secteur de la production est soumis à toutes sortes de dispositions ayant trait notamment aux découvertes scientifiques, au développement technologique, au transfert des technologies et à l'internationalisation. L'action gouvernementale doit en outre associer et influencer les entreprises, les universités, les instituts de recherche, les institutions financières, l'État, les administrations locales et d'autres acteurs. Les instruments de cette action sont donc disséminés entre différentes instances publiques.

Il n'en reste pas moins que les politiques chinoises se rapportant à ces sujets pourraient avoir un caractère plus systématique. Les grandes initiatives ne couvrent pas encore l'ensemble de la chaîne de valeur, la totalité des acteurs concernés, ou les différentes dimensions spatiales de la question. Les ministères travaillent souvent en vase clos. Pour citer un exemple, la politique relative à la biomédecine est gérée par différents ministères : certains s'occupent de ses aspects sociaux (santé), d'autres de sa dimension économique (industrie). La réalisation des objectifs peut impliquer des arbitrages, ce qui signifie que l'élaboration et la coordination de l'ensemble des politiques devraient être confiées à un organe supérieur (comme le Conseil des Affaires d'État). De même, les objectifs visés par les différentes politiques ne sont pas les mêmes selon les domaines d'action : politique budgétaire, fiscalité, échanges, questions financières, investissement, industrie, concurrence, innovation, éducation, sécurité sociale ou régions. De plus, aucun dispositif complémentaire n'a encore été conçu ou coordonné dans le contexte de l'industrie 4.0.

En lien avec ce qui précède, la duplication des aménagements est un problème grave. Pour citer un exemple, à la fin 2012, 31 provinces, villes et régions autonomes accordaient des aides spéciales au secteur photovoltaïque dans le but de favoriser son développement. Quelque 300 villes ont établi des plans de développement du secteur, et plus d'une centaine ont construit l'infrastructure nécessaire à cet effet. L'industrie photovoltaïque a également bénéficié d'un accès préférentiel au foncier, au crédit et à d'autres moyens de production. Le problème est que ces incitations ont donné lieu à des investissements trop importants dans le secteur (Fu, 2014).

Dans le même esprit, après le lancement de *Made in China 2025*, les provinces et les villes chinoises ont conçu leurs propres programmes et plans d'action pour développer dix secteurs stratégiques. Dans tout le pays, des villes et des mégapoles frontalières ont mis sur pied des projets concernant notamment la robotique et les données massives, et construit des parcs industriels similaires. Le risque est que cela entraîne des surcapacités et une concurrence inutile. En fait, la duplication des actions a entraîné par le passé un gaspillage de terres constructibles ainsi que de ressources diverses (notamment humaines). Les projets de construction redondants ont en outre provoqué d'énormes pertes qui nuisent au développement à long terme des économies et des entreprises locales. À titre d'exemple, la ville de Qinhuangdao dans la province d'Hebei, le nouveau quartier de Guian à Guizhou, la

zone nouvelle de Chongqing Liangjiang, celle de Lanzhou, ainsi que Hangzhou et d'autres quartiers proposent de construire des pôles d'activité spécialisés dans les données massives. Parmi eux, le nouveau quartier de Gui'an à Guizhou, la zone nouvelle de Chongqing Liangjiang et celle de Lanzhou considèrent les données massives comme la principale industrie locale et mettent l'accent sur son développement dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme (Chen, 2014).

Les trois principaux opérateurs de télécommunications chinois ont mis en place de vastes centres de données ou d'informatique en nuage. China Telecom a ainsi établi plus de 330 centres de données internet. Il existe aujourd'hui une importante redondance en ce qui concerne la construction de centres d'informatique en nuage (Wang, 2016). Dans certaines zones ont été construits un grand nombre de centres de stockage de données et d'installations annexes (Ma, 2014). Pour citer un autre exemple, les politiques de redynamisation menées en 2009 ont donné lieu à des investissements excessifs dans certaines industries lourdes, et pourraient être l'une des raisons de la surcapacité actuelle (Zhao, 2016).

En conclusion, le constat évident qui émane de la description des politiques publiques qui sont menées à l'égard des technologies essentielles est qu'il existe un certain nombre de lacunes. S'agissant par exemple des technologies numériques : le transfert et la transposition des résultats de recherche au profit de l'industrie semblent recueillir peu d'attention ; l'infrastructure n'est pas au niveau ; la concurrence entre les services de l'infrastructure internet est faible ; la loi sur la cybersécurité a suscité des craintes auprès des entreprises étrangères (en particulier celles axées sur la technologie) ; la protection de la vie privée des individus et les risques numériques (autres que ceux liés à la sécurité nationale) ne semblent pas être des questions prioritaires. L'efficacité de certaines aides gouvernementales est également contestable. Les administrations locales ont par exemple tendance à subventionner la vente de robots au lieu d'investir dans les activités de R-D sur la robotique. Dans le domaine de la biotechnologie, les questions de durabilité de la biomasse ne sont visiblement pas prises en compte par les pouvoirs publics ; il n'existe aucune politique à l'égard des bioraffineries ; les normes sont peu développées (voire inexistantes) ; la mise en œuvre des politiques varie selon les régions. À ce sujet – et comme pour de nombreux autres points –, il est rare que les résultats des politiques publiques fassent l'objet d'évaluations systématiques.

Notes

1. Le marché de l'internet des objets inclut ici les puces et les composants électroniques, le matériel, les logiciels, les systèmes, ainsi que les services de télécommunication et de connexion.
2. Ce chiffre incluant la fabrication de TIC, les logiciels et les services informatiques.
3. Les technologies permettant les économies d'énergie et la protection de l'environnement ; les TIC de prochaine génération ; la biotechnologie ; la fabrication d'équipements de pointe ; les nouvelles sources d'énergie ; les nouveaux matériaux ; les véhicules à énergies nouvelles.
4. Ces domaines sont les suivants : entrepreneuriat et innovation, production synchronisée, agriculture moderne, énergie intelligente, financement accessible à tous, services sociaux, logistique efficiente, commerce électronique, transports, écologie et intelligence artificielle.

Références

- Accenture (2015), *How the Internet of Things Can Drive Growth in China's Industries*, Accenture.
- Administration fiscale nationale (2016), « 税务系统简化优化纳税服务流程方便纳税人办税实施方案 » [« Plan de simplification des procédures fiscales et d'amélioration des services »], Administration fiscale nationale, Pékin.
- Administration fiscale nationale (2015), « 税收给力“双创”出彩 » [La fiscalité au service de l'entrepreneuriat de masse et de l'innovation], Administration fiscale nationale, Pékin, www.chinatax.gov.cn/n810219/n810724/n1275550/c1902180/content.html.
- AliResearch (2015), *互联网+ : 从 IT 到 DT* [Internet plus, from IT to DT], China Machine Press, Pékin.
- Alvin Wu, N. P. (2016), « Strategy analytics: Mobile payment becomes a daily activity in China », communiqué de presse, 11 octobre, Strategy Analytics, www.strategyanalytics.com/strategy-analytics/news/strategy-analytics-press-releases/strategy-analytics-press-release/2016/10/11/strategy-analytics-mobile-payment-becomes-a-daily-activity-in-china#.WNEWt2_ytEY.
- Bai, T. (2014), « ‘机器换人’会影响就业吗? » [Est-ce que le remplacement des humains par les robots aura une incidence sur l'emploi?], *People's Daily*, 6 juin, Pékin.
- Baidu (2015), « 百度无人驾驶车完成路测,最高时速100公里 » [La voiture autonome de Baidu atteint une vitesse maximale de 100 km/h], <http://idl.baidu.com/IDL-news-26.html>.
- Banque populaire de Chine (2016), *关于金融支持工业稳增长调结构增效益的若干意见* [Opinions sur l'aide financière en faveur d'une croissance et d'une transformation industrielle robustes], Banque populaire de Chine, Pékin.
- Boston, W. (2016), « BMW loses core development team of its i3 and i8 electric vehicle line », *Wall Street Journal*, 20 avril, www.wsj.com/articles/bmw-loses-core-development-team-of-its-i3-and-i8-electric-vehicle-line-1461086049.
- Bureau d'État de la propriété intellectuelle de la République populaire de Chine (2015), *关于推广实施产业规划类专利导航项目的通知* [Avis sur la promotion des services de consultants en matière de brevets industriels], Bureau d'État de la propriété intellectuelle de la République populaire de Chine, Pékin.
- Bureau national des statistiques (2015), *China Statistics on Science and Technology Activities of Industrial Enterprises*, numéro 2006-15, China Statistics Press, Pékin.
- Bureau national des statistiques (2014), « Annual Data », <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- Cai, F. et C. Zhang (2015), *人口与劳动绿皮书: 中国人口与劳动问题报告 No. 16* [Rapport sur la population et l'emploi en Chine, n° 16], Social Science Academic Press, Pékin.
- Caijing (2012), « Monopoly to blame for online rail ticketing debacle », *Caijing*, 31 janvier, <http://english.caijing.com.cn/2012-01-31/111649311.html>.
- CCID Consulting (2015a), « 中国物联网和传感器发展报告 2015 » [Livre blanc sur le développement de l'internet des objets et l'industrie des capteurs en Chine, 2015], CCID Consulting, Pékin.
- CCID Consulting (2015b), « 中国云计算发展白皮书 2015 » [Livre blanc sur le développement de l'informatique en nuage en Chine, 2015], CCID Consulting, Pékin.
- CCTV (2016), « 世界互联网大会首次发布 15 项世界互联网领先科技成果 » [Les 15 plus importantes réalisations scientifiques et technologiques liées à l'internet révélées à l'occasion du 3e WIC], *CCTV News*, <http://news.cctv.com/2016/11/17/ARTIjLK4j7Gr1DgOwHT4xTb161117.shtml>.
- Centre de recherche sur le développement (2016), *中国制造 2025 政策体系研究* [Le cadre d'action pour Made in China 2025], Centre de recherche sur le développement, Pékin.
- Centre de recherche sur le développement (2011), « Automobile industry policy assessment », Centre de recherche sur le développement, Pékin.
- Chazan, G. (2016), « Germany withdraws approval for Chinese takeover of tech group », *Financial Times*, 24 octobre, www.ft.com/content/f1b3e52e-99b0-11e6-8f9b-70e3cabccfae.
- Chen, G. et Y. Wang (2015), « 中国生物基材料研究和产业化进展 » [Les biomatériaux en Chine : recherche et industrialisation], *生物工程学报* [Revue chinoise de biotechnologie], vol. 31, n° 6, pp. 955-967.
- Chen, H. (2015), « 全球首个生物工程角膜投产 » [Les biocornées en production], *People's Daily*, 24 mai, pp. 1.
- Chen, S. (2014), « 大数据恐慌 » [Données massives : la panique], *国际金融报* [International Finance News], 28 juillet, pp. A4.

- Chen, Y. et al. (2016), « DianNao family: energy-efficient hardware accelerators for machine learning », *Communications of the ACM*, vol. 59, numéro 11, pp. 105-112, <https://doi.org/10.1145/2996864>.
- Chen, Y. et al. (2014), « DaDianNao: A machine-learning supercomputer », 47th Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture, pp. 609-622, Cambridge, Royaume-Uni.
- China Academy of Information and Communication Technology (2015a), 中国大数据发展调查报告 2015 [Rapport de recherche sur le développement des données massives en Chine, 2015], China Academy of Information and Communication Technology, Pékin.
- China Academy of Information and Communication Technology (2015b), 中国公共云服务调查报告 2015 [Rapport de recherche sur le service infonuagique public en Chine, 2015], China Academy of Information and Communication Technology, Pékin.
- China Academy of Telecommunication Research (2014a), 2014 大数据白皮书 [Livre blanc sur les données massives, 2014], China Academy of Telecommunication Research, Pékin.
- China Academy of Telecommunication Research (2014b), 物联网白皮书 2014 [Livre blanc sur l'internet des objets, 2014], China Academy of Telecommunication Research, Pékin.
- China Banking Regulatory Commission (2013), 关于商业银行知识产权质押贷款业务的指导意见 [Opinions sur la charge de propriété intellectuelle des banques d'affaires], Commission chinoise de réglementation bancaire, Pékin.
- China South Daily (2015), « 全球最高精度 3D 打印项目今日投产 » [Le centre d'impression 3D entre en service], *China South Daily*, 23 juillet, pp. A10.
- Chinese Academy of Engineering (2015), 制造强国战略研究 [Recherche sur la stratégie énergétique du secteur manufacturier], Publishing House of Electronics Industry, Pékin.
- Chizkov, R.R. et R.P. Million (2015), « Disclosed agents awarded breakthrough therapy designation by the US FDA between juin 2014 and juin 2015 », *Nature Reviews Drug Discovery*, numéro 14, pp. 597-598, <http://dx.doi.org/doi:10.1038/nrd4717>.
- Commission municipale de la science et de la technologie de Tianjin (2014), « 天津富纳源创科技有限公司 打造核心产品 提升自主创新能力 » [CNTouch Tianjin s'emploie activement à renforcer ses capacités en matière d'innovation], Commission municipale de la science et de la technologie de Tianjin, www.tstc.gov.cn/zhengwugongkai/ztzl/kjgzhy/2014kjgzhy/dxfy/qy/201402/t20140212_63411.html.
- Conseil des Affaires d'État (2016), « 简政放权一年 红利逐步显现 » [Des effets positifs se font sentir un an après la simplification de la bureaucratie], Conseil des Affaires d'État, Pékin, www.gov.cn/zhengce/2016-01/11/content_5032064.htm.
- Conseil des Affaires d'État (2015a), 国务院关于实行市场准入负面清单制度的意见 [Opinions sur l'utilisation d'une liste négative], Conseil des Affaires d'État, Pékin.
- Conseil des Affaires d'État (2015b), 国务院关于新形势下加快知识产权强国建设的若干意见 [Plusieurs opinions du Conseil des Affaires d'État sur la montée en puissance des droits de propriété intellectuelle], Conseil des Affaires d'État, Pékin.
- Conseil des Affaires d'État (2015c), 国务院常务会议 [Réunion de direction], Conseil des Affaires d'État, Pékin, www.gov.cn/guowuyuan/gwycwhy201502/.
- Conseil des Affaires d'État (2013), 国务院关于印发生物产业发展规划的通知 [Plan national de développement de la bioindustrie], Conseil des Affaires d'État, www.gov.cn/zwgk/2013-01/06/content_2305639.htm.
- Conseil des Affaires d'État (2012), 关于加强战略性新兴产业知识产权工作若干意见的通知 [Avis sur l'amélioration de la propriété intellectuelle pour les industries émergentes d'importance stratégique], Conseil des Affaires d'État, Pékin.
- Conseil des Affaires d'État (2010), 国家中长期人才发展规划纲要 [Programme nationale de développement des talents à moyen et long termes], Conseil des Affaires d'État, Pékin.
- Cui, R. et B. Liu (2015), « 3D 打印: 升级传统制造业面临需求困境 » [Impression 3D – la modernisation du secteur manufacturier fait face à la demande], *163 Money*, 8 avril, <http://money.163.com/special/gongyefourth02/>.
- Deloitte et CMI (2015), « Digitalisation survey of Chinese manufacturing companies 2015 », Deloitte, Pékin.
- Deng, B. (2014), « First Chinese-made biologics slated for human trials in the West », *Nature*, vol. 20, n° 562, <http://dx.doi.org/doi:10.1038/nm0614-562>.
- Dutta, S., T. Geiger et B. Lanvin (2015), *The Global Information Technology Report 2015: ICTs for Inclusive Growth*, Forum économique mondial, Genève.

- Feng, B. (2015), « 中国制造 2025 即将发布 大力推进智能制造 » [Lancement de Made in China 2025], *National Business Daily*, 15 mai, www.nbd.com.cn/articles/2015-05-15/915959.html.
- Feng, F. (2015), « 让 3D 打印助力中国智造 » [L'impression 3D et Made in China], *China Intellectual Property News*, www.cipnews.com.cn/showArticle.asp?ArticleId=36018.
- Financial Times* (2016), « Midea edges towards Kuka acquisition », 8 août, www.ft.com/fastft/2016/08/08/midea-edges-towards-kuka-acquisition/.
- Fu, L. et G. Feng (2015), « 生物经济正成为中国经济的重要增长点 » [La biotechnologie gagne en importance dans l'économie chinoise], *Science and Technology Daily*, 24 juillet, http://digitalpaper.stdaily.com/http_www.kjrb.com/kjrb/html/2015-07/24/content_311596.htm?div=-1.
- Fu, W. (2014), « 产业政策该休息了 » [Une pause pour la politique industrielle chinoise], *Southern Metropolis Daily*, 18 juillet, <http://news.nandu.com/html/201407/18/1031873.html>.
- Gopalan, N. et C. Langner (2016), « Deal or no deal? », *Bloomberg*, www.bloomberg.com/gadfly/articles/2016-04-01/deal-or-no-deal.
- Gouvernement du Guangdong (2015), « 广东省人民政府关于印发广东省工业转型升级攻坚战三年行动计划(2015-2017年)的通知 » [Plan d'action du gouvernement de Guangdong pour la modernisation industrielle], Gouvernement de Guangdong, http://zwgk.gd.gov.cn/006939748/201503/t20150326_573873.html.
- GSMA (2015), *How China is Scaling the Internet of Things*, GSMA, www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/16531-China-IoT-Report-LR.pdf.
- Gu, Y. (2016), « 兄弟俩让人工智能更智能 » [Une intelligence artificielle plus intelligente], *People's Daily*, 30 novembre, pp. 16.
- Guo, X. et al. (2014), « Direct, non-oxidative conversion of methane to ethylene, aromatics, and hydrogen », *Science*, vol. 344, pp. 616-619, <http://dx.doi.org/10.1126/science.1253150>.
- Hanhua Technology (2013), « About us », page web, www.600844.com/sites/danhua/InfoContent.aspx?ctid=724c4a9f-7286-4bf7-99ae-2d62f77e8007&infoId=419ef999-eb5f-4c62-b70c-5eb13da58236.
- He, L. (2016), « 武汉获批“中国制造 2025”试点示范城市 » [Wuhan ville expérimentale pour « Made in China 2025 »], *Changjiang Daily*, 9 décembre, p. A1.
- He, Y. (2015), « 新松机器人：吹响中国智造 » [Siasun pour Made in China], *People's Daily*, 2 mai, <http://finance.people.com.cn/n/2015/0502/c1004-26936712.html>.
- Heo, I. (2013), « ITO's dominance in touch screens challenged by alternative technologies », communiqué de presse, IHS Markit, <https://technology.ihs.com/463729/itos-dominance-in-touch-screens-challenged-by-alternative-technologies>.
- Hern, A. (2016), « Chinese webcam maker recalls devices after cyberattack link », *The Guardian*, 24 octobre, www.theguardian.com/technology/2016/oct/24/chinese-webcam-maker-recalls-devices-cyberattack-ddos-internet-of-things-xiongmai.
- HSBC (2014), « Global connections report », HSBC, www.about.hsbc.ie/~media/ireland/en/news-and-media/hsbc-gc-global-overview-march14.pdf.
- Huang, X. (2015), « 我国 3D 打印产业体系有望明年建立 » [Le système industriel d'impression 3D de la Chine attendu pour 2016], ministère des Finances, www.mof.gov.cn/zhengwuxinxi/caijingshidian/jjrb/201503/t20150302_1196916.html.
- IDC (International Data Corporation) (2016), « The International Data Corporation (IDC) Worldwide Quarterly Server Tracker », page web, www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS41076116.
- IDC (2015), *Worldwide Internet of Things Forecast Update, 2015-2020*, International Data Corporation.
- Inagaki, K. (2015), « 软银、阿里巴巴、富士康将合资推机器人 » [Robot cofabriqu  par Softbank, Alibaba et Foxconn], *Financial Times*, 19 juin, www.ftchinese.com/story/001062620.
- International Federation of Robotics (2016), « Survey: 1.3 million industrial robots to enter service by 2018 », communiqué de presse, www.ifr.org/news/ifr-press-release/survey-13-million-industrial-robots-to-enter-service-by-2018-799/.
- International Federation of Robotics (2015), « World Robotics 2016 Industrial Robots », International Federation of Robotics, https://ifr.org/img/uploads/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_20161.pdf.
- IPO (Intellectual Property Office) (2014), « Eight Great Technologies: The Patent Landscapes », Intellectual Property Office, Newport, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/360986/Eight_Great_Technologies.pdf.

- Jiang, J.J. (2016), « 工信部：六个目标、六大任务、六项措施推进汽车强国建设 » [Mesures pour renforcer l'industrie automobile], *Xinhua News*, 3 septembre, http://news.xinhuanet.com/auto/2016-09/03/c_1119505254.htm.
- Johnson, R.C. (2014), « China takes lead in carbon nanotubes and graphene », *Eetimes*, 25 avril, www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1322105.
- Keutzer, K. (2016), « Technical perspective: If I could only design one circuit », *Communications of the ACM*, vol. 59, n° 11, pp. 104, <https://doi.org/10.1145/2996862>.
- KPMG (2016), *China Outlook 2016*, KPMG, Pékin.
- Le, Q. et al. (2012), « Building high-level features using large scale unsupervised learning », 29e conférence internationale sur l'apprentissage automatique, Edimbourg.
- Li, H. (2015), « 3D 打印太尔时代：在巨头进入前占领中国市场 » [Tiertime occupe le marché chinois avant les acteurs internationaux], *Forbes China*, 15 janvier, <http://tech.163.com/15/0115/15/AGOQNNQSC00094ODU.html>.
- Li, K. (2015), « 催生新的动能 实现发展升级 » [De nouveaux moteurs du développement et de la modernisation], *Qiu Shi Journal*, vol. 20.
- Li, Q. (2015), « 马云：未来 30 年是最令人 ‘ 恐慌恐惧 ’ 的 30 年 » [Les 30 prochaines années seront les plus spectaculaires], *Xinhua News*, 25 mai, http://news.xinhuanet.com/info/2015-05/26/c_134272125.htm.
- Li, X. (2016), « “ 云上 ” 的铁总 » [China Railway sur le nuage], *Time Weekly*, 2 février, www.time-weekly.com/html/20160202/32547_1.html.
- Liu, C. (2015), « Siasun cleans up the competition », *Asia Weekly*, 26 juin, <http://epaper.chinadailyasia.com/asia-weekly/article-4683.html>.
- Liu, X. et al. (2017), « Beyond catch-up – Can a new innovation policy help China overcome the middle income trap? », *Sci Public Policy*, numéro scw092, <https://doi.org/10.1093/scipol/scw092>.
- Ma, L. (2016), « 31 省 GDP 详解：粤苏鲁持续领跑多地对接中国制造 2025 » [Les provinces se donnent des politiques pour s'associer à Made in China 2025], *People.cn*, <http://leaders.people.com.cn/n1/2016/0129/c58278-28096203.html>.
- Ma, Y. (2014), « 大数据产业发展调查之五：谨防重复建设遍地开花 » [Gare au double emploi – cinquième thématique spéciale du développement des données massives en Chine], *China Finance Information Network*, www.cbdi.com/html/2014-12/25/content_2109548.htm.
- Min, J. (2015), « 3D 打印工业应用难推广 源于中国工业化缺失 » [L'absence de normes industrielles entrave l'utilisation de l'impression 3D], *China Electronics News*, http://cyyw.cena.com.cn/2015-09/07/content_291620.htm.
- Minglamp Consulting (2015), « 2015 中国大数据应用前沿调研报告 » [La recherche sur l'application des données massives à l'industrie en Chine, 2015], Pékin.
- Ministère de la Protection de l'environnement (2012), « 废物资源化科技工程 ‘ 十二五 ’ 专项规划 » [12e plan quinquennal sur la valorisation des déchets], ministère de la Protection de l'environnement, Pékin.
- Ministère des Finances (2014), 关于完善固定资产加速折旧企业所得税政策的通知 [Améliorer les dispositions fiscales relatives à l'amortissement accéléré des immobilisations des entreprises], ministère des Finances, Pékin.
- Ministère des Finances (2010), 关于居民企业技术转让有关企业所得税政策问题的通知 [Questions de fiscalité concernant le transfert de technologie par les entreprises résidentes], ministère des Finances, Pékin.
- Ministère des Finances (2007a), 科技开发用品免征进口税收暂行规定 [Remboursement des taxes à l'importation d'articles de R-D], ministère des Finances, Pékin.
- Ministère des Finances (2007b), 关于落实国务院加快振兴装备制造业的若干意见有关进口税收政策的通知 [Mesures concernant les taxes à l'importation, visant à renforcer le secteur manufacturier], ministère des Finances, Pékin.
- Ministère des Finances (2006), 关于企业技术创新有关企业所得税优惠政策的通知 [Dispositions fiscales relatives à l'innovation technologique dans les entreprises], ministère des Finances, Pékin.
- Ministère du Logement et du Développement urbain-rural (2015), 关于公布国家智慧城市 2014 年度试点名单的通知 [liste des projets pilotes de villes intelligentes, 2014], ministère du Logement et du Développement urbain-rural, Pékin.
- Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information (2015a), « 赛迪研究院发布 2014 年中国信息化发展水平评估报告 » [rapport d'évaluation de la transformation numérique en Chine, publié par CCID Consulting, 2014], ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, Pékin, www.miit.gov.cn/n11293472/n11293832/n11293907/n11368223/16405769.html.

- Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information (2015b), 2014 年电子信息产业统计公报 [Statistiques de 2014 sur le secteur chinois des TI], ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, Pékin, www.miit.gov.cn/n1146312/n1146904/n1648373/c3337253/content.html.
- Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information (2015c), « 中国制造 2025 解读 » [Réflexions sur Made in China 2025], ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, Pékin, www.miit.gov.cn/n11293472/n11293877/n16553775/.
- Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information (2015d), « 苗圩接受中央媒体集体采访 » [Interview officielle de Miao Yu], ministère de l'Industrie et des Technologies de l'information, Pékin, Xinhua Net, http://news.xinhuanet.com/info/2015-03/07/c_134045854.htm.
- Ministère de la Science et de la Technologie (2015a), 农业废弃物 (秸秆、粪便) 综合利用技术成果汇编 [Solutions technologiques pour l'utilisation des déchets agricoles (paille, purin)], ministère de la Science et de la Technologie, Pékin.
- Ministère de la Science et de la Technologie (2015b), « 十二五国家科技支撑计划制笔行业关键材料及制备技术研发与产业化项目通过验收 » [Le projet sur les matériaux et technologies de traitement clés de la fabrication de stylos est achevé], ministère de la Science et de la Technologie, Pékin, www.most.gov.cn/kjbgz/201503/t20150326_118737.htm.
- Ministère de la Science et de la Technologie (2015c), « 2015 年全国科技经费投入统计公报 » [Dépenses de R-D en 2015], www.most.gov.cn/kjbgz/201611/P020161118627899534071.doc.
- Ministère de la Science et de la Technologie (2014), 关于 2014 年度第一批科技型中小企业创业投资引导基金阶段参股项目立项的通知 [Liste des projets des start-ups de pointe et fonds pour les PME, 2014], ministère de la Science et de la Technologie, Pékin.
- Ministère de la Science et de la Technologie (2013), *China High-Tech Industry Data Book*, ministère de la Science et de la Technologie, Pékin.
- Ministère de la Science et de la Technologie (2012a), « 纳米研究等 6 个国家重大科学研究计划“十二五”专项规划 » [12e plan quinquennal sur la recherche en nanotechnologies et six autres projets scientifiques et technologiques clés], ministère de la Science et de la Technologie, Pékin.
- Ministère de la Science et de la Technologie (2012b), « 纳米研究国家重大科学研究计划 » [Explication du 12^e plan quinquennal sur la recherche en nanotechnologies], ministère de la Science et de la Technologie, Pékin, www.most.gov.cn/kjbgz/201207/t20120713_95581.htm.
- Ministère de la Science et de la Technologie (2011), 关于印发十二五生物技术的发展规划的通知 [12^e plan quinquennal sur les biotechnologies], ministère de la Science et de la Technologie, Pékin, www.most.gov.cn/fggw/zfuj/zfuj2011/201111/W020111128572620628742.doc.
- Ministère de la Science et de la Technologie (2007), 我国信息产业拥有自主知识产权的关键技术和重要产品目录 [Liste des technologies et produits clés eu égard à la propriété intellectuelle], ministère de la Science et de la Technologie, Pékin.
- Nandu Daily (2015), « 节前春运票已发售 1.3 亿张 下周二网上可买返程高峰票 » [130 millions de billets sont vendus avant le festival du printemps et les billets retour peuvent être réservés jusqu'à mardi prochain], Nandu Daily, 11 décembre, www.oeeee.com/nis/201512/11/409114.html.
- Nature (2013), « Sharing data in materials science », *Nature*, vol. 503, numéro 7477, pp. 463-464.
- OCDE (2017a), *OECD Economic Surveys: China 2017*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/eco_surveys-chn-2017-en.
- OCDE (2017b), *R&D Tax Incentive Indicators*, base de données, <http://oe.cd/rntax> (consultée le février 2017).
- OCDE (2017c), *Main Science and Technology Indicators*, base de données, <http://oe.cd/msti> (consultée le février 2017).
- OCDE (2017d), *Product Market Regulation*, base de données (consultée le février 2017).
- OCDE (2017e), base de données TiVA, <https://stats.oecd.org/index.aspx?queryid=66237> (consultée le janvier 2017).
- OCDE (2016a), *Regards sur l'éducation 2016: Les indicateurs de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/eag-2016-fr>.
- OCDE (2016b), *STI Micro-data Lab: Intellectual Property*, base de données, <http://oe.cd/ipstats> (consultée en octobre 2016).
- OCDE (2015a), *Études économiques de l'OCDE : Chine 2015*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/eco_surveys-chn-2015-fr.
- OCDE (2015b), « Part des pays dans les demandes de brevets en biotechnologie déposées en vertu du PCT, 2006 », *Indicateurs de biotechnologie de l'OCDE*, www.oecd.org/fr/sti/sci-tech/43417724.xls.

- OCDE (2013), *Supporting Investment in Knowledge Capital, Growth and Innovation*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264193307-en>.
- OFweek (2015), « 探索未来云制造:指尖上的智能工厂 » [Une usine intelligente au bout de vos doigts], OFweek, <http://gongkong.ofweek.com/2015-09/ART-310008-8470-29010921.html>.
- OMPI (2015), « Rapport 2015 sur la propriété intellectuelle dans le monde : innovations majeures et croissance économique », Organisation mondiale de la propriété intellectuelle, Genève, www.wipo.int/edocs/pubdocs/fr/wipo_pub_944_2015.pdf.
- Parker, M.A. (2015), « Terry Wohlers reports on the state of additive manufacturing at Inside 3D Printing Seoul », 3dprint.com, <https://3dprint.com/76140/wohlers-inside-3d-printing/>.
- Peng, Y., L. Feng et Y. Bai (2015), « 鲁先平：14年的执着只为中国原创新药春暖花开 » [La promotion de la médecine traditionnelle en Chine], Xinhua News, 22 mai, http://news.xinhuanet.com/tech/2015-05/22/c_1115379310.htm.
- PwC (PricewaterhouseCoopers) (2015), « Companies in China see five-fold rise in average detected information security incidents in 2015 », <http://pwchk.com>, www.pwchk.com/home/printeng/pr_101215.html.
- Ren, M. (2014), « 飞机钛合金起落架可3D打印 » [L'impression 3D pour les trains d'atterrissage en alliage de titane], Beijing Daily, 9 janvier, <http://tech.hexun.com/2014-01-09/161273352.html>.
- Ren, S. (2016), « 教育部机器人学中小学课程教学指南专家论证会在京召开 » [Évaluation d'experts sur la formation à la robotique au primaire et au secondaire], Beijing Times, 22 janvier, http://epaper.jinghua.cn/html/2016-01/22/content_275548.htm.
- Reuters (2015), « Global industrial robot sales rose 27% in 2014 », Reuters, 22 mars, www.reuters.com/article/industry-robots-sales-idUSL6N0WM1NS20150322.
- Science China (2013), « 纳米花开百姓家 走进北京科技周生态小屋 » [Les nanosciences améliorent la qualité de vie], Science China, 20 mai, http://science.china.com.cn/2013-05/20/content_28876940.htm.
- Sciencenet (2015), « 两院院士评选中国世界十大科技进展新闻揭晓 » [Les 10 progrès scientifiques les plus remarquables dans le monde et en Chine], Sciencenet, <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2015/1/312680.shtm>.
- Shen, Z. (2015), « 中国国产工业机器人同比增长77% » [La production nationale de robots augmente de 77 %], Economic Daily, 13 juillet, http://tech.ce.cn/news/201507/13/t20150713_5913227.shtml.
- Statista (2014), « Largest machine tool manufacturers in FY 2014, based on machine tool revenue », Statista, www.statista.com/statistics/270234/largest-machine-tool-manufacturers-based-on-revenue/.
- Sterling, T. (2016), « US blocks Philips' \$3.3 billion sale of Lumileds to Asian buyers », Reuters, 22 janvier, www.reuters.com/article/us-philips-lumileds-sale-idUSKCN0V02D4.
- STM Stieler et IoT ONE (2016), « Growing from big to strong », www.stm-stieler.de/files/558:A_Pragmatic_Assessment_of_Chinese_Industrial_Automation_2016_08_22.pdf.
- Su, Y. (2014), « 中国物联网的无锡实验 » [L'expérience de l'internet des objets à Wuxi], Guangming Daily, 24 avril.
- Teng, J. (2016), « 春晚红包背后的云计算 » [« L'infonuagique au service du gala du Nouvel an »], Science and Technology Daily, 22 février, pp. 8.
- Thompson, J. (2016), « Midea edges towards Kuka acquisition », Financial Times, 8 août, www.ft.com/fastft/2016/08/08/midea-edges-towards-kuka-acquisition/.
- Voegelé, E. (2014), « Joint venture formed to develop cellulosic biorefinery in China », Ethanol Producer Magazine, 29 juillet, www.ethanolproducer.com/articles/11292/joint-venture-formed-to-develop-cellulosic-biorefinery-in-china.
- Wang, B. (2013), « 产业转型必然导致结构性失业 » [La transformation industrielle engendrera un chômage structurel], Caixin, 13 août, <http://china.caixin.com/2013-08-13/100568777.html>.
- Wang, C. (2016), « 警惕数据中心产能过剩现象 » [Centres de données : gare à la surcapacité], People's Post and Telecommunication News, 21 avril, p. 7.
- Wang, S. (2015), « A new cancer drug, made in China », Wall Street Journal, 2 avril, www.wsj.com/articles/a-new-cancer-drug-made-in-china-1428004715.
- Wu, Y. (2014), « 四川省战略性新兴产业第一个产业发展“路线图”出炉 » [La première feuille de route du Sichuan pour les industries stratégiques émergentes], Sichuan Daily, 1er août, www.sc.xinhuanet.com/content/2014-08/01/c_1111891733.htm.

- Xinhua (2016), « 2016 双 11 阿里交易额 1207 亿元 » [Le chiffre d'affaires d'Alibaba atteint 120.7 milliards RMB sales in 2016], *Xinhua News*, 12 novembre, http://news.xinhuanet.com/fortune/2016-11/12/c_1119899446.htm.
- Xinhua (2015), « 我国首个 3D 打印人体植入物获 CFDA 注册批准 » [Le premier implant chinois imprimé en 3D est homologué par la CFDA], *Xinhua News*, 1er septembre, http://news.xinhuanet.com/health/2015-09/01/c_128188117.htm.
- X-lab (2014), « AOD 智能 3D 打印机 » [Introduction de l'imprimante 3D AOD], page web, X-lab, www.x-lab.tsinghua.edu.cn/?c=presidentCup&a=xmzsShow&id=28.
- Yan, S. (2014), « Chinese spend billions in world's biggest online shopping day », *CNN Money*, 11 novembre, <http://money.cnn.com/2014/11/10/investing/alibaba-singles-day-china/index.html>.
- Yang, Jing (2015), « Seeing the world through pigs' eyes: Chinese firm to launch artificial cornea », *South China Morning Post*, 29 juillet, www.scmp.com/business/china-business/article/1844830/seeing-world-through-pigs-eyes-chinese-firm-launch.
- Yang, Jun (2015), « 智造，中国制造的未來路径 » [L'avenir du secteur manufacturier chinois passe par la fabrication intelligente], *Guangming Daily*, 28 mai, pp. 13.
- Yue, H., C. Ling et T. Yang (2014), « A seawater-based open and continuous process for polyhydroxyalkanoates production by recombinant *Halomonas campaniensis* LS21 grown in mixed substrates », *Biotechnology for Biofuels*, vol. 7, n° 1, pp. 108.
- Zhang, D. et al. (2013), « 纳米技术在高性能电力复合绝缘材料中的工程应用 » [Les applications industrielles des nanotechnologies dans les composites isolants hautes performances], *China Science, Chemistry*, vol. 43, n° 6, pp. 725-743.
- Zhao, C. (2016), *新时期中国产业政策研究* [La politique industrielle de la Chine entre dans une ère nouvelle], China Development Press, Pékin.
- Zhong, Q. (2016), « 钢铁煤炭业去产能 约 180 万职工涉及分流安置 » [Les surcapacités dans les secteurs de l'acier et du charbon concernent 1.8 million d'emplois], *China News*, 29 février, www.chinaneews.com/cj/2016/02-29/7777138.shtml.
- Zhu, X. (2015), « 富士康江苏昆山工厂关灯，机器换人 » [Les robots remplacent les humains chez Foxconn à Kunshan], *China News*, 22 mai, <http://finance.chinaneews.com/cj/2015/05-22/7295622.shtml>.

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

L'OCDE est un forum unique en son genre où les gouvernements œuvrent ensemble pour relever les défis économiques, sociaux et environnementaux que pose la mondialisation. L'OCDE est aussi à l'avant-garde des efforts entrepris pour comprendre les évolutions du monde actuel et les préoccupations qu'elles font naître. Elle aide les gouvernements à faire face à des situations nouvelles en examinant des thèmes tels que le gouvernement d'entreprise, l'économie de l'information et les défis posés par le vieillissement de la population. L'Organisation offre aux gouvernements un cadre leur permettant de comparer leurs expériences en matière de politiques, de chercher des réponses à des problèmes communs, d'identifier les bonnes pratiques et de travailler à la coordination des politiques nationales et internationales.

Les pays membres de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Australie, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Chili, la Corée, le Danemark, l'Espagne, l'Estonie, les États-Unis, la Finlande, la France, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Islande, Israël, l'Italie, le Japon, la Lettonie, le Luxembourg, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, les Pays-Bas, la Pologne, le Portugal, la République slovaque, la République tchèque, le Royaume-Uni, la Slovénie, la Suède, la Suisse et la Turquie. La Commission européenne participe aux travaux de l'OCDE.

Les Éditions OCDE assurent une large diffusion aux travaux de l'Organisation. Ces derniers comprennent les résultats de l'activité de collecte de statistiques, les travaux de recherche menés sur des questions économiques, sociales et environnementales, ainsi que les conventions, les principes directeurs et les modèles développés par les pays membres.

La prochaine révolution de la production

CONSÉQUENCES POUR LES POUVOIRS PUBLICS ET LES ENTREPRISES

Cette publication examine les possibilités et les défis que présentent pour les entreprises et les pouvoirs publics les technologies qui préparent l'avènement de la « prochaine révolution de la production », à savoir diverses technologies numériques (p. ex., l'internet des objets et la robotique avancée), les biotechnologies industrielles, l'impression 3D, les nouveaux matériaux et les nanotechnologies. Certaines de ces technologies sont déjà présentes dans les processus de production, d'autres seront accessibles sous peu. Mais toutes se développent rapidement. À mesure qu'elles transformeront les activités de production et de distribution des biens et services, elles auront une influence considérable sur la productivité, les compétences, la distribution des revenus, le bien-être et l'environnement. Mieux les pouvoirs publics et les entreprises sauront appréhender cette transformation prochaine de la production, mieux ils seront à même d'en maîtriser les risques et d'en concrétiser les avantages.

Veillez consulter cet ouvrage en ligne : <http://dx.doi.org/10.1787/9789264280793-fr>.

Cet ouvrage est publié sur OECD iLibrary, la bibliothèque en ligne de l'OCDE, qui regroupe tous les livres, périodiques et bases de données statistiques de l'Organisation.

Rendez-vous sur le site www.oecd-ilibrary.org pour plus d'informations.

