



Science, technologie et innovation : Perspectives de l'OCDE 2016



Science, technologie et innovation : Perspectives de l'OCDE 2016

Cet ouvrage est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE. Les opinions et les interprétations exprimées ne reflètent pas nécessairement les vues de l'OCDE ou des gouvernements de ses pays membres.

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), *Science, technologie et innovation : Perspectives de l'OCDE 2016*, Éditions OCDE.
http://dx.doi.org/10.1787/10.1787/sti_in_outlook-2016-fr

ISBN 978-92-64-28796-9 (imprimé)

ISBN 978-92-64-28789-1 (PDF)

ISBN 978-92-64-29009-9 (ePub)

Biannuel

ISSN 2518-6280 (imprimé)

ISSN 2518-6175 (en ligne)

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 : © Renaud Modigner for the OECD.

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.

Avant-propos

Science, technologie et innovation : Perspectives de l'OCDE 2016 est la onzième édition d'une publication biennale qui fait le point sur les principales évolutions concernant la science, la technologie et l'innovation (STI) dans les pays de l'OCDE, ainsi que dans un certain nombre d'économies partenaires majeures : Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Chine, Colombie, Costa Rica, Égypte, Fédération de Russie, Inde, Indonésie, Lituanie, Malaisie, Pérou et Thaïlande. Cette publication a pour but d'informer les décideurs responsables des politiques STI, les représentants des entreprises et les analystes sur les évolutions récentes et attendues des structures mondiales de la science, de la technologie et de l'innovation, et d'en mesurer les implications actuelles et futures pour les politiques STI aux niveaux national et mondial.

Les Perspectives STI 2016 se démarquent des éditions précédentes par une approche plus prospective. Le chapitre 1 examine les **mégatendances** qui devraient avoir des incidences notables sur l'économie mondiale et le financement de l'innovation, l'avenir de la société et ses relations avec la STI, et sur l'État moderne et les politiques STI à venir. Le chapitre 2 passe en revue les **dix technologies clés émergentes** les plus prometteuses qui sont susceptibles d'induire les bouleversements les plus profonds et comportent des risques importants (données massives, internet des objets, intelligence artificielle, impression 3D, microsattellites, neurotechnologies, biologie de synthèse, nanomatériaux, technologies avancées de stockage de l'énergie et chaîne de blocs). Le chapitre 3 envisage l'**avenir des systèmes scientifiques** à un horizon de 10 à 15 ans et aborde, sous un angle prospectif, des questions liées à la multidisciplinarité, à l'excellence, au financement ciblé, à la science ouverte, à la transformation numérique de la science, à l'attractivité des carrières scientifiques, ou encore à la reproductibilité des résultats de la recherche.

Les Perspectives STI 2016 présentent également les évolutions récentes de la STI à la lumière de la reprise économique fragile, de la pénurie des financements à l'appui de l'innovation et de la création d'entreprises, des contraintes budgétaires croissantes, de la mondialisation et des grands défis sociétaux (changement climatique, vieillissement de la population ou creusement des inégalités). Le chapitre 4 fait un **tour d'horizon des évolutions récentes et des perspectives de la STI et des politiques nationales**. Il introduit une série de **profils thématiques des politiques STI** permettant une comparaison internationale des orientations, des instruments et de la gouvernance des politiques STI, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la zone OCDE. Les **profils STI par pays** éclairent quant à eux sur les systèmes d'innovation nationaux : leurs caractéristiques structurelles, leurs performances STI, mesurées au moyen d'un certain nombre d'indicateurs harmonisés, et les évolutions récentes qui ont marqué les politiques STI nationales. L'édition 2016 examine les priorités et initiatives STI nationales introduites entre 2014 et 2016.

La publication fait fond sur les tout derniers travaux empiriques et analytiques de l'OCDE dans les domaines touchant l'innovation et les politiques qui s'y rapportent. Elle s'appuie sur les réponses des pays membres et partenaires à l'enquête internationale sur les politiques dans les domaines de la science, de la technologie et de l'innovation (**International Survey of Science, Technology and Innovation Policy, STIP**), menée conjointement par la Commission européenne et l'OCDE, qui

succède au questionnaire biennal sur les politiques STI, utilisé pour préparer les éditions précédentes des Perspectives STI. Elle met également à profit un dispositif statistique de plus de 300 indicateurs, résultat des efforts menés de longue date par l'OCDE pour bâtir un système de mesures comparables au plan international pour le suivi des activités et des politiques STI, ainsi que les travaux récents visant à élaborer des indicateurs STI de nature plus expérimentale.

Enfin, l'édition 2016 des Perspectives constitue l'un des premiers piliers de la Plateforme des politiques d'innovation (IPP) OCDE-Banque mondiale, un espace web interactif donnant accès à des données ouvertes, des ressources pédagogiques et des possibilités d'apprentissage collectif concernant les politiques d'innovation.

Remerciements

Les *Perspectives STI* sont préparées sous l'égide du Comité de la politique scientifique et technologique (CPST) de l'OCDE, avec le concours de ses groupes de travail. Les délégués du CPST ont apporté une précieuse contribution à la présente édition par leurs réponses à l'enquête internationale sur les politiques dans les domaines de la science, de la technologie et de l'innovation (International Survey of Science, Technology and Innovation Policy, STIP), menée conjointement par la Commission européenne (CE) et l'OCDE (et qui succède au questionnaire biennal sur les politiques STI, utilisé pour préparer les éditions précédentes des *Perspectives STI*), ainsi que par leurs observations sur les versions préliminaires des chapitres.

Fruit d'un effort collectif, les *Perspectives STI 2016* procèdent d'une approche horizontale, coordonnée par la Division de la politique de la science et de la technologie (STP) de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation (DSTI) de l'OCDE. Elles ont été élaborées sous la direction de Dominique Guellec. La coordination générale a été assurée par Sandrine Kergroach, et la coordination administrative par Sylvain Fraccola.

Le chapitre 1, « Mégatendances influant sur la science, la technologie et l'innovation », a été préparé par Michael Keenan et Sandrine Kergroach, avec le concours de Sylvain Fraccola pour la conception des infographies. Ozcan Saritas (Higher School of Economics), Barrie Stevens (Programme international sur l'avenir) et Gabriel Velloso (Karlsruher Institut für Technologie) ont apporté des contributions particulièrement utiles. Merci à Vincent Finat-Duclos, de la Direction des relations extérieures et de la communication de l'OCDE (PAC), pour ses éclairages sur la visualisation.

Le chapitre 2, « Futures tendances technologiques : espoirs et craintes », a été rédigé par Andrés Barreneche, Steffi Friedrichs, Hermann Garden, Claire Jolly, Sandrine Kergroach, Jim Philp et Jakob Prüß, sous la direction de Michael Keenan. Il s'appuie sur les travaux menés par le Groupe de travail de l'OCDE sur la politique de l'innovation et de la technologie (TIP), le Groupe de travail sur les biotechnologies, les nanotechnologies et les technologies convergentes (GTBNTC) et le Forum de l'espace de l'OCDE. Il a en outre bénéficié du concours de Charlotte van Ooijen, de la DSTI, d'Alexandra Mogyoros, de l'Université d'Oxford, et de Darja Vrščaj, de l'Université technique d'Eindhoven. Anne Carblanc et Molly Leshner ont formulé des commentaires à la lumière des activités menées actuellement par le Comité de la politique de l'économie numérique de l'OCDE (CPEN).

Le chapitre 3, « L'avenir des systèmes scientifiques », a été préparé par Michael Keenan et Sandrine Kergroach, avec le concours, pour les recherches, d'Alexandra Mogyoros, de l'Université d'Oxford et de Darja Vrščaj, de l'Université technique d'Eindhoven. Plusieurs experts externes ont également fait part de leurs observations : Wiebe Bijker, de l'Université de Maastricht, Philip Boucher, du service de prospective scientifique de l'Unité d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (STOA) du Parlement européen (dénommée, au moment de l'entretien, Unité prospective et approches comportementales du CCR de la Commission

européenne), Arie Rip, de l'Université de Twente, Tsjalling Swierstra, de l'Université de Maastricht, Barend van der Meulen, de l'Institut Rathenau, Harro van Lente, de l'Université de Maastricht, Geert Verbong, de l'Université technique d'Eindhoven, Werner Wobbe, de l'unité de prospective de la DG RTD de l'Union européenne (au moment de l'entretien), et Sally Wyatt, de l'Université de Maastricht. Leurs contributions ont été recueillies lors d'entretiens en face à face menés par Darja Vrscaj dans le cadre de la préparation des *Perspectives STI 2016* de l'OCDE.

Les chapitres 1, 2 et 3 ont été conçus et préparés à l'issue d'un exercice prospectif réalisé en 2015-16 et codirigé par Michael Keenan et Sandrine Kergroach. Une série d'ateliers internes et externes a été organisée dans le cadre de cet exercice, avec la participation de collègues non seulement de la DSTI, mais aussi d'autres directions et organes de l'OCDE : le Centre pour l'entrepreneuriat, les PME et le développement local (CFE), la Direction de l'éducation et des compétences (EDU), la Direction de l'emploi, du travail et des affaires sociales (ELS), la Direction de l'environnement (ENV), la Direction de la gouvernance publique et du développement territorial (GOV), la Direction des échanges et de l'agriculture (TAD), le Secrétariat général, le Forum mondial de la science (FMS), l'Agence internationale de l'énergie, le Programme international sur l'avenir et le Forum international des transports. Les chapitres à visée prospective se sont également nourris des débats menés lors d'ateliers dédiés auxquels ont pris part les délégués des pays auprès du CPST, du TIP et du FMS. Des ateliers réduits ont également été organisés en Corée, aux États-Unis et en Chine avec le concours de, respectivement, Byeongwon Park (Science and Technology Policy Institute, Corée), Susan Fridy (Centre OCDE de Washington) et Mu Rongping (Institute of Policy and Management, Académie chinoise des sciences). Des entretiens réalisés avec plusieurs experts de l'OCDE ont en outre permis d'approfondir certains sujets. Merci aux collègues de la DSTI : Koen De Backer, Mario Cervantes, Chiara Criscuolo, Fernando Galindo-Rueda, Hermann Garden, Dominique Guellec, Alistair Nolan, Caroline Paunov, Mariagrazia Squicciarini, Vincenzo Spiezia, Carthage Smith et David Winickoff.

Le chapitre 4, « Évolutions internationales récentes de la STI et des politiques », a été préparé par Sandrine Kergroach à la lumière des récentes activités du CPST et du TIP. Il s'appuie sur les réponses des pays à l'enquête internationale STIP de 2016 menée conjointement par la Commission européenne et l'OCDE.

Comme par le passé, les profils des politiques mis en avant dans les *Perspectives STI* sont le fruit d'un travail collaboratif. Les profils et le cadre analytique y afférent ont été conçus par Sandrine Kergroach, qui en a assuré la coordination et la cohérence.

Le chapitre 5, « Profils des politiques STI : Gouvernance » a été préparé par Mario Cervantes, Steffi Friedrichs, Michael Keenan, Sandrine Kergroach, Philippe Larrue, Jakob Prüß, David Winickoff et Pluvia Zuniga, à la lumière des travaux menés par le TIP et le GTBNTC, et de l'expérience acquise au fil de l'élaboration des Examens de l'OCDE des politiques d'innovation. Marco Daglio, de la Direction de la gouvernance publique et du développement territorial, a rédigé le profil consacré à l'innovation dans le secteur public.

Le chapitre 6, « Profils des politiques STI : Mondialisation et politiques d'innovation », a été élaboré par Koen de Backer à partir des travaux menés par le Comité de l'industrie, de l'innovation et de l'entrepreneuriat (CIIE), Fernando Galindo-Rueda et Sandrine Kergroach, qui se sont appuyés sur les travaux du CPST et de son Groupe de travail des experts nationaux sur les indicateurs de science et de technologie (GENIST), et Frédéric Sgard, du FMS. Gwénaél Jacotin et Stéphan Vincent-Lancrin (EDU) ont préparé le profil sur l'internationalisation des universités et de la recherche publique.

Le chapitre 7, « Profils des politiques STI : Nouveaux défis sociaux et environnementaux », a été rédigé par Andrés Barreneche, Mario Cervantes et Jim Philp à partir des travaux du TIP et du GTBNTC, Elettra Ronchi sur la base des travaux du CPEN, et Caroline Paunov à la lumière des activités du TIP et de l'OCDE sur l'innovation inclusive.

Le chapitre 8, « Profils des politiques STI : L'innovation dans l'entreprise », a été élaboré par Mario Cervantes, Sylvain Fraccola, Sandrine Kergroach et Jakob Prüß, qui se sont appuyés sur les travaux menés par le CPST et le TIP. Lucia Cusmano, Marco Marchese et Jonathan Potter, du Centre de l'OCDE pour l'entrepreneuriat, les PME et le développement local (CFE), ont rédigé le profil sur les start-ups et la création d'entreprises.

Le chapitre 9, « Profils des politiques STI : Innovation sectorielle », a été préparé par Giulia Ajmone-Marsan, Sarah Box, Mario Cervantes, Hermann Garden, Claire Jolly, Alistair Nolan et Jim Philp, tous membres de la DSTI, à la lumière des travaux menés par le CPST, le TIP, le GTBNTC, le CPEN et le Forum de l'espace de l'OCDE. Valérie Paris (ELS) et Philippe Gorry, du Groupe de recherche en Économie théorique et appliquée de l'Université de Bordeaux, ont rédigé le profil sur l'innovation en matière de santé dans le domaine des maladies rares.

Le chapitre 10, « Profils des politiques STI : Universités et recherche publique », a été élaboré par Giulia Ajmone-Marsan, Andrés Barreneche, Mario Cervantes, Caroline Paunov, Frédéric Sgard et Carthage Smith, d'après les travaux menés par le CPST, le TIP et le FMS.

Le chapitre 11, « Profils des politiques STI : Les compétences pour l'innovation », a été préparé par Andrés Barreneche, Sandrine Kergroach, Richard Scott et David Winickoff à partir des travaux réalisés par le CPST, le TIP et le GTBNTC.

La préparation du chapitre 12, « Profils STI par pays : Évaluer les performances STI nationales », a été coordonnée par Sylvain Fraccola et Sandrine Kergroach. La méthodologie a été mise au point par Dominique Guellec et Sandrine Kergroach. Les profils pays ont été préparés par Giulia Ajmone-Marsan, Koen De Backer, Andrés Barreneche, Stefano Baruffaldi, Qian Dai, Sylvain Fraccola, Steffi Friedrichs, Dominique Guellec, Gernot Hutschenreiter, Michael Keenan, Philippe Larrue, Alistair Nolan, Caroline Paunov, Jakob Prüß, Carthage Smith, Yana Vaziakova, David Winickoff, Gang Zhang et Pluvia Zuniga, tous membres de la DSTI, à partir des informations recueillies dans le cadre de l'enquête CE/OCDE sur les politiques STI, des activités du TIP et des Examens de l'OCDE des politiques d'innovation.

Tous les éléments des *Perspectives STI 2016* ont été revus par le comité de rédaction, dont les commentaires ont été précieux : Sarah Box, Dominique Guellec, Dirk Pilat et Andrew Wyckoff, de la DSTI.

Sandrine Kergroach a supervisé la mise au point de l'infrastructure sur les politiques (base de données STIP CE/OCDE) et de l'infrastructure statistique (IPP.Stat). Sylvain Fraccola, Chiara Petrolì, Jakob Prüß et Charlotte van Ooijen ont prêté leur concours pour les recherches nécessaires au traitement des réponses des pays à l'enquête de 2016. Merci à Julien Chicot, Naoya Ono, Inmaculada Perianez-Forte, Chiara Petrolì et Tomomi Watanabe pour leur rôle déterminant dans la mise en œuvre des versions précédentes de la base de données CE/OCDE sur les politiques STI. Merci également aux collègues de la Direction générale de la recherche et de l'innovation (DG RTD) de l'Union européenne pour leur contribution à la préparation des informations sur les pays, en vue de l'enquête de 2016. Sylvain Fraccola et Blandine Serve ont assuré respectivement la coordination et le soutien statistique, et apporté leur concours tout au long du processus.

Merci à Blandine Serve, qui a apporté une aide statistique pour l'ensemble de la publication. Remercions également Silvia Appelt, Frédéric Bourassa, Hélène Dernis, Isabelle Desnoyers-James, Fernando Galindo-Rueda, Elif Koksal-Oudot, Guillaume Kpodar, Cristina Serra-Vallejo, Brigitte Van Beuzekom et Fabien Verger pour leur contribution aux statistiques. Merci à Samuel Pinto-Ribeiro pour le support informatique, sans oublier Florence Hourtoutat, Beatrice Jeffries et Sophie O'Gorman, pour le secrétariat. Merci également à Janine Treves (PAC) pour ses recommandations éditoriales tout au long du processus, ainsi qu'à Isabelle Etienne pour sa participation à l'édition de la version finale de cette publication. Le processus de production a été supervisé par Angela Gosmann.

Table des matières

Acronymes	13
Résumé	17
Chapitre 1. Mégatendances influant sur la science, la technologie et l'innovation ...	21
Introduction.....	22
Démographie.....	26
Ressources naturelles et énergie	30
Changement climatique et environnement.....	36
Mondialisation	42
Rôle des pouvoirs publics	48
Économie, emplois et productivité.....	54
Société	60
Santé, inégalités et bien-être	64
Observations finales.....	70
Références	71
Chapitre 2. Futures tendances technologiques	79
Introduction.....	80
Internet des objets	82
Analytique de données massives.....	86
Intelligence artificielle	89
Neurotechnologies	93
Nano/microsatellites	97
Nanomatériaux	100
Fabrication additive	103
Technologies avancées de stockage de l'énergie	107
Biologie de synthèse.....	110
Chaîne de blocs	114
Observations finales.....	118
Notes.....	120
Références	120
Pour en savoir plus	125
Annexe 2.A1. Exercices de prospective cartographiés dans ce chapitre	126
Annexe 2.A2. Cartographie des études prospectives par filière technologique	129
Chapitre 3. L'avenir des systèmes scientifiques	135
Introduction.....	136
3.1. Quelles seront les ressources consacrées à la recherche publique ?	138

3.2. Qui pourvoira au financement de la recherche publique ?	141
3.3. Quels travaux de recherche publique mènera-t-on et dans quel but ?	142
3.4. Qui se chargera des travaux de recherche publique ?	147
3.5. Quelles seront les modalités d'exécution de la recherche publique ?	149
3.6. Quelles carrières offrira la recherche publique ?	157
3.7. Quels seront les résultats et impacts attendus de la recherche publique ?	162
3.8. À quoi ressembleront la politique et la gouvernance de la recherche publique ?	165
Notes	169
Références	170
Chapitre 4. Évolutions récentes des politiques nationales de la science et de l'innovation	173
Messages clés	174
Introduction : l'héritage du passé récent	177
4.1. Vue d'ensemble des résultats de l'enquête STIP	178
4.2. Affaiblissement des moteurs de croissance et d'innovation	180
4.3. Sortir du cycle de croissance lente et relancer le dynamisme de l'économie	185
4.4. Réorienter la recherche publique	199
4.5. Étendre les compétences et insuffler une culture de l'innovation	202
4.6. Améliorer la gouvernance des politiques	203
Notes	205
Références	206
Tableaux	
2.1. Initiatives majeures dans le domaine des sciences du cerveau	95
A2.1. Cartographie des études prospectives – Biotechnologies	129
A2.2. Cartographie des études prospectives – Matériaux avancés	131
A2.3. Cartographie des études prospectives – Technologies numériques	131
A2.4. Cartographie des études prospectives – Énergie et environnement	133
Graphiques	
2.1. 40 technologies clés et émergentes pour le futur	81
2.2. Objets connectés, 24 premiers pays, 2015	83
2.3. Chefs de file en matière de brevets dans une sélection de technologies émergentes	87
2.4. Les algorithmes effectuent de plus en plus de transactions de manière autonome	91
2.5. Historique des lancements de nano- et microsattellites et projections, 2009-20	98
2.6. Brevets de nanotechnologie par domaine et total, 1985-2012	101
2.7. Chiffre d'affaires de la fabrication additive dans l'industrie mondiale par secteur	105
2.8. À quoi sert la fabrication additive pour les entreprises ?	105
2.9. Cycle de maturité des technologies de stockage d'énergie	108
2.10. Applications de la biologie de synthèse selon les secteurs	112
2.11. La puissance de calcul global du réseau Bitcoin	117

3.1. Vue d'ensemble et points principaux abordés dans le chapitre 3	137
3.2. Les investissements publics et des entreprises ont augmenté la capacité de recherche mondiale	138
3.3. Les budgets publics de R-D sont susceptibles de se stabiliser autour des ratios actuels	139
3.4. La recherche publique mondiale s'effectue dans quelques pays de l'OCDE et économies partenaires	140
3.5. Le financement de la recherche publique se concentre dans les mains du gouvernement.	142
3.6. Recherche publique financée par l'industrie : les universités prennent la part du lion	142
3.7. L'accroissement des préoccupations sociales change les équilibres des budgets publics de R-D.	143
3.8. Les économies établissent leurs priorités budgétaires de R-D afin de mieux répondre aux grands défis.	145
3.9. La recherche publique se tourne vers les universités.	148
3.10. L'expansion et l'intensification des réseaux internationaux de collaboration scientifique	151
3.11. Le nombre de publications en libre accès est à la hausse	152
3.12. Les pratiques de publication en libre accès varient selon les domaines de la science	153
3.13. La recherche axée sur les données se développe rapidement	157
3.14. Le nombre de doctorats croît à l'échelle mondiale, y compris dans les économies émergentes	158
3.15. Le contingent des doctorats en science et ingénierie montre des signes de ralentissement	159
3.16. Le secteur public emploie une part disproportionnée de chercheurs salariés.	161
3.17. Les femmes restent éloignées des positions académiques supérieures en Europe	162
3.18. La production scientifique a augmenté dans le monde entier, mais les classements d'excellence sont lents à changer	163
4.1. L'attention générale en matière de politiques STI se concentre sur l'innovation des entreprises et sur les compétences	179
4.2. Les priorités des politiques STI ont évolué vers des impératifs économiques plus immédiats et une plus grande efficacité.	180
4.3. L'action des pouvoirs publics dans le domaine STI a légèrement évolué dans ses priorités, ses modalités et son ciblage au cours des dernières années	181
4.4. Aperçu des conditions économiques actuelles et de leur impact sur la capacité d'innovation, sélection de pays.	182
4.5. Diminution des écarts de croissance entre les économies avancées et les économies émergentes.	183
4.6. Investissement dans les actifs intellectuels.	184
4.7. Le soutien public à la R-D des entreprises a significativement augmenté au cours des dernières années.	188

4.8. Un soutien public aux entreprises plus important par le biais d'incitations fiscales en faveur de la R-D plus généreuses	189
4.9. Principaux instruments de financement dans le dosage des politiques en faveur de l'innovation des entreprises, 2016	190
4.10. De nombreux pays ont consolidé et fusionné les régimes de soutien existants	191
4.11. Un retour lent des conditions de financement de l'innovation et de l'esprit d'entreprise	192
4.12. Vers un renforcement des approches basées sur la demande dans le dosage des politiques.	194
4.13. L'utilisation et la pertinence politique des incitations fiscales à la R-D restent extrêmement disparates selon les pays	194

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/oecddirect/>

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.

Acronymes

ATR	Avantage technologique révélé
CBPRD	Crédits budgétaires publics de R-D
CIB	Classification internationale des brevets
CITE	Classification internationale type de l'éducation
CITI	Classification internationale type, par industrie
CITP	Classification internationale type des professions
CO₂	Dioxyde de carbone
CPST	Comité de la politique scientifique et technologique de l'OCDE
CVM	Chaînes de valeur mondiales
DIRD	Dépenses intérieures brutes de R-D
DIRDE	Dépenses intérieures de R-D des entreprises
DIRDES	Dépenses intérieures de R-D de l'enseignement supérieur
DIRDET	Dépenses intérieures de R-D de l'État
DPI	Droits de propriété intellectuelle
EES	Établissement d'enseignement supérieur
EMN	Entreprise multinationale
EPR	Établissement public de recherche
ETP	Équivalent temps plein
FMI	Fonds monétaire international
IA	Intelligence artificielle
IDE	Investissement direct étranger
IDO	Internet des objets
JPO	Japan Patent Office
KIPO	Korean Intellectual Property Office
OEB	Office européen des brevets
OHMI	Office de l'harmonisation dans le marché intérieur
OMPI	Organisation mondiale de la propriété intellectuelle
PCT	Patent Co-operation Treaty (Traité de coopération en matière de brevets)
PI	Propriété intellectuelle
PIB	Produit intérieur brut
PME	Petites et moyennes entreprises
PMF	Productivité multifactorielle
PPA	Parité de pouvoir d'achat
PPP	Partenariat public-privé
R-D	Recherche et développement
RHST	Ressources humaines en science et technologie
SIPO	State Intellectual Property Office of the People's Republic of China
SSS	Stratégie de spécialisation intelligente (3S)

ST	Science et technologie
STI	Science, technologie et innovation
STIM	Sciences, technologies, ingénierie et mathématiques
STIP	Enquête et base de données Science, technology and innovation policy
TI	Technologies de l'information
TIC	Technologies de l'information et des communications
UE	Union européenne
USD	Dollar américain
USPTO	United States Patent and Trademark Office

Abréviations

ARG	Argentine	Peso argentin	ARS
AUS	Australie	Dollar australien	AUD
AUT	Autriche	Euro	EUR
BEL	Belgique	Euro	EUR
BRA	Brésil	Réal brésilien	BRL
CAN	Canada	Dollar canadien	CAD
CHE	Suisse	Franc suisse	CHF
CHL	Chili	Peso chilien	CLP
CHN	Chine (République populaire de)	Yuan ren min bi	CNY
COL	Colombie	Peso colombien	COP
CRI	Costa Rica	Colón	CRC
CZE	République tchèque	Couronne tchèque	CZK
DEU	Allemagne	Euro	EUR
DNK	Danemark	Couronne danoise	DKK
EGY	Égypte	Livre égyptienne	EGP
ESP	Espagne	Euro	EUR
EST	Estonie	Couronne estonienne	EEK
FIN	Finlande	Euro	EUR
FRA	France	Euro	EUR
GBR	Royaume-Uni	Livre sterling	GBP
GRC	Grèce	Euro	EUR
HUN	Hongrie	Forint	HUF
IDN	Indonésie	Roupie indonésienne	IDR
IND	Inde	Roupie indienne	INR
IRL	Irlande	Euro	EUR
ISL	Islande	Couronne islandaise	ISK
ISR	Israël	Nouveau shekel israélien	ILS
ITA	Italie	Euro	EUR
JPN	Japon	Yen	JPY
KOR	Corée	Won	KRW
LTU	Lituanie	Litas	LTL
LUX	Luxembourg	Euro	EUR
LVA	Lettonie	Lats letton	LVL
MEX	Mexique	Peso	MXN
MYS	Malaisie	Ringgit	MYR
NLD	Pays-Bas	Euro	EUR
NOR	Norvège	Couronne norvégienne	NOK
NZL	Nouvelle-Zélande	Dollar néo-zélandais	NZD
PER	Pérou	Nuevo Sol	PEN
POL	Pologne	Zloty	PLN
PRT	Portugal	Euro	EUR
RUS	Fédération de Russie	Rouble	RUB
SVK	République slovaque	Couronne slovaque	SKK

SVN	Slovénie	Euro	EUR
SWE	Suède	Couronne suédoise	SEK
THA	Thaïlande	Baht	THB
TUR	Turquie	Livre turque	TRY
UE	Union européenne	Euro	EUR
USA	États-Unis	Dollar américain	USD
ZAF	Afrique du Sud	Rand sud-africain	ZAR

Groupes de pays

BRICS	Afrique du Sud, Brésil, Chine (République populaire de), Fédération de Russie, Inde
BRIICS	Afrique du Sud, Brésil, Chine (République populaire de), Fédération de Russie, Inde, Indonésie
UE28	Union européenne (Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre ¹ , Croatie, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République slovaque, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovénie et Suède)
OCDE	Ensemble des pays membres de l'OCDE

1. Note en bas de page de la Turquie : « Les informations figurant dans ce document qui font référence à “Chypre” concernent la partie méridionale de l’île. Il n’y a pas d’autorité unique représentant à la fois les Chypriotes turcs et grecs sur l’île. La Turquie reconnaît la République Turque de Chypre Nord (RTCN). Jusqu’à ce qu’une solution durable et équitable soit trouvée dans le cadre des Nations Unies, la Turquie maintiendra sa position sur la “question chypriote” ».

Note en bas de page de tous les États de l’Union européenne membres de l’OCDE et de la Commission européenne : « La République de Chypre est reconnue par tous les membres des Nations Unies sauf la Turquie. Les informations figurant dans ce document concernent la zone sous le contrôle effectif du gouvernement de la République de Chypre ».

Résumé

Le monde de demain sera autre. Des forces puissantes, suscitées par des tendances socio-économiques, environnementales, technologiques et politiques profondes – appelées « mégatendances » – agissent sur l'évolution suivie par les économies et les sociétés, façonnant ainsi notre avenir, souvent pour lui donner un tour inattendu. Complémentaires, mais parfois aussi antagonistes, ces mégatendances, avec les multiples dimensions qui sont les leurs, ne manqueront pas d'influer sur l'orientation et le rythme des progrès technologiques et des découvertes scientifiques ainsi que sur le cours des activités et politiques relevant du domaine STI.

Les mégatendances déterminent les capacités et les activités STI de demain

Le vieillissement démographique, l'atténuation des effets du changement climatique, les défis liés à la santé et la généralisation du numérique sont quelques-uns des facteurs appelés à dicter les programmes de R-D et dont dépendront, en principe, la portée et l'ampleur de la demande d'innovation. L'ouverture de nouveaux marchés est à prévoir, qui fera naître de nouveaux besoins de compétences en même temps qu'elle offrira de nouvelles perspectives pour la croissance et l'emploi. Des modèles inédits inscrits dans une logique de croissance durable, telle l'économie circulaire, sont en train de faire leur chemin.

L'essor des économies émergentes, conjugué aux activités transfrontières des multinationales et à l'étirement des chaînes de valeur mondiales concourra en outre à une plus large distribution des activités STI. La concurrence mondiale dont sont l'objet talents et ressources semble vouée à s'intensifier, tout comme la production et la diffusion de nouveaux savoirs. Les centres d'excellence qui existent à l'heure actuelle tireront sans doute leur épingle du jeu, continuant d'attirer à eux des éléments et moyens de premier choix au détriment de leurs rivaux moins compétitifs.

On ne saurait exclure cependant que de fortes contraintes s'exercent sur les ressources dédiées aux activités STI. Une croissance insuffisante dans les économies développées et les économies émergentes, ajoutée à l'adoption de priorités et de programmes inconciliables, serait cause, le cas échéant, d'un amenuisement des ressources financières disponibles et pourrait interdire à la STI de tenir son rôle face aux défis de l'avenir. De même, un vieillissement démographique conjugué à une modification des courants migratoires aura des conséquences incertaines sur le vivier des compétences STI disponibles.

Les mégatendances amènent avec elles des problèmes dont les pouvoirs publics doivent se saisir d'urgence, or il est probable que ceux-ci verront leur capacité d'action considérablement limitée en raison de freins ayant notamment pour nom endettement public élevé, recrudescence des menaces sur la sécurité mondiale, risque de délitement de la cohésion sociale et montée en puissance d'acteurs non étatiques influents défiant leur autorité et leur compétence.

La technologie promet de bouleverser les sociétés, avec des résultats incertains

Les évolutions futures de la STI sont susceptibles d'accélérer, d'amplifier ou d'inverser les dynamiques associées aux mégatendances. Elles sont également susceptibles d'apporter des solutions aux problèmes que nous rencontrons. Pour prendre quelques exemples, la mondialisation va s'intensifier grâce aux progrès des communications et des technologies de transport ; la croissance du revenu entretiendra une corrélation toujours plus étroite avec les avancées de la STI ; le recul des émissions de CO₂ dépendra de la mise au point de nouveaux systèmes reposant sur des sources d'énergie plus propres ; les progrès sur le plan sanitaire et l'allongement de l'espérance de vie seront quant à eux largement subordonnés aux innovations dans les technologies médicales.

Les technologies émergentes ne sont pas non plus exemptes de risques ni d'incertitudes et nombre d'entre elles soulèvent en outre d'importantes questions sur le plan éthique. Les progrès de la STI peuvent ajouter au creusement des inégalités s'ils ne s'accompagnent d'une large diffusion de l'innovation et de l'acquisition de compétences par le plus grand nombre. Les progrès de l'intelligence artificielle et de la robotique ne sont pas sans susciter des inquiétudes pour l'avenir de l'emploi, l'internet des objets et l'analytique de données massives pour la vie privée, l'impression tridimensionnelle pour la protection de la propriété intellectuelle, la biologie de synthèse pour la biosécurité et les neurosciences pour le respect de la personne humaine.

Il reste que ces technologies, dont on attend qu'elles aient de vastes répercussions dans différents domaines d'application, dépendront souvent d'autres technologies « génériques » pour leur développement et leur exploitation. La convergence et la combinaison des technologies peuvent être favorisées par des espaces institutionnels pluridisciplinaires et par la formation.

Un rôle clé est dévolu aux systèmes scientifiques publics, pour autant qu'ils réussissent leur transformation

Les systèmes scientifiques relevant du secteur public continueront d'apporter une contribution irremplaçable au développement de savoirs et de compétences qui profiteront à l'ensemble de l'économie. Cependant, ils vont eux-mêmes au-devant d'une mutation. Les technologies émergentes font en effet entrer la recherche dans une ère nouvelle. Les mégadonnées et les algorithmes génèrent d'énormes volumes de données, modifiant dès lors les méthodes, les instruments et les compétences dont la science a besoin et ouvrant de nouveaux domaines de recherche.

La science ouverte est aujourd'hui la nouvelle frontière. L'ouverture des données est une pratique qui se généralise. Encourager le partage et la réutilisation des données de la recherche pourrait permettre une utilisation plus optimale des fonds publics. La science tend également à prendre un caractère moins institutionnel puisque des particuliers mènent leurs propres travaux de recherche en marge de la communauté scientifique. De profondes mutations de la culture universitaire n'en seront pas moins nécessaires pour exploiter tout le potentiel que peut offrir une science plus ouverte.

Les modalités de financement sont appelées à évoluer. Il y a peu de chances que la part de fonds publics consacrée à la R-D augmente, d'autant qu'une érosion de ces financements est d'ores et déjà visible en ce qui concerne les universités dans bien des pays. Les établissements scientifiques publics vont devoir trouver de nouvelles sources de financement, notamment auprès d'œuvres philanthropiques et de fondations privées, ce

qui ne sera pas sans incidence sur leurs programmes de R-D. La carrière des chercheurs demeurera de plus marquée par la précarité, en particulier pour les femmes, et cela aura des conséquences pour l'attractivité de la profession auprès des jeunes générations.

Aujourd'hui, l'attention des pouvoirs publics demeure cristallisée sur les impératifs économiques immédiats et les gains d'efficience

La dernière crise financière a rudement secoué les activités STI, et le rebond qui a suivi est resté timide. Les conditions de financement de l'innovation et de l'entrepreneuriat demeurent très difficiles, en particulier pour les petites et moyennes entreprises (PME).

Les pays de l'OCDE comme les économies partenaires se sont considérablement investis pour soutenir la capacité d'innovation des entreprises. De nombreux pays ont ainsi entrepris de regrouper leurs programmes d'aide dans un souci d'accessibilité et d'efficience. Certains ont également adopté une approche « zéro dépense » en matière de soutien à l'innovation, et font par exemple un recours systématique aux incitations fiscales et aux marchés publics. De nombreux pays ont par ailleurs entrepris de repenser leurs panoplies de mesures afin de venir en aide aux PME et aux start-ups, notamment pour accéder aux marchés mondiaux. Il apparaît de plus en plus qu'il existe des arbitrages, dans la répartition des aides publiques, entre les entreprises, d'une part, et les systèmes publics de recherche, d'autre part, une fraction toujours plus importante des budgets correspondants allant au secteur privé.

Le tableau prend cependant une coloration différente selon les pays, et la divergence de trajectoire entre pays à croissance lente et pays à croissance rapide va s'accroissant. Au sein de l'Europe elle-même, les nettes disparités constatées entre les profils d'investissement nationaux révèlent que la cohésion de l'Union européenne est de plus en plus menacée. Les pouvoirs publics cherchent le moyen de renforcer leurs panoplies de mesures STI sur les plans de l'efficience et de l'impact, ce qui les amène à considérer plus sérieusement le recours à l'évaluation des politiques et aux nouvelles infrastructures de données pour étoffer la base factuelle servant à éclairer leur action.

Les pouvoirs publics vont de plus en plus façonner et exploiter la STI avec le concours de la société au sens large

La gestion, par les pouvoirs publics, des risques et des incertitudes entourant les évolutions à venir dans le champ STI passe de plus en plus souvent par l'adoption de politiques davantage axées sur la « recherche et innovation responsables » (RIR). Les principes de la RIR, qui irriguent les programmes d'action, les programmes de financement et les mécanismes de gouvernance, permettent la prise en compte de considérations éthiques et sociales dès un stade précoce du processus d'innovation.

Chapitre 1

Mégatendances influant sur la science, la technologie et l'innovation

Ce chapitre décrit et analyse les principales « mégatendances » mondiales qui devraient influencer fortement sur les sociétés et les économies, et notamment sur les systèmes de la science, de la technologie et de l'innovation (STI), au cours des 10 à 15 prochaines années. Les mégatendances sont des changements sociaux, économiques, politiques, environnementaux ou technologiques de grande ampleur qui sont lents à se former, mais qui, une fois qu'ils sont ancrés, exercent une influence profonde et durable sur la plupart des activités humaines, des processus et des perceptions, si ce n'est sur tous. La stabilité relative qui caractérise la trajectoire de ces grandes forces de changement permet d'imaginer certains aspects de notre futur probable à moyen ou long terme, avec un certain degré de confiance. Les mégatendances couvertes dans ce chapitre sont regroupées en huit domaines thématiques, comme suit : démographie ; ressources naturelles et énergie ; changement climatique et environnement ; mondialisation ; rôle des pouvoirs publics ; économie, emplois et productivité ; société ; et santé, inégalités et bien-être.

Introduction

Notre avenir est marqué par l'incertitude, façonné par une multitude de forces puissantes, complexes et interdépendantes, et soumis à des événements improbables, imprévisibles et hautement perturbateurs. Observées sur une échelle temporelle de, par exemple, 10 à 20 ans, certaines des grandes tendances qui se déploient devant nos yeux dévoilent une évolution en réalité assez lente. Ce sont des mégatendances : des changements sociaux, économiques, politiques, environnementaux ou technologiques de grande ampleur qui sont lents à se former, mais qui, une fois ancrés, exercent une influence profonde et durable sur la plupart des activités humaines, des processus et des perceptions, si ce n'est sur tous. On peut citer comme exemples la croissance démographique et l'urbanisation mondiales ou le vieillissement des sociétés dans beaucoup de régions du monde ; le réchauffement de la planète ainsi que l'élévation du niveau de la mer ou l'acidification de nos océans et de nos mers ; l'approfondissement de la mondialisation et l'accélération de la dynamique du numérique, des données massives et de la bio-ingénierie.

La relative stabilité qui caractérise la trajectoire de ces grandes forces de changement nous permet d'imaginer au moins certains aspects de notre futur probable à moyen ou long terme, avec un certain degré de confiance. Ce qui a tendance à ébranler cette confiance, du moins temporairement, ce sont les événements perturbateurs. Ceux-ci revêtent une multitude de formes, dont des catastrophes, naturelles et autres, ou encore des événements liés à l'intervention humaine, comme des accès soudains de violence, des accidents de grande ampleur ou des crises économiques et politiques. De tels événements sont difficiles à intégrer dans des projections de tendances, si bien que dans les exercices de prospective, ils sont souvent traités comme des « facteurs de rupture », définis comme des événements à fort impact qui sont imprévisibles ou dont la probabilité de réalisation est très faible. Des innovations scientifiques et technologiques potentiellement sources de bouleversements trouvent souvent leur place dans les études des tendances à venir, notamment parce qu'elles constituent souvent le prolongement d'une tendance existante en science et technologie, ou parce qu'elles s'en écartent radicalement. *In fine*, c'est l'interaction entre les mégatendances et autres tendances sources de bouleversement, notamment dans le domaine de la science et de la technologie, qui plantera le décor des prochaines décennies. Il revient aux pouvoirs publics, aux milieux d'affaires, aux scientifiques et aux citoyens en général de réfléchir à ce que signifie l'interaction de ces tendances en termes d'opportunités à saisir et de défis à relever.

À cet égard, la prospective peut constituer un instrument utile pour élaborer et mettre en œuvre des politiques de recherche et d'innovation tournées vers l'avenir. L'analyse des tendances de demain, qu'elles proviennent d'extrapolations, de simulations, de projections ou scénarios, peut fournir des éclairages intéressants pour l'avenir. La prospective peut offrir un soutien et une orientation aux décideurs et aux investisseurs, ou alerter les gouvernants, la communauté d'affaires, les chercheurs et la société en général sur des problématiques à venir importantes. Toutefois, ces tendances doivent toujours être interprétées avec prudence : elles ne prédisent pas l'avenir, mais indiquent simplement comment le futur pourrait évoluer sous certaines conditions et dans un domaine donné. En assemblant des

tendances dans des domaines variés et en étudiant de près leurs interactions, on peut dresser un tableau un peu plus complet des avenir possibles. Cette démarche peut permettre de constituer une base plus solide pour élaborer des scénarios ou des synopsis qui, à leur tour, peuvent enrichir notre compréhension de l'orientation que prend le monde ainsi que des défis et opportunités que nous pourrions rencontrer à long ou très long terme.

Ce chapitre couvre les mégatendances qui devraient avoir de fortes répercussions sur les systèmes de la science, de la technologie et de l'innovation (STI). Les mégatendances traitées ici sont regroupées en huit domaines thématiques, présentés au graphique 1.1. Si l'horizon temporel adopté dans ces *Perspectives STI* est de 10 à 15 ans, plusieurs projections de mégatendances présentées ci-dessous s'étirent vers un futur un peu plus lointain. Cet écart tient en partie à la disponibilité de données. Il tient également au fait que pour certaines mégatendances, c'est à un horizon plus lointain, de 20 ans ou plus, que l'on perçoit le mieux les grands changements induits. Quel que soit l'horizon temporel retenu, ces évolutions ont des implications pour la politique STI d'aujourd'hui. Au demeurant, c'est cette réflexion sur la nécessaire (ré)orientation des politiques publiques qui a guidé le choix des mégatendances présentées ci-dessous.

En guise de vue d'ensemble, voici quelques-unes des principales mégatendances traitées dans ce chapitre :

- **Démographie** : La population mondiale va continuer de croître au XXI^e siècle et devrait franchir la barre des 10 milliards d'individus vers la moitié du siècle. L'Afrique représentera plus de la moitié de cette croissance, qui générera une poussée massive du nombre de jeunes. Ailleurs, y compris dans nombre de pays en développement, on observera un net vieillissement de la population, et les personnes de plus de 80 ans représenteront environ 10 % de la population mondiale d'ici 2050, contre 4 % en 2010. Compte tenu du recul de la part de la population active, les pays dont la population vieillit devront mener une rude bataille pour préserver leur niveau de vie. Les migrations internationales en provenance de pays à la population plus jeune pourraient inverser cette tendance. Parallèlement, les technologies qui augmentent les capacités physiques et cognitives pourraient permettre aux personnes plus âgées de travailler plus longtemps, tandis qu'une automatisation grandissante pourrait réduire la demande de main-d'œuvre.
- **Ressources naturelles et énergie** : Une population grandissante, conjuguée à la croissance économique, fera peser une charge considérable sur les ressources naturelles. Un fort stress hydrique est probable dans de nombreuses parties du monde, tandis que l'insécurité alimentaire persistera dans bien des régions, essentiellement des régions pauvres. La consommation d'énergie progressera elle aussi vivement, contribuant à accentuer le changement climatique. Une menace croissante pèsera sur la biodiversité mondiale, en particulier dans les pays pauvres à forte densité de population.
- **Changement climatique et environnement** : Limiter l'ampleur et les effets considérables du changement climatique nécessitera de fixer et d'atteindre des objectifs ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de recyclage des déchets, ce qui suppose une réorientation majeure vers une « économie circulaire » bas carbone d'ici 2050. Cette réorientation affectera tous les pans de l'économie et de la société, et sera rendue possible par l'innovation technologique et l'adoption des technologies dans les pays développés et en développement.
- **Mondialisation** : Le centre de gravité de l'économie mondiale continuera de se déplacer vers l'est et vers le sud, et de nouveaux acteurs gagneront davantage de puissance – il pourra s'agir d'États, d'acteurs non étatiques (comme des entreprises multinationales ou des ONG) ou

encore de mégalo-pôles nouvellement apparues. Nombre de ces déplacements de la puissance et de l'influence sont impulsés et facilités par la mondialisation, qui s'opère à travers des flux de biens, de services, d'investissements, de personnes et d'idées, et est favorisée par l'adoption généralisée des technologies numériques. Cependant, la mondialisation sera inéluctablement confrontée à des contre-courants et à des vents contraires, tels que l'instabilité géopolitique, de possibles conflits armés ou de nouveaux obstacles aux échanges.

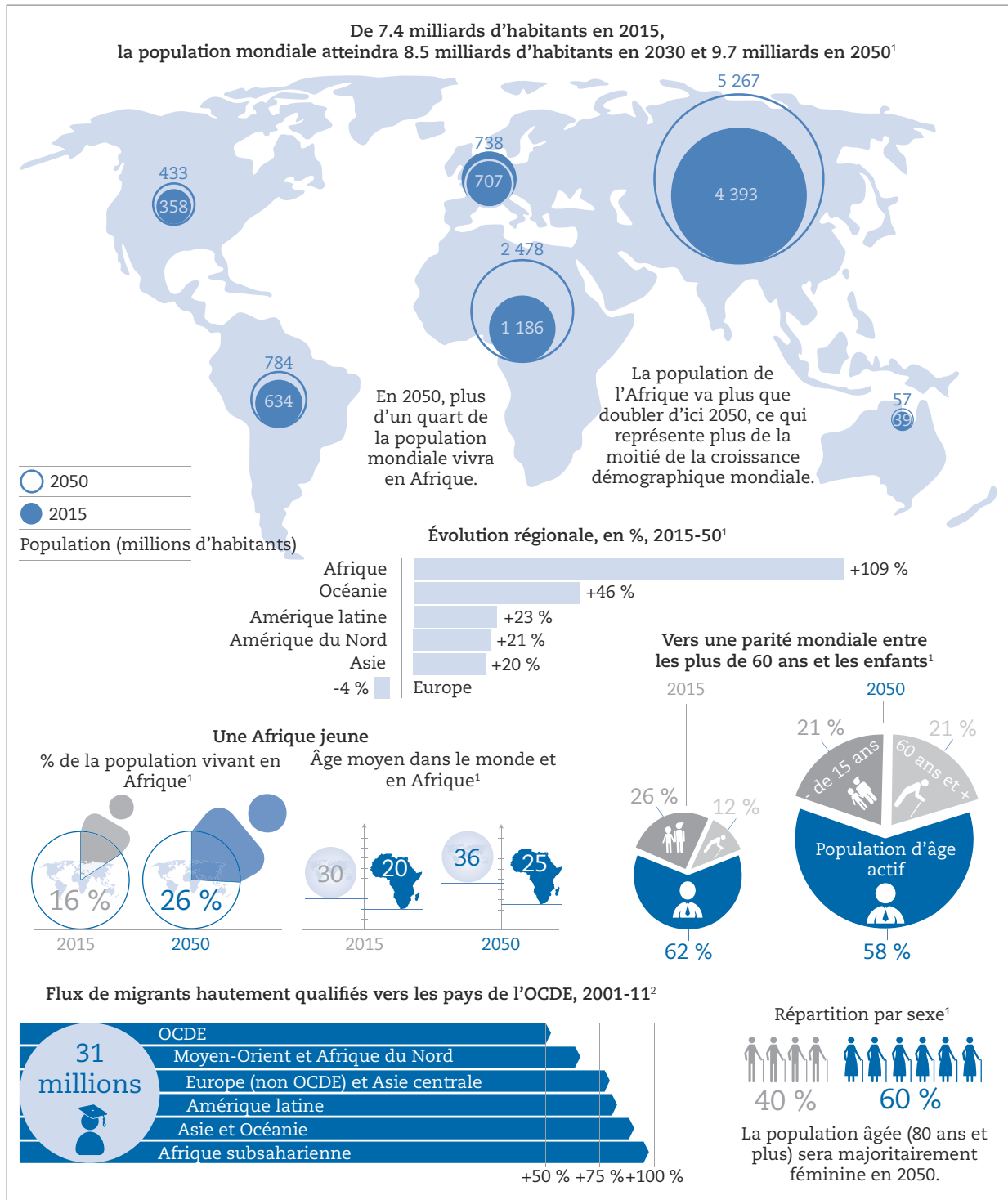
- **Rôle des pouvoirs publics** : Les pouvoirs publics n'auront d'autre choix que d'affronter les nombreux défis qui se feront jour à l'avenir, dans un contexte marqué par l'accentuation des pressions budgétaires, l'érosion de la confiance du public à l'égard de l'administration et la poursuite de la transition vers un monde multipolaire, avec l'instabilité croissante qui risque de s'ensuivre.
- **Économie, emplois et productivité** : Les technologies numériques continueront d'avoir des répercussions majeures sur les économies et les sociétés. Ces 15 prochaines années, le numérique constituera une composante majeure des entreprises ; grâce à lui, les processus de conception, de fabrication et de livraison de produits seront fortement intégrés et efficaces. Le coût des équipements et de l'informatique va continuer de chuter, tandis que la progression des pratiques de développement de code source librement accessible créera de nouvelles communautés de développeurs. Les nouveaux entrants, y compris des particuliers, des entreprises extérieures au domaine et des entrepreneurs, auront davantage de possibilités de réussir sur de nouveaux marchés. Dans le même temps, la baisse du coût de la puissance de calcul et les progrès de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle continueront de bouleverser les marchés du travail, un emploi sur dix présentant un risque élevé d'automatisation au cours des 20 prochaines années dans les pays de l'OCDE.
- **Société** : L'avenir verra des changements marquants dans les structures de la famille et du foyer dans les pays de l'OCDE, avec une hausse significative des ménages composés d'une seule personne et des couples sans enfant. L'accès à l'éducation et à l'acquisition de compétences sera l'une des clés les plus importantes pour améliorer ses chances dans la vie. L'augmentation de la participation de la population féminine à tous les niveaux d'éducation va se poursuivre et aura des conséquences notables sur le marché du travail et la vie de famille. La population mondiale vivra de plus en plus en zone urbaine – 90 % de cette augmentation aura lieu en Asie et en Afrique. L'urbanisation pourrait s'accompagner de plusieurs avantages pour les pays en développement, notamment un meilleur accès à l'électricité, à l'eau et à l'assainissement. En revanche, elle pourrait également conduire à la formation de vastes bidonvilles, avec des conséquences délétères pour la santé humaine et l'environnement.
- **Santé, inégalités et bien-être** : Le traitement des maladies infectieuses, qui touchent en proportion davantage le monde en développement, sera de plus en plus compromis par la progression de la résistance aux antibiotiques. D'après les projections, les maladies non transmissibles et neurologiques vont nettement augmenter, phénomène concordant avec le vieillissement de la population et la mondialisation de modes de vie malsains. Les inégalités se creuseront dans de nombreux pays développés, de même que les taux de pauvreté et les profils des personnes à risque.

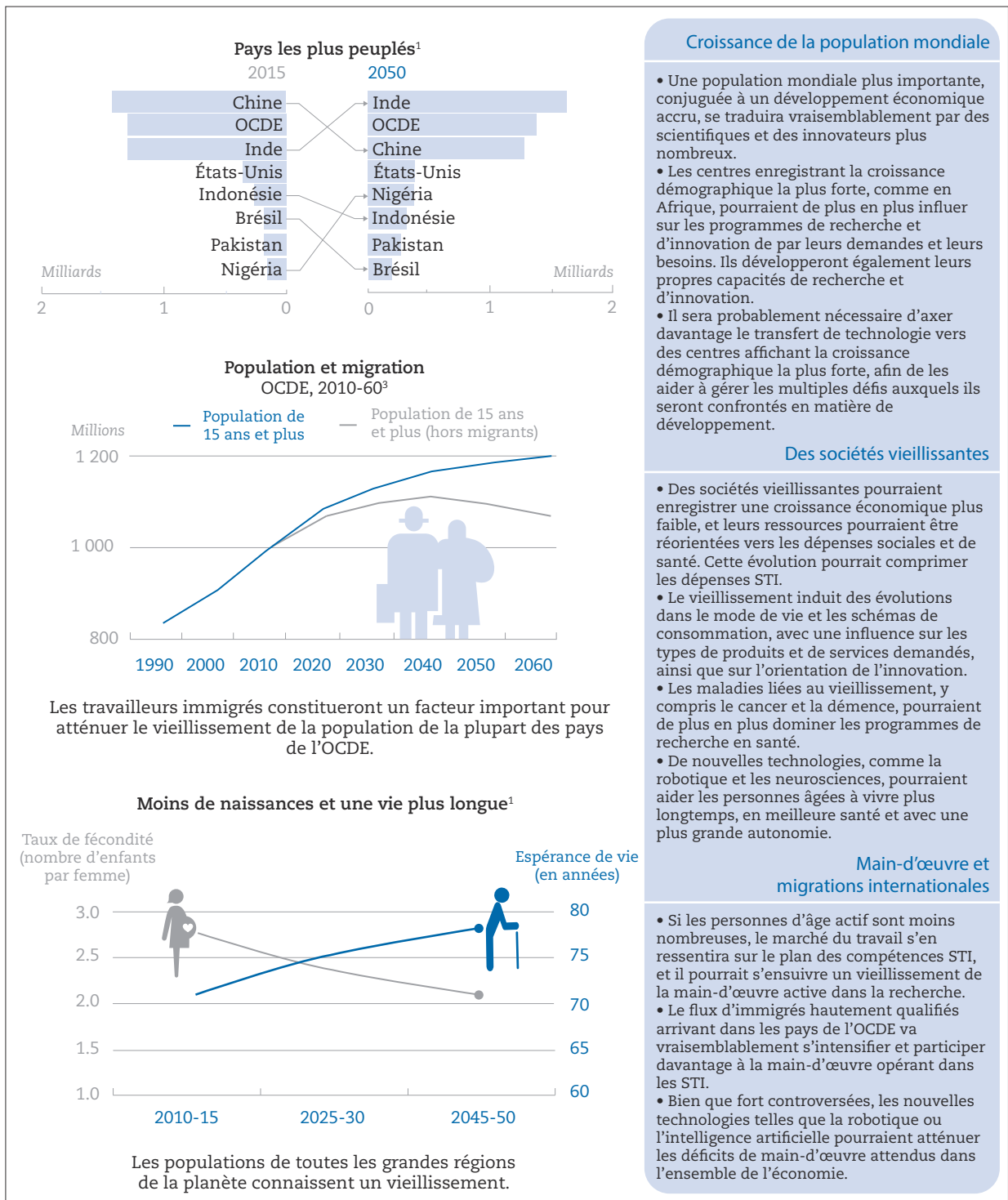
Dans ce monde en pleine mutation, la science, la technologie et l'innovation peuvent constituer une arme à double tranchant. D'un côté, les avancées technologiques sont susceptibles de renforcer l'effet déstabilisant de nombre des mégatendances décrites ici. De l'autre, elles renferment le potentiel qui permettra à l'humanité de faire face à nombre des défis mondiaux auxquels est confrontée la planète. D'une manière ou d'une autre, elles auront une influence majeure, suivant fréquemment des voies inattendues.

Huit mégatendances traitées dans ce chapitre



Démographie





Sources : 1. DAES (2015a). La population désigne les personnes âgées de 15 ans et plus. L'Islande est exclue des destinations dans la zone OCDE pour les comparaisons entre 2000/01 et 2010/11 ; 2. OCDE (2015a) ; 3. Westmore, B. (2014).

Croissance de la population dans les pays les moins avancés

La population mondiale devrait croître durant le XXI^e siècle pour atteindre 8.5 milliards d'habitants en 2030 et 9.7 milliards d'ici 2050. Cette croissance sera presque entièrement le fait de pays moins avancés, et l'Afrique représentera plus de la moitié de la croissance attendue. Dans une grande partie du monde développé, la taille de la population va se stabiliser, et de nombreux pays vont même enregistrer un déclin de leur population. Au Japon et dans une grande partie de l'Europe centrale et orientale, par exemple, la population devrait reculer de plus de 15 % d'ici 2050.

La croissance de la population mondiale fera peser des pressions sans précédent sur les ressources naturelles, et l'on continuera de faire appel à la science, la technologie et l'innovation, qui joueront un rôle essentiel dans l'amélioration de leur production et de leur conservation. De manière générale, une population mondiale plus importante, conjuguée à la poursuite du développement économique, devrait se traduire par des activités de recherche et d'innovation plus nombreuses. Dans le même temps, les programmes de recherche et d'innovation pourraient être nettement influencés par les multiples défis, sur le plan du développement, auxquels sont confrontés les pays affichant une forte croissance démographique. Les nouvelles coopérations et nouveaux accords internationaux, par exemple autour des Objectifs de développement durable (ODD), permettront d'accélérer le transfert de technologie vers ces pays afin de renforcer les canaux de diffusion existants, qui passent par les échanges, l'investissement direct étranger (IDE) et l'acquisition de biens d'équipement. Les pays en développement auront besoin d'étendre et d'approfondir leurs propres capacités de recherche et d'innovation s'ils veulent absorber ces technologies et les adapter à leurs besoins.

Sociétés vieillissantes

La combinaison de faibles taux de fécondité et de l'allongement de la durée de vie se traduira, par un vieillissement de la population dans toutes les grandes régions du monde. Si les rythmes actuels se poursuivent, il y aura, à l'échelle mondiale, une quasi-parité entre le nombre de personnes âgées de plus de 60 ans et le nombre de jeunes d'ici 2050. Cette situation représente un changement substantiel par rapport à la situation passée et actuelle : si l'on compte aujourd'hui environ 900 millions de personnes de plus de 60 ans sur la planète, ce nombre devrait grimper à 2.1 milliards en 2050. C'est l'Europe qui devrait présenter la plus forte proportion de plus de 60 ans (34 % en 2050, contre 24 % en 2015). Néanmoins, un vieillissement rapide interviendra aussi dans d'autres régions du monde (ONU, 2015a). Près de 80 % de la population âgée de la planète vivra dans des régions qui sont actuellement moins avancées. D'ici 2050, la République populaire de Chine (ci-après dénommée « Chine ») comptera environ 330 millions de citoyens âgés de 65 ans ou plus, l'Inde environ 230 millions et le Brésil et l'Indonésie plus de 50 millions (ONU, 2011). Le nombre de personnes de plus de 80 ans devrait tripler d'ici 2050. La catégorie des plus de 80 ans représentait seulement 1 % de la population de la zone OCDE en 1950, mais cette proportion devrait avoisiner les 10 % en 2050.

Le vieillissement induit des modifications dans le mode de vie et les schémas de consommation, qui auront des conséquences notables sur les types de produits et de services demandés. De nouveaux marchés apparaîtront à la faveur d'une « économie des seniors » florissante (OCDE, 2014a), tandis que les marchés plus traditionnels devront sans doute s'adapter, autant d'évolutions qui auront des conséquences pour l'innovation. Parallèlement, des sociétés vieillissantes pourraient enregistrer un ralentissement de la croissance économique. Des taux de dépendance élevés des personnes âgées, associés à une plus forte prévalence des maladies non transmissibles et à un niveau d'incapacité accru chez les personnes âgées, feront peser une charge considérable sur les services de santé et autres.

Les pressions budgétaires qui s'ensuivront pourraient détourner des dépenses publiques d'autres domaines (STI en particulier). En outre, les maladies liées au vieillissement pourraient de plus en plus dominer les programmes de recherche en santé. À mesure que le monde dans son ensemble vieillit, la coopération internationale pour la recherche visant à traiter des maladies liées à l'âge pourrait s'intensifier.

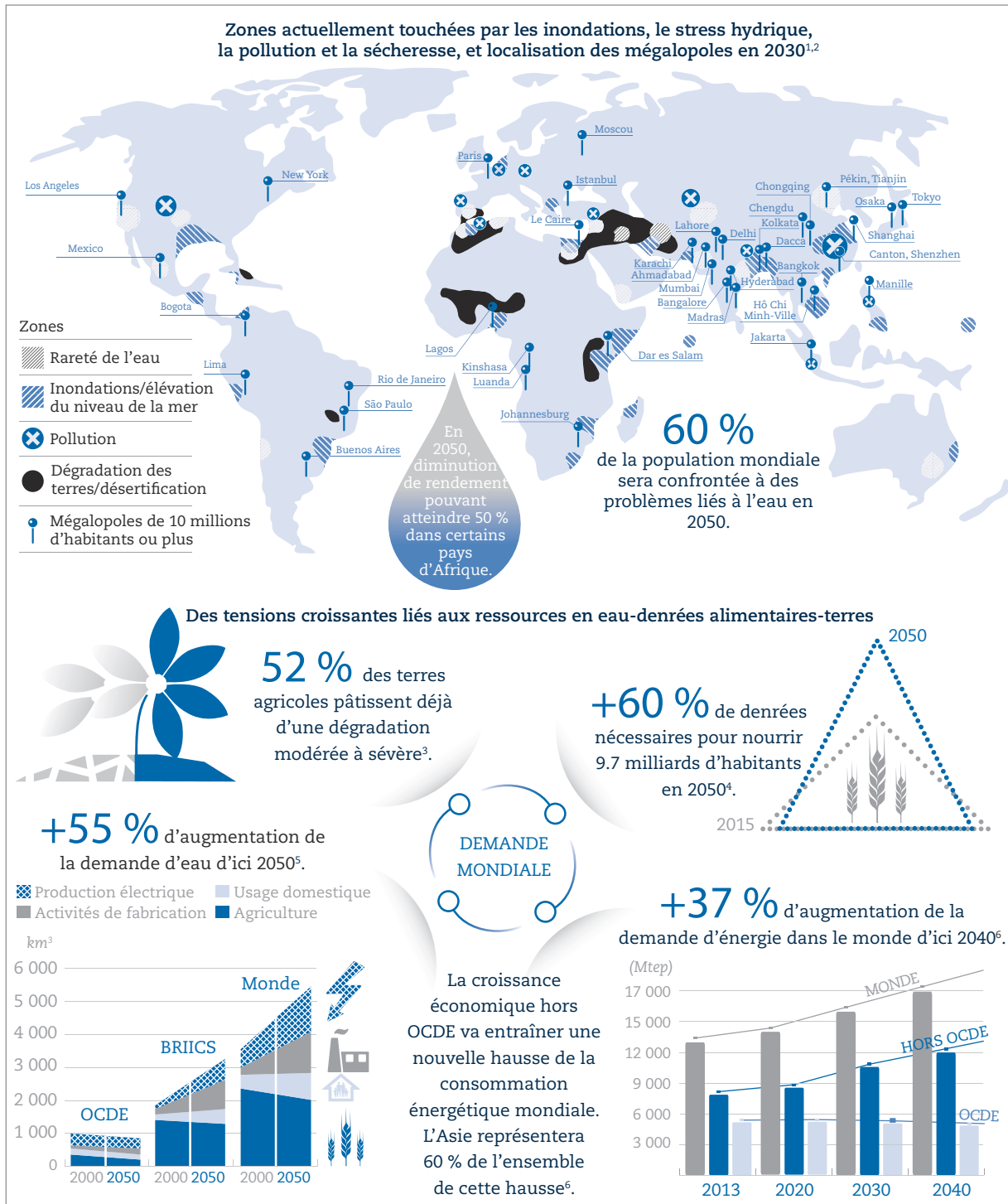
Migrations internationales

Dans de nombreux pays de l'OCDE, la plus faible proportion de personnes en âge de travailler dans la population totale influera sur le marché du travail au niveau des compétences STI. La taille de la population d'âge actif (15-64 ans) connaît actuellement un pic historique et commencera très bientôt de diminuer. Il s'ensuit que le rapport entre la taille de la population dépendante (définie comme l'ensemble des individus de moins de 15 ans et de plus de 64 ans) et celle de la population d'âge actif, qui pourvoit au soutien social et économique de la population dépendante, va augmenter. Certes, on anticipe que la capacité des citoyens âgés à continuer de travailler au-delà de l'âge légal de départ à la retraite va progresser, mais cela ne suffira sans doute pas à combler les déficits de main-d'œuvre. Toutefois, les estimations des déficits de main-d'œuvre à venir devraient également prendre en considération l'évolution technologique comme un facteur déterminant – en particulier à travers les effets de la robotique et de l'intelligence artificielle. Bien que fort controversées, ces technologies pourraient réduire la demande de main-d'œuvre et contribuer à remédier à la future inadéquation des compétences. Ces technologies, mais aussi les neurotechnologies, entre autres, pourraient également augmenter les capacités physiques et cognitives, permettant aux individus de vivre plus longtemps.

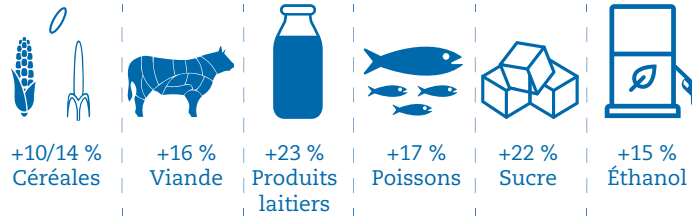
Les migrations internationales peuvent contribuer à réduire les déficits anticipés de main-d'œuvre et de compétences dans les pays de destination. Le scénario central des projections de croissance à long terme de l'OCDE formule l'hypothèse que les arrivées d'immigrés constitueront un facteur important pour atténuer le vieillissement démographique de la plupart des pays de l'OCDE (Westmore, 2014). Tout semble indiquer que les facteurs d'incitation ou d'attraction des immigrés vont se renforcer dans les décennies à venir. L'augmentation massive du nombre de jeunes dans certaines régions du monde en développement crée les conditions propices à l'émigration : un manque probable d'opportunités d'emploi et des risques croissants de conflit interne pousseront de nombreuses personnes à rechercher ailleurs une vie meilleure. Le changement climatique peut avoir une influence plus forte sur les flux migratoires internationaux à venir (AEE, 2016a).

Beaucoup d'immigrés ont des qualifications et des compétences : en 2011, dans les pays de l'OCDE, on dénombrait 31 millions d'immigrés ayant un niveau élevé d'éducation, et les migrations de personnes hautement qualifiées ont augmenté de 72 % en 10 ans (OCDE, 2015a). Les nouveaux immigrés ont représenté 15 % des entrées dans les professions en croissance rapide en Europe, notamment dans la science, la technologie et l'ingénierie, ainsi que dans la santé ou l'éducation. Aux États-Unis, cette proportion monte à 22 % (OCDE/UE, 2014). Toutefois, les compétences des immigrés ne sont pas pleinement exploitées sur les marchés du travail des pays de destination : dans les pays de l'OCDE, près de 8 millions d'immigrés diplômés de l'enseignement supérieur occupent un emploi peu ou moyennement qualifié (OCDE, 2015a). Ce phénomène représente aussi une perte pour les pays d'origine, surtout les pays en développement, confrontés à la « fuite des cerveaux », et compromet leur aptitude à développer les capacités de recherche et d'innovation autochtones dont ils ont besoin pour relever les défis associés à leur développement. Une autre préoccupation est liée à l'accroissement de communautés ethniques minoritaires dans les pays de destination, dont certaines peuvent être mal intégrées et économiquement défavorisées, ce qui pourrait donner lieu à des tensions et à de l'instabilité (OCDE, 2016a).

Ressources naturelles et énergie

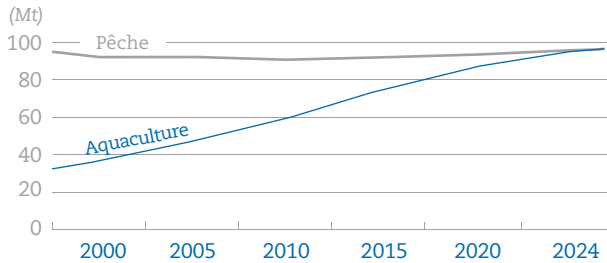


Perspectives des productions agricoles d'ici 2025⁷



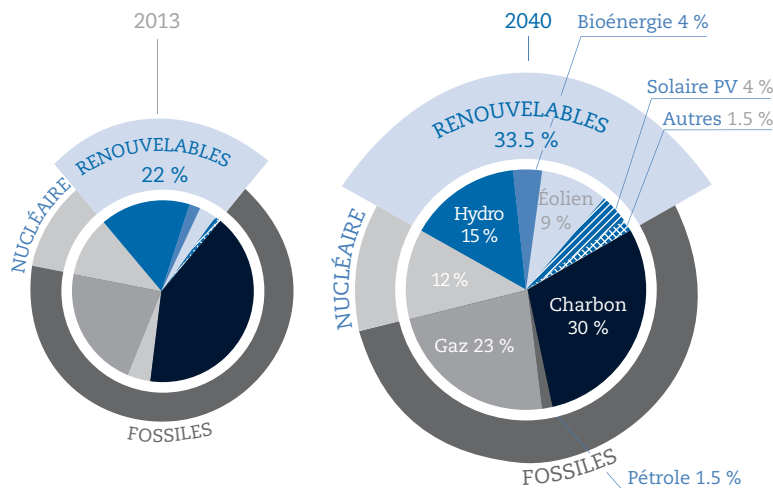
D'après les projections, les prix de la plupart des produits agricoles vont augmenter d'ici 2050. Ce sont les populations les plus pauvres qui en pâtiront le plus.

L'aquaculture, moteur de l'expansion de l'offre mondiale de produits de la mer⁷



Les pays d'Asie du Sud et de l'Est continueront de dominer la production aquacole mondiale, la Chine, l'Inde, l'Indonésie et le Viet Nam représentant la majorité de la croissance projetée.

De nouveaux marchés pour les énergies renouvelables
Structure de l'offre énergétique (% par source de production d'électricité)⁸



La promesse de l'innovation

- De nouvelles connaissances STI devraient permettre d'améliorer le suivi, la gestion et la productivité des ressources naturelles et, *in fine*, découpler la croissance économique de leur épuisement.
- La diffusion des technologies sera aussi importante que le développement de nouvelles technologies et devrait favoriser une vaste adoption des meilleures technologies disponibles pour une utilisation efficace des ressources par les entreprises, les ménages et les organismes publics.

Agriculture, denrées alimentaires et eau

- Dans l'agriculture, comme dans d'autres secteurs, l'innovation est le principal moteur de la croissance de la productivité. De nouvelles méthodes et technologies agricoles innovantes pourraient contribuer à améliorer la productivité des terres de manière plus durable.
- Les nouvelles technologies seront essentielles pour adapter les pratiques agricoles au changement climatique et à des situations plus extrêmes liées à des phénomènes météorologiques.
- Des améliorations dans les technologies d'irrigation et de nouvelles pratiques agricoles pourraient contribuer à opérer un meilleur suivi de l'utilisation de l'eau et à ralentir l'épuisement des eaux souterraines.
- Une nouvelle génération de stations d'épuration utilisant des technologies de pointe sera nécessaire pour faire face au défi des micro-polluants provenant des médicaments, des cosmétiques, etc.

Énergie

- L'éolien terrestre et le solaire photovoltaïque sont déjà courants, mais leur déploiement à grande échelle nécessitera de nouvelles innovations dans les domaines du stockage de l'énergie et de l'infrastructure de réseau intelligent, qui permettront d'accroître leur flexibilité face aux variations météorologiques.
- L'internet des objets et les technologies avancées de stockage de l'énergie offrent des possibilités de mieux suivre et gérer les systèmes énergétiques. Les villes pourraient jouer un rôle de chef de file dans le déploiement de ces approches intelligentes et innovantes.

Sources : 1. FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (2015). D'ici 2050, en l'absence d'amélioration significative dans les pratiques de production, certains pays africains pourraient voir leurs rendements reculer jusqu'à 50 % ; 2. DAES (2015b) ; 3. CNUCLD (2014) ; 4. FAO (2012) ; 5. OCDE (2012a) ; 6. AIE (2015a) ; 7. OCDE/FAO (2016b). Les céréales incluent le blé (10 %), le riz (13 %) et le maïs (14 %) ; 8. AIE (2015a).

Ressources naturelles et énergie

Les ressources naturelles sont un fondement majeur de l'activité économique et, par conséquent, du bien-être humain. L'eau, l'air, les terres et les sols fournissent des denrées alimentaires, des matières premières et des vecteurs énergétiques qui étayent les activités socio-économiques. Leur extraction et leur consommation influent sur la qualité de vie et le bien-être des générations actuelles et futures. Une gestion efficace et une utilisation durable sont essentielles pour la croissance économique et la qualité de l'environnement (OCDE, 2014b).

La croissance démographique, l'évolution des modes de vie et le développement économique de demain accroîtront la demande mondiale d'eau, de denrées alimentaires et d'énergie, et pèseront davantage sur les ressources naturelles. L'agriculture restera le plus gros consommateur d'eau, influant sur la qualité des eaux de surface comme des eaux souterraines de par le rejet d'éléments nutritifs et de micropolluants. Plusieurs sources d'énergie modifient la qualité et la quantité d'eau disponible (par exemple la fracturation hydraulique, l'hydro-électricité et les techniques de refroidissement des centrales thermiques et nucléaires), si bien que les futures modifications du bouquet énergétique et la gestion de l'eau seront indissociables (OCDE, 2012a). La demande grandissante de biocarburants induit une concurrence accrue pour les terres arables. Compte tenu de la volatilité des prix et de la rentabilité des produits alimentaires, les terres productives seront davantage réaffectées à des productions non alimentaires, ce qui risque de remettre en cause la sécurité alimentaire à moyen terme.

Les évolutions en matière de STI devraient produire de nouvelles connaissances, des solutions innovantes et de meilleures infrastructures, permettant d'améliorer le suivi, la gestion et la productivité des actifs naturels et, *in fine*, de découpler la croissance économique de leur épuisement. Les pouvoirs publics devraient jouer un rôle crucial, grâce à la mise en place d'infrastructures de la connaissance (par exemple bases de données, centres de convergence technologique), à la mise en commun de connaissances et de bonnes pratiques, et au financement de la recherche sur l'agriculture, l'énergie et la gestion des ressources naturelles.

L'eau

Un stress hydrique élevé est probable dans de nombreuses régions du monde, du fait que la demande d'eau a crû à un rythme plus élevé que la population au cours du siècle dernier (OCDE, 2012a ; 2014b). Si les tendances socio-économiques actuelles se poursuivent et qu'aucune nouvelle politique de gestion de l'eau n'est mise en œuvre (scénario de référence), la demande augmentera, selon les projections, de 55 % à l'échelle mondiale entre 2000 et 2050. Il est attendu que les augmentations les plus fortes interviennent dans les industries manufacturières (+400 %), la production d'électricité (+140 %) et les usages domestiques (+130 %).

Les nappes souterraines sont de loin la principale ressource d'eau douce sur Terre (l'eau stockée sous forme de glace non comprise). Elles représentent plus de 90 % de l'eau douce sur la planète (PNUE, 2008 ; Boswinkel, 2000, cité dans OCDE, 2012a ; OCDE, 2015b). Dans les zones pauvres en eaux de surface, telles que certaines régions d'Afrique, les nappes souterraines constituent une ressource relativement propre, fiable et économique. Cependant, dans beaucoup de régions du monde, les eaux souterraines sont soumises à une exploitation que le renouvellement des nappes ne parvient pas à compenser. La rapidité de cet épuisement est due à la multiplication des petites pompes d'irrigation dans le monde en développement. Toutefois, cette utilisation intensive ne se limite pas au monde en

développement : le volume d'eaux souterraines utilisé par l'irrigation dépasse nettement les taux de recharge des nappes dans beaucoup de pays de l'OCDE, notamment dans certaines régions aux États-Unis, en Grèce, en Italie et au Mexique, non sans compromettre la viabilité économique de l'agriculture (OCDE, 2012a). L'introduction d'améliorations dans les technologies d'irrigation et de nouvelles pratiques agricoles ainsi que de la robotique dans l'agriculture pourraient permettre un meilleur suivi de l'utilisation de l'eau et ralentir l'épuisement des nappes souterraines. Pour porter ses fruits, elle devra toutefois s'accompagner de changements institutionnels plus larges (OCDE, 2015b).

Les eaux de surface et souterraines deviennent également de plus en plus polluées en raison de flux d'éléments nutritifs provenant de l'agriculture et d'un traitement des eaux usées inadéquat. D'après les projections, les excédents d'azote imputables à l'agriculture devraient diminuer dans la plupart des pays de l'OCDE d'ici à 2050 grâce à une utilisation plus efficiente des engrais. Toutefois, en Chine, en Inde et dans la plupart des pays en développement, une tendance inverse est à prévoir. Parallèlement, les effluents d'éléments nutritifs liés aux eaux usées devraient enregistrer une vive augmentation en raison de l'urbanisation accélérée et de l'augmentation du nombre de ménages bénéficiant d'un assainissement amélioré et raccordés aux réseaux d'égouts. L'élimination des éléments nutritifs par les stations d'épuration devrait s'améliorer rapidement, mais pas assez vite pour compenser la forte augmentation prévue des volumes à traiter. Les micropolluants (médicaments, cosmétiques, produits détergents ou herbicides, par exemple) sont particulièrement préoccupants parce qu'ils pénètrent dans les masses d'eau de différents types (évacuation agriculture, ruissellement des eaux pluviales), qu'ils ont des effets néfastes et cumulatifs sur les organismes vivants (par exemple perturbation du système endocrinien, cancers, malformations congénitales) et résistent aux technologies classiques de traitement.

Les conséquences de cette dégradation de la qualité de l'eau seront une intensification de l'eutrophisation, une perte de biodiversité et des maladies (OCDE, 2012a). Dans certains pays de la zone OCDE, le prix du traitement de l'eau permettant qu'elle réponde aux normes d'eau potable peut être élevé. L'eutrophisation des eaux marines a aussi un coût économique pour les pêcheries commerciales de certains pays (comme la Corée ou les États-Unis) (OCDE, 2012a). Les progrès dans la biologie de synthèse, et l'amélioration de l'efficacité de l'assainissement de l'eau nécessiteront davantage de R-D et l'exploitation de nouvelles générations d'usines de traitement des eaux, ainsi que des systèmes d'assainissement et de réseaux d'égouts combinant l'utilisation de capteurs et de nanotechnologies (voir chapitre 2). Par ailleurs, des pratiques innovantes commencent à se faire jour : faire appel à des sources de substitution – eaux pluviales, eaux ayant déjà servi et eaux dessalées – ou encourager plusieurs usages successifs de l'eau, en vue d'atténuer les déficits hydriques.

Il est probable que l'eau deviendra un problème politique majeur. D'ici 2050, plus de 40 % de la population de la planète (3.9 milliards de personnes) risque de vivre dans des aires de drainage subissant un stress hydrique élevé, quand, parallèlement, près de 20 % de la population (1.6 milliard de personnes) sera exposée aux inondations. L'essentiel de la future croissance de la demande d'eau proviendra de pays en développement où la dégradation des conditions environnementales est déjà très avancée. À l'inverse, dans la zone OCDE, elle devrait reculer, dans le sillage des gains d'efficacité en agriculture et des investissements consacrés au traitement des eaux usées dans le monde développé (OCDE, 2012a).

L'alimentation

Les systèmes alimentaires et agricoles mondiaux sont confrontés à de multiples défis. Il faut produire davantage de denrées pour une population grandissante et plus aisée qui

exige un régime alimentaire plus diversifié. Dans le même temps, la concurrence pour d'autres utilisations des ressources naturelles s'exacerbe, et les pratiques et technologies agricoles devront s'adapter au changement climatique.

On estime que, d'ici 2050, la production de denrées alimentaires devra augmenter de 60 % afin de nourrir la population mondiale (OCDE, 2013a). La production alimentaire devrait être à même de répondre à cette demande, et la proportion de la population mondiale qui souffre de sous-alimentation devrait légèrement reculer, passant à 8 % en 2025, contre 11 % actuellement (OCDE/FAO, 2016). Cependant, l'insécurité alimentaire et nutritionnelle persistera dans de nombreuses régions, essentiellement des régions pauvres, où le déficit hydrique et la dégradation des sols continueront de mettre à mal les terres agricoles (FAO et CME, 2015). Aujourd'hui, près de la moitié des terres arables sont déjà affectées par une dégradation modérée à sévère. Chaque année, la désertification et la sécheresse pourraient bien transformer environ 12 millions d'hectares de terres productives en terres stériles (ONU, 2015b). En l'absence d'amélioration significative dans les pratiques productives, la chute des rendements pourrait atteindre 50 % dans certains pays d'Afrique en 2050 (CNUCLD, 2014). Toutefois, la situation dans la plupart des pays de l'OCDE et dans les BRIICS est moins grave, car la poursuite de l'amélioration des rendements conduira à une utilisation plus efficiente des terres. Plusieurs pays devraient connaître un phénomène de déprise agricole qui permettra la remise en état et la régénération partielles des écosystèmes (OCDE, 2012a).

Grâce à des méthodes et technologies agricoles modernes, l'amélioration de la productivité des terres pourrait être plus durable. Dans l'agriculture aussi, l'innovation est le principal vecteur de la croissance de la productivité (OCDE, 2013b). L'innovation peut également permettre d'améliorer les performances environnementales des exploitations agricoles et la qualité des produits agricoles. Des capteurs aideront les agriculteurs à gérer leur flotte de tracteurs, d'où une réduction des durées d'immobilisation et des économies d'énergie (OCDE, 2016b). Certaines innovations (portant, par exemple, sur l'irrigation, la médecine vétérinaire, les pesticides, les semences améliorées ou la gestion des risques) renferment un potentiel qui permettra aux agriculteurs de mieux faire face aux incertitudes en termes de production et de revenus. Ainsi, la hausse de la production, conjuguée à l'innovation dans l'aquaculture, a permis de réduire sensiblement les coûts de production, ce qui a été bénéfique pour les consommateurs comme pour les producteurs (OCDE, 2015c). Dans certaines régions, la difficulté consiste à adapter les systèmes de production agricole à des environnements naturels plus difficiles, en raison, par exemple, de la salinité ou de sécheresses plus fréquentes.

Les habitudes de consommation alimentaire vont vraisemblablement évoluer, sous l'effet de l'augmentation du niveau de vie, du taux d'activité accru des femmes et de la diminution du temps consacré aux repas (OCDE, 2013b). Les prix de la plupart des produits agricoles devraient augmenter fortement d'ici 2050, ce dont pâtiront tout particulièrement les populations pauvres (Ignaciuk et Mason-D'Croz, 2014). Le rôle de l'innovation sera décisif pour permettre au secteur agroalimentaire de produire des aliments plus divers, plus abondants et plus nutritifs, de faire face à l'évolution des régimes alimentaires et de fournir des matières premières pour des usages non alimentaires. Parallèlement, l'innovation devrait atténuer l'épuisement des ressources naturelles et permettre l'adaptation aux changements anticipés dans l'environnement naturel causés par le changement climatique (OCDE, 2013b).

L'aquaculture restera l'un des segments de l'agroalimentaire affichant la croissance la plus rapide et, en 2025, elle devrait fournir plus de la moitié du poisson consommé à

travers le monde. La consommation de produits de la pêche progressera sur tous les continents, mais surtout en Océanie et en Asie, et dans les pays d'Asie du Sud et de l'Est, essentiellement en Chine, en Inde, en Indonésie et au Viet Nam, lesquels dominent la production (OCDE/FAO, 2016).

Énergie

La consommation d'énergie augmentera vivement, sous l'effet de la croissance démographique et économique. Sur la base des politiques publiques existantes et planifiées (le scénario « Nouvelles politiques » de l'Agence internationale de l'énergie [AIE]), la demande mondiale d'énergie primaire devrait croître de 37 % entre 2012 et 2040. Cette progression peut être attribuée, pour l'essentiel, à la croissance économique dans les économies partenaires de l'OCDE, surtout en Asie, laquelle représentera environ 60 % de la consommation énergétique mondiale (AIE, 2015a). La croissance de la demande mondiale devrait ralentir après 2025 en conséquence des effets de prix et des répercussions de l'action publique, ainsi que des réorientations structurelles, faisant une plus large part aux services et à l'industrie légère (AIE, 2014a). Toutefois, l'industrie restera sans doute le plus gros consommateur d'énergie en 2040, suivie par les transports et les bâtiments commerciaux et résidentiels.

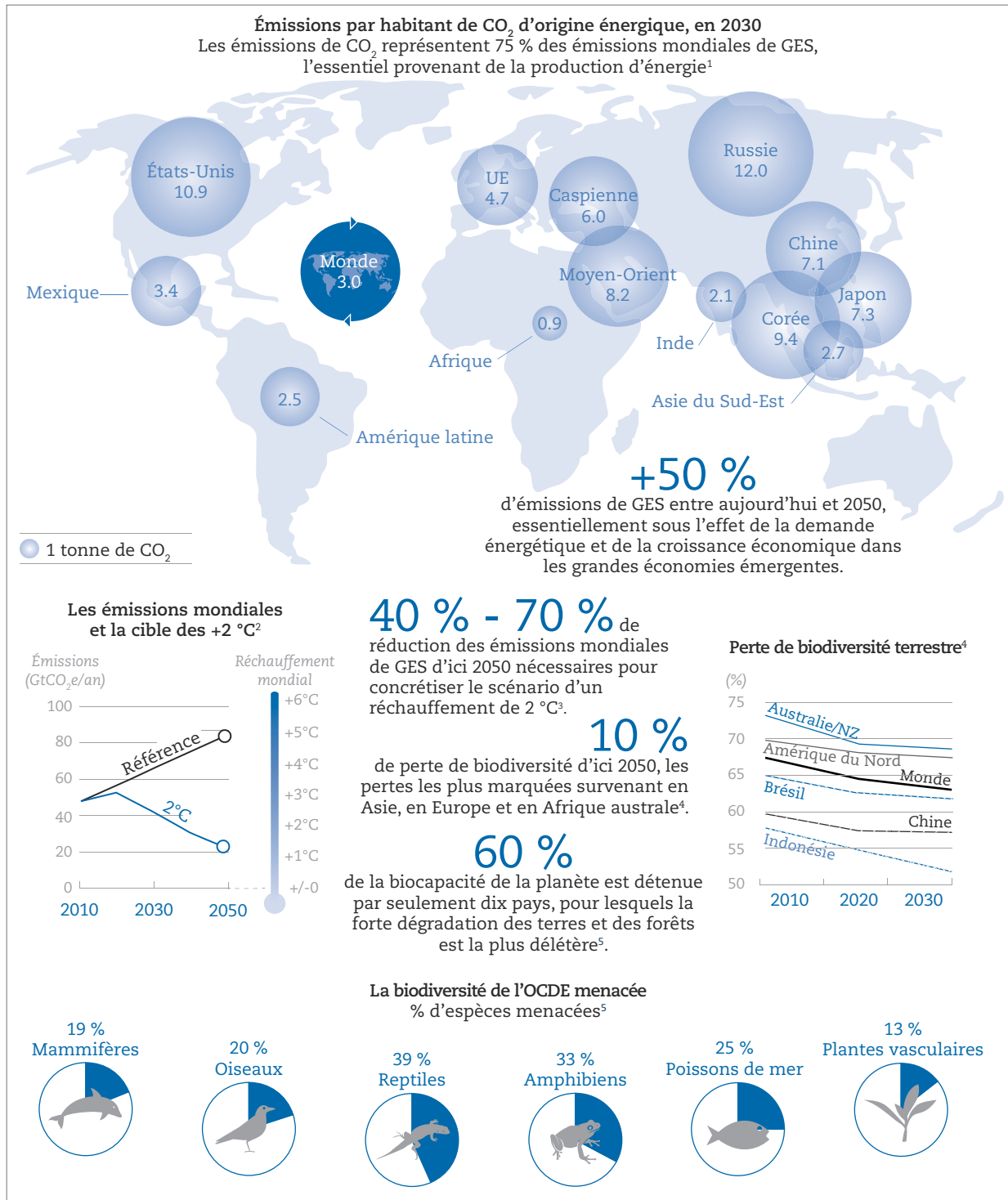
Le mix énergétique mondial sera transformé, essentiellement en raison de l'utilisation accrue des énergies renouvelables. En effet, d'ici 2040, l'offre énergétique mondiale sera constituée quasiment à parts égales de sources à bas carbone et d'énergies fossiles. Dans la consommation de sources renouvelables à des fins de production électrique, c'est l'éolien qui enregistra la progression la plus forte (34 %), suivi par l'hydro-électricité (30 %) et les technologies solaires (18 %) (AIE, 2014a). En 2050, les biocarburants pourraient fournir jusqu'à 27 % du carburant destiné au transport dans le monde, contre 2 % actuellement (AIE, 2011). Les nouveaux marchés pour les énergies renouvelables dépendront de percées dans les technologies et les infrastructures intelligentes, que permettront des investissements substantiels dans la R-D et les infrastructures, ainsi que de nouveaux partenariats public-privé stratégiques (AIE, 2014b).

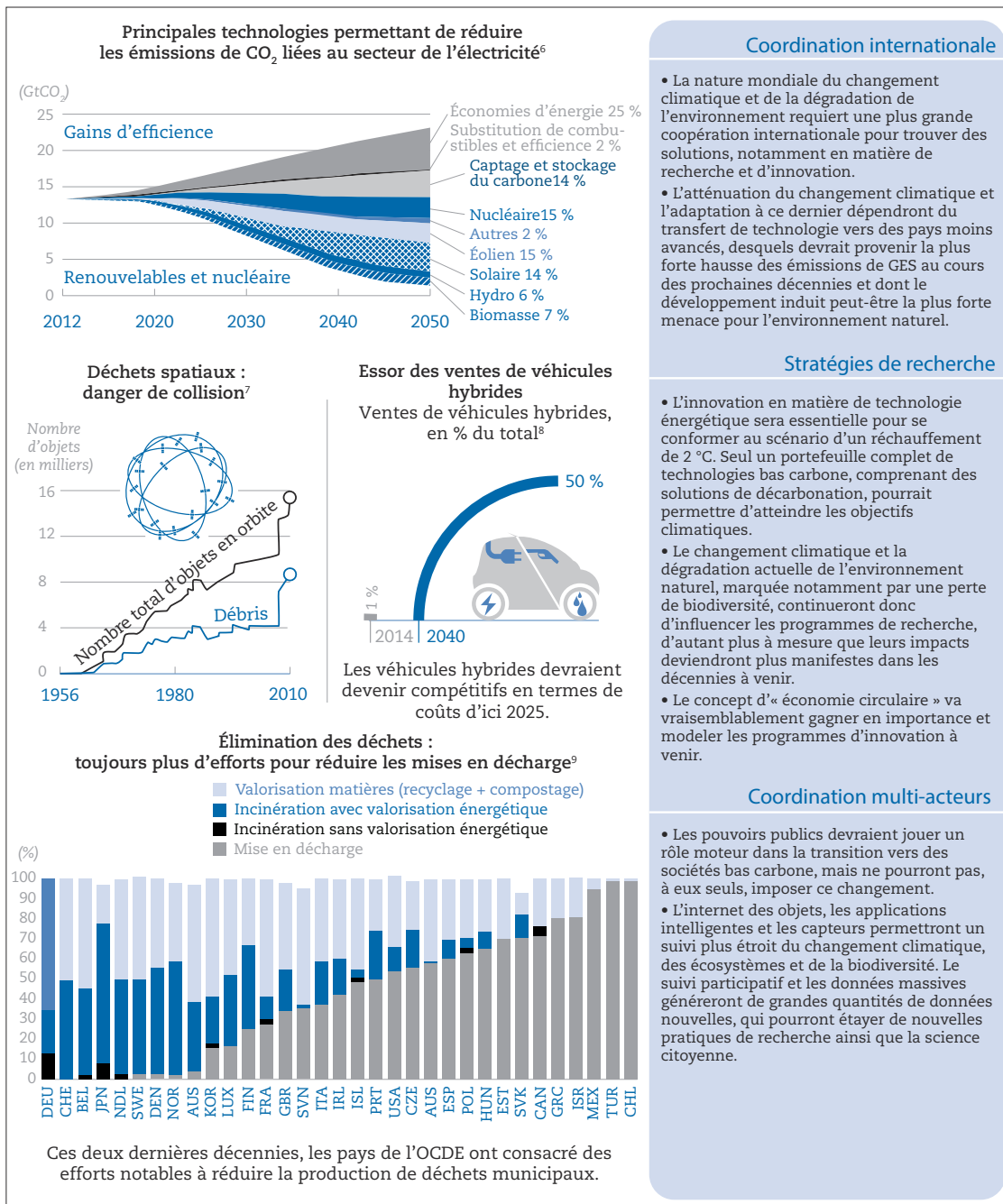
L'articulation eau-alimentation-énergie

Étant donné l'interconnexion des problématiques liées à l'eau, à l'alimentation et à l'énergie, il est difficile de s'attaquer à l'une sans tenir compte des autres. L'internet des objets (IDO), les applications intelligentes, les capteurs, la communication de machine à machine et l'accroissement de la connectivité des individus et des objets ouvrent des possibilités de mieux suivre les pressions exercées sur l'articulation eau-alimentation-énergie, d'anticiper des tensions critiques et d'équilibrer l'offre et la demande (voir chapitre 2). C'est dans les villes que pourraient naître ces stratégies intelligentes et innovantes, et qu'elles pourraient être déployées de manière efficiente (OCDE, 2014c).

L'articulation entre l'eau, l'alimentation et l'énergie (et l'environnement) est étroite, complexe et épineuse. La cohérence des politiques et une approche coordonnée des pouvoirs publics dans les domaines de l'eau, de l'agriculture et de l'énergie, ainsi que d'autres (en particulier le transport, l'industrie et le BTP) seront essentielles. Il faudra une réglementation intelligente afin de réguler la consommation de ressources naturelles (par exemple autorisations de prélèvement d'eau) et d'appliquer un tarif viable aux ressources naturelles et aux services y afférents, comme moyen de pointer la rareté et de gérer la demande. Une coopération internationale en matière de R-D, concernant la gestion des ressources et l'alignement des cadres nationaux d'action publique, sera indispensable.

Changement climatique et environnement





Sources : 1. AIE (2015b). Émissions de CO₂ liées à l'énergie par habitant dans une sélection de régions dans le scénario CPDN et moyenne mondiale dans le scénario 450 ; 2. PNUE (2015) ; 3. PNUE (2014) ; 4. OCDE (2012a). La biodiversité terrestre est mesurée par l'abondance moyenne des espèces (ou AME) terrestres, un indicateur relatif décrivant les évolutions de la biodiversité par rapport à l'état original de l'écosystème intact ou vierge (autrement dit, un écosystème parfaitement intact présente une AME de 100 %) ; 5. OCDE (2016c). Les chiffres de l'OCDE sont une simple moyenne des parts des pays disponibles. Cependant, la moyenne simple ne reflète pas les différences entre les pays et certaines espèces sont plus menacées dans certains pays que dans d'autres. Les espèces jugées En danger critique (CR), En danger (EN) ou Vulnérable (VU) sont désignées par l'expression espèces « menacées ». Il est d'autant plus difficile d'indiquer la proportion d'espèces menacées sur la Liste rouge UICN que toutes les espèces n'ont pas fait l'objet d'une évaluation complète, et que l'on dispose de si peu d'informations sur certaines espèces que celles-ci entrent automatiquement dans la catégorie Données insuffisantes (DD) ; 6. OCDE et AIE (2015). Le scénario d'une hausse des températures de 2°C (2DS) constitue l'axe principal des Energy Technology Perspectives. Le 2DS limite le total cumulé, entre 2015 et 2100, des émissions restantes de CO₂ liées à l'énergie à 1 000 GtCO₂ ; 7. NASA (29 septembre 2016) ; 8. ExxonMobil (2016) ; 9. OCDE (2015d) ; OCDE (2014d) ; OCDE (2014e).

La planète se réchauffe

Les données sur les températures de la surface des océans et des continents sur toute la planète attestent d'un réchauffement moyen combiné de 0.85°C sur la période 1880-2012. Le réchauffement le plus important, au cours du siècle dernier, s'est produit à des latitudes hautes, une large portion de l'Arctique ayant enregistré un réchauffement supérieur à 2°C. Ces 30 dernières années étaient probablement la période la plus chaude qu'ait connue l'hémisphère Nord depuis 1 400 ans (GIEC, 2014). La poursuite du réchauffement de la planète au cours des prochaines décennies est désormais inévitable.

Il existe une forte relation entre les émissions cumulées de CO₂ et les changements de la température (GIEC, 2014). Il est hautement probable que les gaz à effet de serre (GES) anthropiques aient constitué l'une des principales causes du réchauffement observé depuis le milieu du XX^e siècle. Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane et d'hémioxyde d'azote sont sans précédent depuis au moins 800 000 ans. Les émissions de CO₂ représentent environ 75 % des émissions mondiales de GES, l'essentiel étant à mettre au compte de la production d'énergie. Environ la moitié des émissions anthropiques de CO₂ depuis 1750 ont été rejetées au cours des 40 dernières années. La combustion des combustibles fossiles compte pour les deux tiers des émissions mondiales de CO₂ (OCDE, 2012a), tandis que l'agriculture est émetteur majeur de méthane et d'hémioxyde d'azote, les GES ayant le plus fort potentiel de réchauffement.

L'atténuation du réchauffement planétaire appelle des stratégies bien plus ambitieuses. Le scénario « Nouvelles politiques » de l'AIE correspond à une hausse des températures à long terme de 4°C. Il nécessite d'apporter des changements substantiels aux politiques et technologies, mais conduirait tout de même à des niveaux de changement climatique dangereux. Un scénario plus exigeant appelé 2DS, qui permettrait d'atteindre la cible des 2°C fixée à la Conférence de Paris sur le climat, requiert une réduction de 40 à 70 % des émissions mondiales de GES d'ici 2050. Cela signifie que la part de l'approvisionnement en électricité sobre en carbone passera de 30 % à plus de 80 % en 2050 (GIEC, 2014).

L'innovation technologique dans le domaine de l'énergie sera cruciale pour réaliser le 2DS. Les objectifs climatiques pourraient être atteints grâce à un portefeuille complet de technologies bas carbone, comprenant des solutions de décarbonation (AIE, 2015c). Certaines solutions seront applicables dans la plupart des cas, tandis que d'autres concerneront spécifiquement tel ou tel secteur. Dans le domaine de l'énergie, l'éolien terrestre et le solaire PV sont prêts à être généralisés. Toutefois, avant de les déployer à grande échelle, il faudra de nouvelles innovations dans les domaines du stockage de l'énergie et l'infrastructure de réseau intelligent, qui permettront d'accroître leur flexibilité face aux variations météorologiques (AIE, 2015c). Les technologies de captage et de stockage du carbone (CSC) devraient jouer un rôle important, bien que de nouvelles évolutions techniques et du marché soient nécessaires pour qu'elles puissent être déployées largement. Les nanotechnologies peuvent être à l'origine de solutions innovantes pour les matériaux de CSC (OCDE, 2016b). La biotechnologie offre des solutions originales à la dépendance vis-à-vis du pétrole et de la pétrochimie : les biobatteries, la photosynthèse artificielle et les microorganismes produisant des biocarburants sont quelques-unes des récentes avancées qui pourraient favoriser une révolution de la production d'énergie.

Par ailleurs, il existe un marché grandissant pour les produits et composants à faible consommation d'énergie et, sur des segments tels que l'industrie, le transport et le bâtiment, les technologies propices à l'efficacité énergétique devraient jouer un rôle de premier plan. Les nanotechnologies peuvent apporter des solutions innovantes pour abaisser la consommation d'énergie dans l'industrie et permettre le remplacement de processus consommant beaucoup d'énergie. En outre, les composants ou technologies peu énergivores pourraient endosser un rôle fondamental dans le développement et l'adoption d'autres

technologies. Ainsi, la fabrication additive peut favoriser une consommation moindre de matériaux et d'énergie grâce à des modèles sophistiqués et à des principes de production juste à temps. On pourra ainsi imprimer des pièces de rechange pour des objets que, sans cette technologie, il aurait fallu jeter ; on pourra aussi réduire le poids d'un véhicule, ou améliorer l'efficacité énergétique d'un produit. Les économies d'énergie ainsi obtenues seront assez importantes, en particulier dans les secteurs tels que l'aérospatial.

On anticipe que les économies émergentes seront à l'origine de la majeure partie des augmentations d'émissions de GES dans les prochaines décennies ; l'adoption par ces pays des technologies bas carbone innovantes sera donc cruciale, et pourrait représenter quasiment les trois quarts des réductions d'émissions de CO₂ dans le monde d'ici 2050, dans le 2DS. Le développement économique rapide de ces régions soutiendra le déploiement des technologies, mais une coopération internationale sera nécessaire pour garantir le transfert de technologies et de connaissances. En outre, afin que les futures technologies puissent être adoptées, il faudra améliorer les compétences et les capacités organisationnelles dans le pays (AIE, 2015c).

Les conséquences sur le climat, les écosystèmes et la santé sont inquiétantes

Une série de graves changements climatiques accompagneront le réchauffement de la planète. Des vagues de chaleur se produiront vraisemblablement plus souvent et dureront plus longtemps, tandis que les épisodes de précipitations extrêmes deviendront plus intenses et plus fréquents dans de nombreuses régions. Les précipitations vont augmenter dans les régions tropicales et aux latitudes plus hautes et elles diminueront dans les zones plus sèches. Les océans continueront à s'acidifier, affectant fortement les écosystèmes marins. Le niveau moyen de la mer sur la planète va continuer de s'élever, à un rythme encore plus élevé que durant les quatre dernières décennies. La région arctique continuera de se réchauffer plus rapidement que la moyenne mondiale, d'où la poursuite de la fonte des glaciers et du pergélisol. Cependant, s'il est très probable que la circulation méridienne océanique de retournement de l'Atlantique va s'affaiblir au cours du XXI^e siècle, on n'anticipe ni transition brusque ni effondrement (GIEC, 2014).

Le changement climatique aura des incidences majeures sur la sécurité alimentaire et hydrique aux niveaux régional et mondial. Des précipitations extrêmes et variables influenceront sur l'approvisionnement en eau, la sécurité alimentaire et les revenus agricoles, et devraient conduire à des déplacements des zones de production de cultures vivrières ou non vivrières à travers le monde (GIEC, 2014). Le changement climatique conduira à un appauvrissement des ressources renouvelables en eaux de surface et en eaux souterraines dans la plupart des régions les plus arides, ce qui exacerbera la concurrence intersectorielle autour des ressources hydriques (GIEC, 2014).

À mesure que le changement climatique modifie les systèmes eau-alimentation et la qualité de l'air, de nouvelles maladies pourraient apparaître ou des maladies existantes prendre de l'ampleur. Le nombre de décès prématurés imputables à la pollution de l'air extérieur devrait doubler, à l'échelle mondiale, d'ici 2050 (OCDE, 2012a). Le paludisme est la maladie infectieuse la plus importante à être exacerbée par le changement climatique. Actuellement, plus de la moitié de la population mondiale (3.7 milliards de personnes) vit dans une zone à risque. Ce chiffre devrait atteindre 5.7 milliards d'individus en 2050. L'essentiel de la population vivant dans des zones à risque se trouvera en Asie (3.2 milliards de personnes) et en Afrique (1.6 milliard).

Les catastrophes liées aux événements météorologiques, en particulier aux inondations, sécheresses et tempêtes, ont été plus nombreuses ces 30 dernières années à l'échelle mondiale (données de l'Emergency Events Database EM-DAT, citées dans OCDE, 2012a). La science et la technologie joueront un rôle crucial dans le suivi des écosystèmes et la gestion

des catastrophes naturelles. Les agences nationales de météorologie, qui ont souvent la responsabilité des systèmes d'alerte rapide, s'appuieront de plus en plus sur des données satellites, en complément des réseaux de radars terrestres, afin de procéder à une observation ininterrompue de la situation météorologique sur la planète, de sorte que les systèmes d'alerte puissent gagner en efficacité (OCDE, 2012c). Le déploiement de constellations de nano- et microsattelites pourrait permettre le suivi continu d'aires géographiques plus vastes, y compris des océans, et l'amélioration des prévisions météorologiques (voir chapitre 2). Les secteurs du BTP et des transports s'appuieront sur des matériaux et technologies innovants pour s'adapter à de nouvelles conditions environnementales extrêmes.

La biodiversité mondiale est menacée

Les changements de température et de régime de précipitations influent sur la répartition des espèces et des écosystèmes. Avec la montée des températures, les écosystèmes et les aires de distribution des espèces ont tendance à glisser vers les pôles ou vers des altitudes plus élevées (OCDE, 2012a). Sous l'effet de cette migration, certains écosystèmes se rétrécissent et d'autres s'étendent. Le recul de la biodiversité représente l'un des principaux défis environnementaux. Malgré des progrès, la biodiversité mondiale s'appauvrit et devrait continuer de s'appauvrir (OCDE, 2012a). Environ 20 % des mammifères et des oiseaux, près de 40 % des reptiles, un tiers des amphibiens et un quart des poissons de mer sont déjà sur la liste des espèces menacées (OCDE, 2016c). Selon le scénario de référence, en l'absence de nouvelles mesures des pouvoirs publics, la biodiversité devrait s'appauvrir de 10 % d'ici 2050, la majeure partie de cette perte intervenant avant 2030. Ces reculs marqués concerneraient tout particulièrement la brousse et la savane, ainsi que les forêts tempérées et tropicales (OCDE, 2012a).

Les menaces sont particulièrement fortes dans les pays densément peuplés et où les activités humaines sont très concentrées. Les pressions sur la biodiversité peuvent être d'ordre physique (altération et morcellement des habitats), chimique (contamination toxique, acidification, marées noires, autres pollutions) ou biologique (altération de la dynamique des populations et de la structure des espèces due à l'introduction d'espèces exogènes ou exploitation commerciale des espèces sauvages) (OCDE, 2015e). Mais à ce jour, les changements d'affectation des terres et leur gestion sont la principale cause d'appauvrissement de la biodiversité terrestre dans le monde (OCDE, 2012a). Le déboisement reste un sujet de préoccupation majeur, même si son rythme annuel ralentit. La surexploitation des ressources en eau et les modifications hydromorphologiques (eutrophisation, acidification) menacent les écosystèmes aquatiques.

Pourtant, les avantages de la biodiversité et des services écosystémiques constituent une incitation à investir dans leur conservation et leur utilisation durable. Selon certaines estimations, la valeur des services de pollinisation assurés par les insectes pollinisateurs s'élèverait à 192 milliards USD par an, et la valeur des récifs coralliens de la planète pour les pêcheries, la protection des côtes, le tourisme et la biodiversité, à 30 milliards USD par an. La perte globale d'avantages procurés par les forêts, à savoir la fourniture d'habitats naturels, le piégeage du carbone, la régulation des ressources en eau et la prévention de l'érosion, représente entre 2 000 et 5 000 milliards USD par an (exemples cités dans OCDE, 2012a). Dans certains pays, en Asie et en Afrique, 80 % de la population s'en remet à la médecine traditionnelle pour les soins de santé primaires (OCDE, 2014f). À mesure que les extinctions se poursuivent, la disponibilité de certains de ces médicaments risque d'être réduite, et le développement de nouveaux pourrait être entravé.

La plupart des aires où la biodiversité est riche sont situées dans des pays en développement. Les pays à faible revenu devraient représenter 39 % du recul de biodiversité terrestre mondiale, les BRIICS 36 % et les pays de l'OCDE 25 % d'ici 2050 (OCDE, 2012a). Ces reculs devraient être particulièrement marqués au Japon et en Corée, en Europe, en Afrique australe et en Indonésie. Certains pays d'Europe centrale voient déjà leur biodiversité

extrêmement menacée (OCDE, 2016c). En outre, ce sont les pays en développement qui supportent généralement la majeure partie des coûts liés à la perte de biodiversité, car ils sont souvent plus directement dépendants des ressources naturelles pour leur développement économique que les pays développés (OCDE, 2012a).

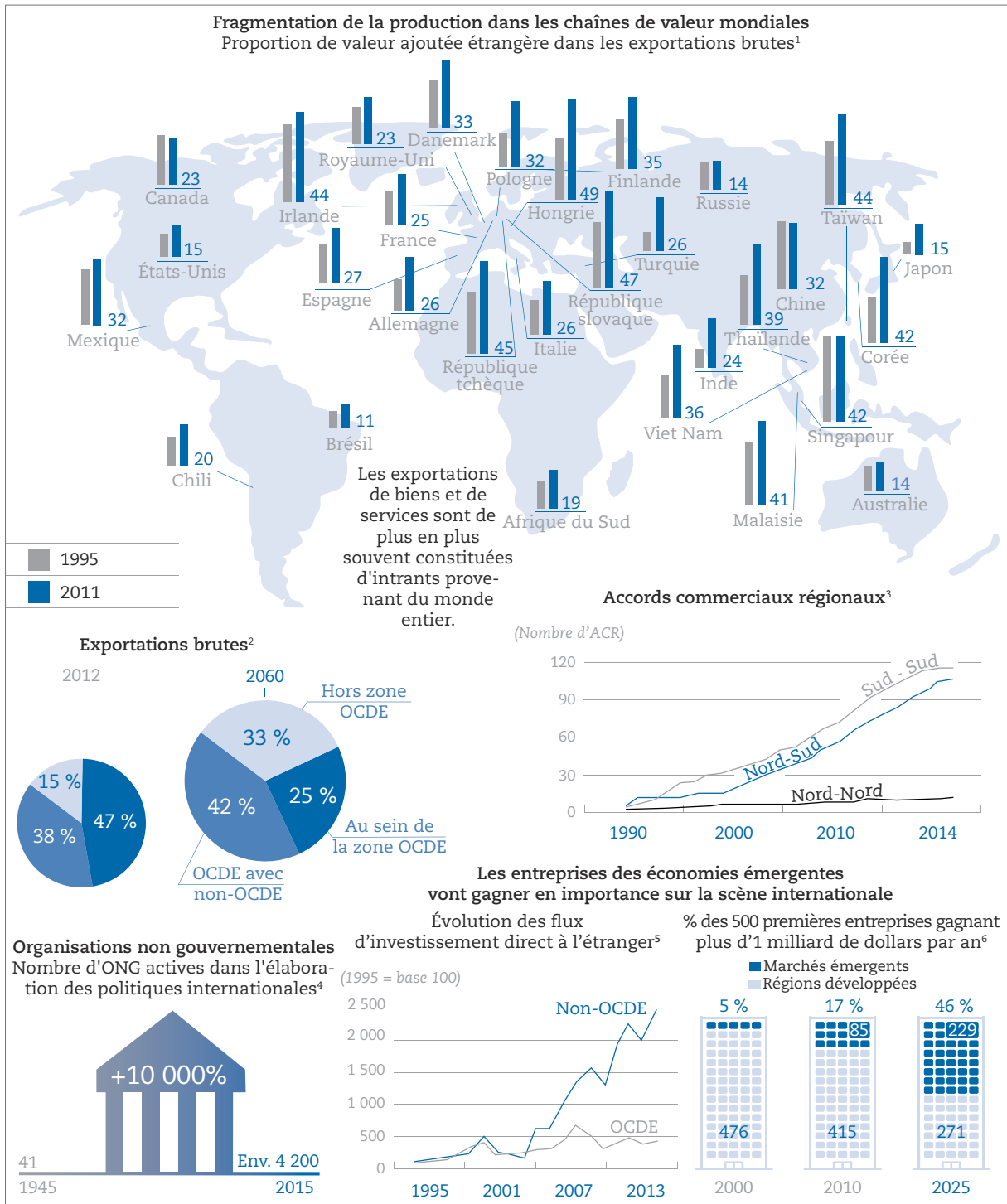
Les pouvoirs publics s'efforcent de créer des réseaux d'aires protégées reliées par des corridors naturels en vue de rétablir, de maintenir ou de renforcer la cohérence écologique et la capacité naturelle d'adaptation des écosystèmes. Pour les écosystèmes transfrontaliers, le maintien de la connectivité peut nécessiter un effort de coordination entre les gestionnaires et les chercheurs des pays concernés. En outre, les communautés locales et autochtones peuvent jouer un rôle crucial dans la gestion des aires protégées et en tant que sources de connaissances locales et traditionnelles (OCDE, 2012a). L'IDO, les applications intelligentes et les capteurs pourraient faciliter la gestion de ces aires protégées et contribuer à associer les populations locales et celles situées dans les zones reculées à un suivi plus étroit des écosystèmes et de la biodiversité. Le suivi participatif et les données massives pourraient générer des vastes quantités de données nouvelles et appuyer les nouvelles pratiques de recherche et la science citoyenne.

Recyclage des déchets et principe de l'économie circulaire

Une piètre gestion des déchets a des répercussions négatives sur la santé humaine et sur l'environnement. Ces deux dernières décennies, les pays de l'OCDE ont consacré beaucoup d'efforts à juguler la production de déchets, et la croissance de la production de déchets municipaux a ralenti, passant de 1.24 % entre 1995 et 2004 à 0 % entre 2005 et 2014 (OCDE, 2015e). Aujourd'hui, une personne vivant dans la zone OCDE génère en moyenne 520 kg de déchets par an. Des quantités croissantes de déchets sont réintroduites dans l'économie grâce au recyclage. Le recours au prétraitement mécanique et biologique progresse : il améliore les taux de valorisation et le rendement de l'incinération. Des directives publiques encouragent ou obligent les producteurs à assumer la responsabilité de leurs produits après les avoir vendus ; ainsi, l'Union européenne a défini des objectifs chiffrés de recyclage. Quelques pays ont interdit la mise en décharge de déchets municipaux. Les taux de recyclage de matières premières telles que le verre, l'acier, l'aluminium, le papier et le plastique sont en hausse, atteignant même 80 % dans certains cas (OCDE, 2015f).

Actuellement, on peut percevoir un infléchissement vers l'« économie circulaire ». Les pays de l'OCDE multiplient les efforts pour s'orienter vers une économie plus sobre en ressources et semblent avoir amorcé un découplage entre consommation de matières et croissance économique. L'économie circulaire suppose un changement systémique, se rapprochant d'une société qui fait un usage efficient de ses ressources, produisant peu voire pas de déchets, ce qui nécessite de grandes évolutions dans nos modes de production et de consommation. Certes, se détourner du modèle « prélever, fabriquer, jeter » en vigueur renferme un potentiel sur le plan des économies de matériaux et de la réduction d'empreinte sur l'environnement, mais au-delà, l'économie circulaire pourrait créer d'immenses opportunités économiques, liées à l'émergence de nouveaux services et de nouveaux modèles d'activité, et la relation entre producteur et consommateur, ainsi qu'entre un produit et son utilisateur, pourrait se transformer radicalement. On observerait une augmentation de la réparation, de la réutilisation, de la redistribution et de la rénovation, tout comme des taux de recyclage ; et la technologie des matériaux évoluerait et permettrait de passer à la production et à l'utilisation d'une forte proportion de matériaux renouvelables dans les produits finis (Waste Management World, 2015). À plus grande échelle, l'économie circulaire promet de générer des bénéfices substantiels aussi bien sur le plan macroéconomique que pour les entreprises. On estime que les seules économies de matériaux pourraient dépasser les 1 000 milliards USD par an (FEM, 2014 ; McKinsey Centre for Business and Environment et la Fondation Ellen MacArthur, 2015).

Mondialisation



Une criminalité de plus en plus mondialisée L'évasion fiscale est mondiale
 Valeur du commerce international illicite (estimations, en milliards USD, 2015)⁷ Pertes de recettes fiscales (estimations, en milliards USD, 2015)⁸



Le commerce illicite est une entreprise de plusieurs milliards de dollars.



100 à 240 milliards de dollars pourraient être perdus par an en raison de l'évasion fiscale ...



... Cela représente entre 4% et 10% des revenus globaux tirés de l'impôt des sociétés.

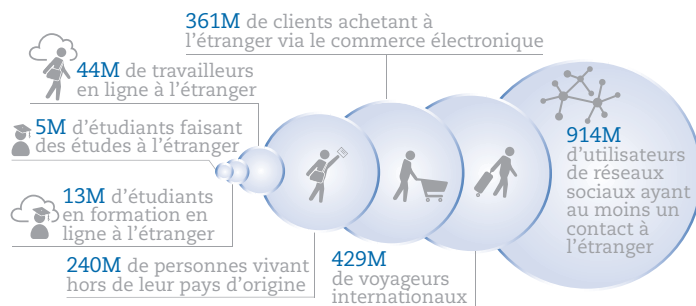
Coopération internationale en faveur de la R-D

- La mondialisation facilite la large diffusion des connaissances, des technologies et des nouvelles pratiques commerciales, et est elle-même approfondie par cette diffusion.
- La politique nationale de STI est formulée en termes mondiaux, reflétant la nature mondiale de nombreux problèmes et défis, ainsi que la mondialisation des marchés et de la production.
- Des accords et initiatives internationaux, tels que l'Accord de Paris sur le climat et les ODD des Nations Unies approfondiront la coopération internationale en matière de recherche et l'orienteront sur de grands défis mondiaux.

R-D des entreprises

- Les activités de R-D et d'innovation des entreprises sont de plus en plus mondialisées en raison de la modification de l'organisation internationale des fonctions des multinationales, dont les activités de R-D s'internationalisent plus rapidement et à plus grande échelle que par le passé.
- Les chaînes de valeur mondiales encouragent la spécialisation industrielle nationale et une concentration croissante des capacités d'innovation chez les acteurs nationaux.
- Les normes jouent un rôle crucial dans l'innovation et, de plus en plus, sont internationales puisque, dans une économie mondialisée, la compatibilité entre les pays et les dispositifs de jonction revêtent une importance croissante.

Personnes participant à la mondialisation aujourd'hui⁹

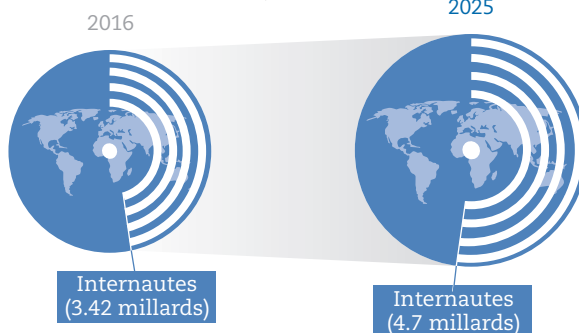


En 2020, 940 millions d'acheteurs en ligne devraient consacrer près de 1 000 milliards USD à des transactions électroniques transfrontières.

Mobilité des personnes

- La mobilité internationale des individus très qualifiés à différents stades de leur développement personnel et de leur carrière professionnelle constitue un moteur majeur de la circulation des connaissances à travers le monde.
- Les pays et institutions sont engagés dans une concurrence internationale pour attirer les talents afin de bâtir leurs propres centres d'excellence scientifique mondiale.
- Les technologies numériques contribuent de plus en plus à soulager les contraintes de la mobilité, permettant aux personnes de maintenir un contact régulier avec leurs amis et leurs familles par exemple.

Internautes, 2016-25¹⁰



L'anglais est la lingua franca du monde globalisé avec une personne sur quatre l'utilisant globalement. Les locuteurs non natifs représentent plus de 80 % des communications en ligne en anglais¹¹.

Sources : 1. OCDE et OMC (2016) ; 2. Johansson et Olaberría (2014a) ; 3. OMC (2013) ; 4. ECOSOC (2016). Les chiffres sont cumulatifs. Les données sont prises en compte jusqu'au 8 janvier 2015 ; 5. OCDE (2015f) ; 6. McKinsey & Company (2016) ; 7. OCDE (2016d) ; 8. OCDE et G20 (2016). Le phénomène BEPS désigne les stratégies d'évasion fiscale qui exploitent les failles et les différences dans les règles fiscales en vue de transférer artificiellement des bénéfices dans des pays ou territoires où ils sont faiblement taxés, voire ne le sont pas du tout. Plus de 100 pays et territoires collaborent au sein du cadre inclusif pour mettre en œuvre les mesures et lutter contre les pratiques de BEPS ; 9. Facebook ; AliResearch ; ministère du Commerce des États-Unis ; OCDE ; Banque mondiale ; MGI (2016) ; 10. Burt, D. (2014) ; 11. Sharifian, F. (2013).

Mondialisation

La mondialisation, prenant la forme de flux internationaux de capitaux, de biens et de personnes, facilite la diffusion des connaissances, des technologies et des nouvelles pratiques commerciales. Ces dynamiques influent positivement sur l'innovation et la productivité économique à long terme. En outre, les évolutions technologiques, notamment dans les TIC et les transports, facilitent voire accélèrent la mondialisation. La mégatendance consistant en une mondialisation toujours accrue pourrait continuer d'exercer une forte influence au cours des 10 à 15 prochaines années, même si des contre-courants, tels qu'un protectionnisme grandissant, pourraient perturber cette évolution et générer une certaine discontinuité.

Échanges et chaînes de valeur mondiales

Depuis 1995, la plupart des pays ont enregistré une hausse marquée de la part de la valeur ajoutée étrangère tant dans leurs exportations que dans leur consommation finale, témoignant de l'interdépendance grandissante de l'économie mondiale (OCDE, 2015g). L'intégration des échanges mondiaux devrait continuer de progresser à l'avenir, quoique à un rythme légèrement moins élevé qu'au cours des dernières décennies. Les échanges de services devraient continuer de croître plus vite que les échanges de biens, d'une part en raison de la poursuite de la libéralisation du secteur, d'autre part parce que les services représentent une proportion croissante du PIB, et, enfin, du fait des tendances de consommation induites par le vieillissement des populations. L'évolution du poids économique mondial se reflétera dans la structure des échanges : on anticipe que les exportations provenant d'économies partenaires de l'OCDE passeront de 35 % des exportations mondiales en 2012 à 56 % en 2060 (Braconier, Nicoletti et Westmore, 2014).

La croissance rapide des chaînes de valeur mondiales (CVM) a constitué un moteur important de la mondialisation économique au cours des dernières décennies et s'est traduite par une interconnexion croissante entre les pays. Au fil du temps, les CVM sont devenues, en moyenne, plus longues et plus complexes, la production faisant intervenir un nombre croissant de pays, de plus en plus souvent des économies émergentes. Étant donné que la production dans les CVM connaît une fragmentation internationale grandissante, étayée par une logistique, des télécommunications et des services aux entreprises fondés sur le numérique, des activités à plus forte intensité de main-d'œuvre ont généralement été délocalisées des pays de l'OCDE vers des économies où la main-d'œuvre est bon marché. Cependant, on ne sait pas dans quelle mesure ce phénomène se poursuivra à l'avenir. Les hausses salariales, par exemple en Chine orientale, et l'automatisation croissante érodent l'avantage dont disposent les économies émergentes en termes de coûts du travail, tandis que la longueur et la complexité des CVM exposent les entreprises à un degré de plus en plus élevé de risques liés à l'approvisionnement en cas de choc défavorable. En outre, la gestion et les problèmes logistiques, opérationnels et de gestion, en particulier les problèmes de droits de propriété intellectuelle, ont souvent induit des coûts « cachés » substantiels (c'est-à-dire des coûts qui n'avaient pas été pris en compte dans la décision de délocaliser), si bien que, dans certains cas, la délocalisation était moins rentable, voire pas rentable du tout (OCDE, 2015h). L'ensemble de ces facteurs du côté de l'offre peut motiver certaines entreprises dans certains secteurs à « relocaliser » leurs activités plus près de leurs principaux marchés dans les pays de l'OCDE.

Dans le même temps, des économies émergentes, comme la Chine, s'efforcent de se recentrer sur des activités à plus forte valeur ajoutée, et changent de positionnement (à la fois vers l'amont et vers l'aval) dans les CVM. L'innovation est la clé de la revalorisation des capacités. Les ressources de R-D industrielle se sont développées à un rythme rapide dans ces régions, et la progression régulière des chiffres d'intensité de R-D indique une concurrence mondiale en augmentation dans les actifs de R-D. Plus généralement, l'importance croissante

des CVM pourrait déboucher sur une plus forte concentration dans un ensemble spécifique de tâches – celles dans lesquelles les entreprises d'un pays disposent d'un avantage comparatif. Selon les structures de gouvernance des CVM, cela peut conduire à une concentration accrue des capacités d'innovation parmi les acteurs nationaux (OCDE, 2015i).

Outre les actions destinées à favoriser des échanges multilatéraux plus ouverts ces dernières décennies, de nombreux pays se sont attachés, plus récemment, à établir simultanément de nouveaux accords commerciaux régionaux (ACR) et bilatéraux afin d'accroître les échanges et de stimuler la croissance. La multiplication actuelle des ACR reflète en partie une demande d'intégration plus forte que ce que n'ont permis les accords multilatéraux actuels. En conséquence de ces accords, la géographie des CVM pourrait s'orienter vers une organisation plus régionale.

Entreprises multinationales

Les activités de R-D et d'innovation des entreprises sont de plus en plus mondialisées en raison de la modification de l'organisation internationale des fonctions des multinationales, dont les activités de R-D s'internationalisent plus rapidement et à plus grande échelle que par le passé (OCDE, 2015i). Dans plusieurs pays de l'OCDE, les filiales sous contrôle étranger jouent un rôle important dans la R-D nationale. En 2013, on leur devait plus d'un cinquième de la R-D totale des entreprises dans la majorité des pays pour lesquels on disposait de données (OCDE, 2015g). Les inventions brevetées sont souvent le fruit d'une collaboration entre des inventeurs de différents pays. En moyenne, les co-inventions internationales ont augmenté de 27 points de pourcentage entre 2000-03 et 2010-13 (OCDE, 2015g).

Les flux mondiaux d'investissements directs étrangers (IDE) ont été multipliés par trois depuis le milieu des années 90, soit une croissance plus rapide que celle des échanges internationaux de biens et services. Même si l'OCDE concentre toujours la majeure partie des flux, la situation a radicalement changé au cours des dix dernières années. Jusqu'en 2003, les pays de l'OCDE étaient responsables d'environ 95 % des sorties d'IDE, puis cette part est passée sous la barre des 80 % sous l'effet du bond spectaculaire de l'investissement international des économies émergentes. Au total, les sorties en provenance des BRIICS ont plus que triplé entre 2002-07 et 2008-13. Une partie de cet investissement était destinée à acquérir des technologies plus avancées que celles disponibles dans le pays, dans le cadre de stratégies d'entreprise visant à moderniser les technologies – phénomène qui pourrait s'amplifier à mesure que les économies émergentes se rapprochent des frontières technologiques dans certains secteurs. En ce qui concerne les entrées d'investissements, les entrées d'IDE en Chine et en Asie du Sud-Est ont bondi d'une moyenne annuelle de 83 milliards USD entre 1995 et 2001 à environ 417 milliards USD par an entre 2008 et 2013. La Chine était le premier bénéficiaire hors OCDE d'IDE en 2013, les flux entrants annuels ayant doublé au cours de la période 2008-13. Les entrées d'IDE donnent les moyens aux pays qui en bénéficient d'accéder à de nouvelles technologies ; elles sont également source de création d'emplois et d'externalités de connaissances pour les entreprises nationales (OCDE, 2015g).

Les normes jouent un rôle essentiel dans l'innovation, établissant un consensus à l'échelle de l'ensemble du secteur sur les règles, pratiques, systèmes de mesure ou conventions appliqués à une technologie, une activité commerciale ou la société en général. Les travaux de normalisation sont de plus en plus menés à l'international, ce qui s'explique par l'importance croissante que revêtent, dans une économie mondialisée, une compatibilité et une interface transfrontières. Les entreprises qui jouent un rôle de premier plan dans l'établissement de normes internationales peuvent en retirer des avantages, si

tant est que ces nouvelles normes soient compatibles avec celles existant au niveau national et/ou avec les caractéristiques de leur appareil de production (OCDE, 2015i).

Flux numériques mondiaux

Non seulement les flux de produits et les flux financiers ont-ils augmenté ces vingt dernières années, mais les flux numériques associés au commerce, à l'information, aux recherches, à la vidéo, aux communications ou au trafic intra-entreprise ont eux aussi grimpé en flèche. La bande passante transfrontière est 45 fois plus importante qu'en 2005 et devrait encore être multipliée par neuf au cours des cinq prochaines années (MGI, 2016). Les plateformes numériques mondiales contribuent à abaisser les coûts des communications et transactions transfrontières, ce qui réduit l'échelle à partir de laquelle les entreprises peuvent opérer à l'international et permet aux petites entreprises de devenir des « micro-multinationales » (eBay, s.d.). Les plateformes numériques mondiales aident également les individus à établir leurs propres connexions entre pays, grâce à quoi ils peuvent apprendre, trouver du travail, faire montre de leur talent et bâtir des réseaux personnels. Quelque 900 millions de personnes ont des contacts à l'étranger à travers les médias sociaux, et 360 millions de personnes prennent part au commerce électronique transfrontière, chiffres en rapide augmentation (MGI, 2016).

Mondialisation du commerce illicite

La libéralisation des échanges et le coût relativement faible des chaînes logistiques transcontinentales ont modifié la portée géographique, le volume et l'éventail de produits échangés sur les marchés illicites. Les bénéfices engendrés par le crime organisé transnational ont été estimés à pas moins de 870 milliards USD, soit l'équivalent de 1.5 % du PIB mondial (ONUDD, 2011). L'ampleur et la gravité des conséquences sociales, économiques, voire politiques, ont elles aussi évolué (OCDE/EUIPO, 2016). Par exemple, le trafic international de stupéfiants, d'armes et, en particulier, d'humains, a, de toute évidence, des effets sociaux délétères. Le commerce illicite de produits de contrefaçon met à mal le modèle d'investissement dans la recherche et le développement – dans le secteur pharmaceutique, par exemple. Le trafic d'espèces sauvages détruit la biodiversité et peut favoriser la propagation d'affections zoonotiques. Sans compter que la corruption et l'abus d'autorité, de mise dans le commerce illicite, compromettent la bonne gouvernance et peuvent aller jusqu'à menacer la stabilité politique (OCDE, 2016d).

Les réseaux illicites internationaux dépendent et tirent profit, dans une large mesure, des mêmes technologies et innovations que celles que les entreprises privées légales exploitent pour renforcer leur compétitivité. L'internet en est un exemple probant : la migration, vers le cyberspace, des activités criminelles accroît le niveau global de menace qui pèse sur la sécurité numérique. On assiste au développement d'une économie souterraine de la cybercriminalité, avec des groupes transnationaux bien organisés, dotés de compétences considérables en matière d'innovation technique, qui leur permettent de perpétrer des fraudes financières, de dérober des informations, et d'usurper des identités grâce à des outils de plus en plus sophistiqués, dont certains sont automatisés et déployés à grande échelle, pour un impact maximum (OCDE, 2015j).

Mondialisation politique

L'État devrait, certes, rester un acteur dominant dans les affaires nationales et internationales dans un proche avenir, mais compte tenu de la connectivité internationale grandissante entre différents acteurs, y compris des entreprises multinationales, des mouvements mondiaux de la société civile et des villes, le cadre dans lequel s'attaquer aux

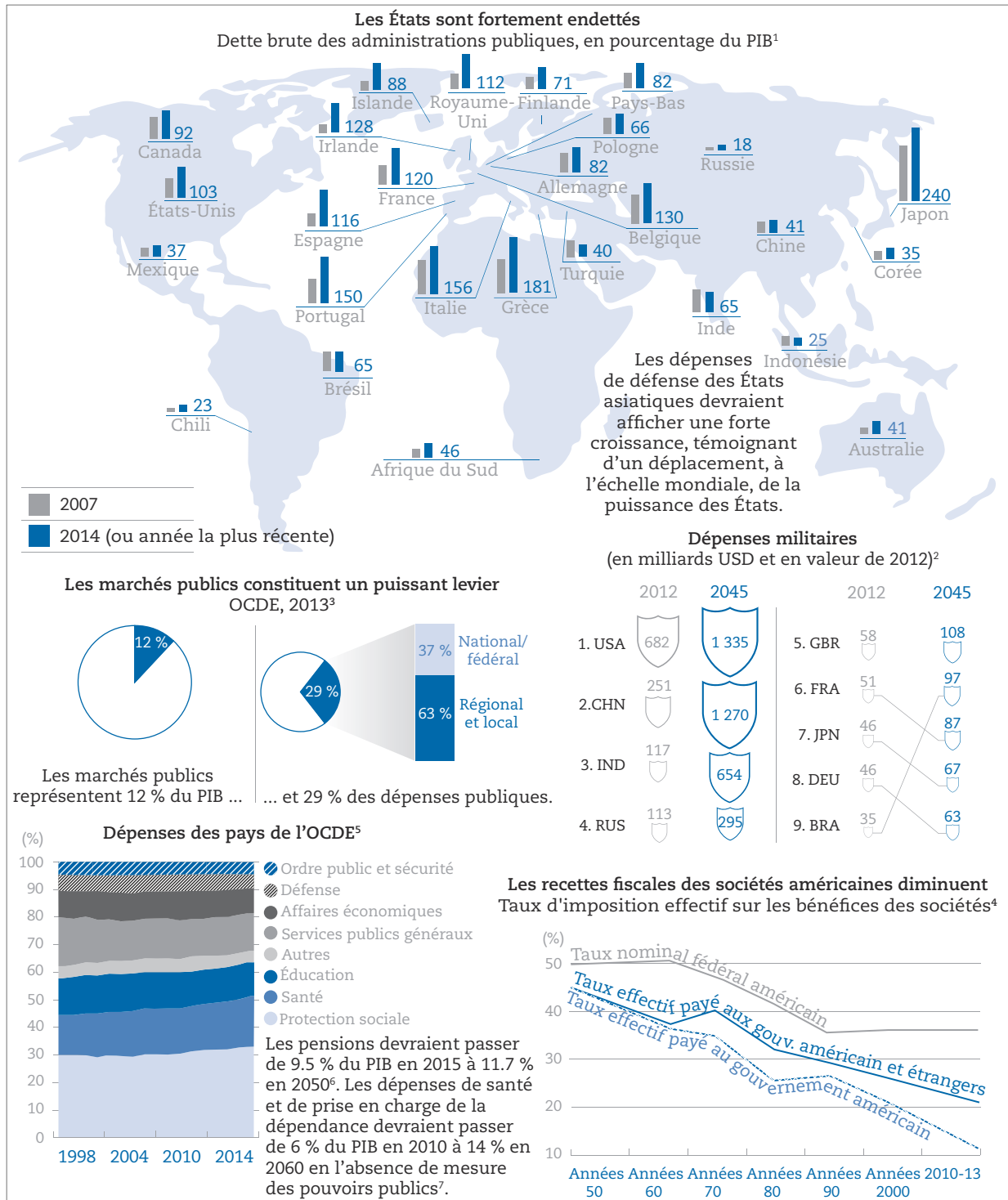
problèmes mondiaux évolue. Dans le même temps, l'extraordinaire développement économique de l'Asie au cours des dernières décennies induit un basculement historique de la puissance économique et géopolitique qui remet en question la légitimité de nombreuses institutions multilatérales créées après la seconde Guerre mondiale. Le manque de représentativité reste une préoccupation majeure, notamment au sein des institutions financières internationales, qui a poussé certaines économies émergentes à établir des mécanismes nationaux et multilatéraux parallèles (par exemple des banques de développement, des blocs commerciaux régionaux ou des groupements comme les BRICS). Au final, à cause de cette fragmentation, les États pourraient avoir plus de mal à former un consensus international sur les problématiques mondiales et régionales (OCDE, 2015k). Néanmoins, un certain nombre de réussites récentes en matière de gouvernance mondiale méritent d'être soulignées, en particulier l'Accord de Paris issu de la COP21 et les ODD des Nations Unies, qui comportent tous deux de fortes dimensions STI.

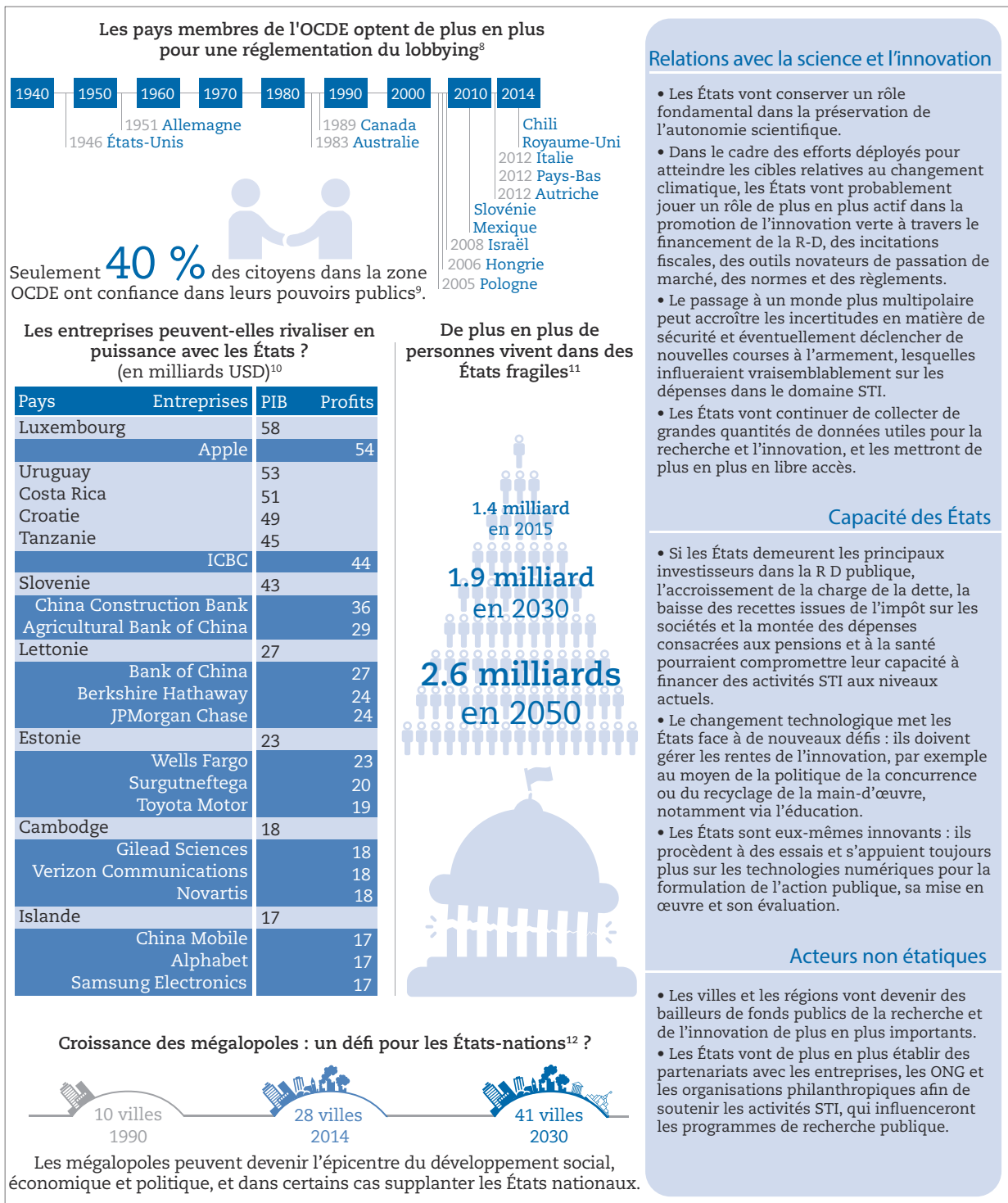
De plus en plus, la politique STI nationale est formulée en termes mondiaux, ce qui reflète la nature mondiale de nombreux problèmes et défis, ainsi que la mondialisation des marchés et de la production. La gouvernance transfrontière revêt donc une importance grandissante pour le domaine STI, notamment pour s'atteler aux « grands enjeux mondiaux » tels que le changement climatique et les menaces pour la santé et l'approvisionnement en ressources. Toutefois, les cadres de coopération internationale dans de nombreux domaines STI en sont encore au stade embryonnaire et se heurtent à plusieurs obstacles, en particulier à des difficultés pour essayer de coordonner des financements collectifs via des régimes de financement nationaux. Certains pays ont également des craintes concernant l'appropriation des bienfaits des investissements publics dans la recherche et l'innovation, étant donné l'émergence des enjeux STI en tant que priorité de la politique industrielle nationale (OCDE, 2015i).

La mobilité internationale à travers l'enseignement supérieur

La mobilité internationale des personnes ayant un niveau d'instruction élevé, à différents stades de leur développement personnel et de leur carrière professionnelle, constitue un moteur essentiel de la circulation du savoir dans le monde. L'enseignement supérieur en est un cadre privilégié : les étudiants qui suivent tout ou partie de leurs études dans un établissement d'enseignement supérieur étranger tissent des liens avec d'autres individus et acquièrent des compétences qu'ils mettront en pratique en différents endroits au fil de leur vie professionnelle (OCDE, 2015g). L'effectif des étudiants étrangers a plus que quintuplé depuis le milieu des années 70. Leur nombre total, qui s'établissait à 0.8 million en 1975, a dépassé 4 millions en 2010. Les étudiants étrangers sont fortement concentrés dans un petit nombre de pays, puisque près de la moitié d'entre eux étudie dans les cinq principaux pays d'accueil (États-Unis, Royaume-Uni, Allemagne, France et Australie). Néanmoins, les régions d'accueil où l'augmentation est la plus rapide sont l'Amérique latine et les Caraïbes, ainsi que l'Océanie et l'Asie, reflets de l'internationalisation de l'enseignement supérieur dans un ensemble croissant de pays (OCDE, 2012b). En ce qui concerne l'avenir, le nombre d'étudiants qui cherchent à étudier à l'étranger pourrait doubler, pour atteindre 8 millions, d'ici 2025. La croissance annuelle moyenne de la demande d'enseignement supérieur international entre 2005 et 2025 devrait dépasser 3 % en Afrique, au Moyen-Orient, en Asie, en Amérique centrale et en Amérique du Sud (Goddard, 2012). On anticipe qu'en 2025, les étudiants internationaux viendront majoritairement de Chine, d'Inde, d'Allemagne, de Corée du Sud, d'Arabie saoudite, du Nigéria, de Turquie, du Pakistan, de France et du Kazakhstan, sachant que les étudiants chinois et indiens devraient représenter environ un tiers du total (British Council, 2013).

Rôle des pouvoirs publics





Sources : 1. « La dette brute des administrations publiques », dans OCDE (2015) ; 2. ESPAS (2015) ; 3. OCDE (2015). « Autres » désigne les dépenses liées à la protection de l'environnement, au logement, etc. ; 4. Zucman, G. (2015) ; 5. OCDE (2016e) ; 6. « Projections of public pension expenditure as a share of GDP from 2015 to 2050 », dans OCDE (2014g) ; 7. de la Maisonneuve et Martins (2015) ; 8. OCDE (2014h) ; 9. OCDE (2015l) ; 10. Forbes (2016) ; Données des comptes nationaux de la Banque mondiale ; Comptes nationaux de l'OCDE ; 11. OCDE (2015m) ; 12. DAES (2015b).

Évolution du rôle des pouvoirs publics dans le développement économique

Auparavant, de nombreux pays de l'OCDE appliquaient des politiques industrielles hautement interventionnistes ; l'État détenait souvent les moyens de production dans certains secteurs clés ou favorisait quelques « champions nationaux » du secteur privé. Les politiques de ce type sont, pour la plupart, tombées en disgrâce à partir des années 70 et ont été remplacées par des politiques de nature plus horizontale, dans lesquelles l'accent est mis sur l'amélioration des conditions cadres pour toutes les entreprises. Ces conditions supposent l'application effective des règles de la concurrence, l'ouverture des échanges, la disponibilité des compétences (éducation et formation professionnelle), etc. Toutefois, au sortir de la récente crise économique, de nombreux pays de l'OCDE ont manifesté un regain d'intérêt pour une politique industrielle plus ciblée. Les inquiétudes qu'inspirent la perte de capacités manufacturières et la concurrence de plus en plus vive des économies émergentes expliquent ce regain d'intérêt, tout comme la perspective d'une « nouvelle révolution de la production » tirée par la science et la technologie.

Cette nouvelle approche diffère des générations précédentes de politiques industrielles. Elle confère à l'État des fonctions de facilitation et de coordination, et établit de nouvelles méthodes de collaboration entre pouvoirs publics et industrie, tout en évitant toute influence indue de la part d'intérêts particuliers (Warwick, 2013). Ces relations sont importantes pour l'innovation, mais ne fonctionnent pas toujours avec efficacité, ce qui incite les pouvoirs publics à appuyer, entre autres, la coopération dans le domaine de la recherche et le partage des connaissances entre entreprises, ou entre celles-ci et les universités. Le soutien au développement des technologies se fait également en amont : alors que l'ancienne méthode consistait à « choisir les gagnants », les aides gouvernementales ciblent désormais des technologies génériques, afin de ne pas entraver la concurrence en aval ni enfreindre les règles en matière d'aides publiques inscrites dans les traités internationaux. Le soutien est aussi de plus en plus défini en fonction des enjeux, car les pouvoirs publics cherchent à ce que le changement technologique ne soit plus déterminé en fonction du passé, mais réorienté sur des technologies plus bénéfiques sur le plan social et environnemental et à déclencher des investissements dans le domaine STI dans ce sens.

Le changement technologique, en particulier le passage au numérique, met les pouvoirs publics face à de nouveaux défis afin de gérer les rentes de l'innovation. Les décideurs doivent déployer un arsenal de mesures qui, d'une part, permettent aux entreprises les plus innovantes d'investir dans les innovations à la frontière et d'avoir accès à une main-d'œuvre qualifiée, à des financements et aux marchés, et d'autre part, favorisent la diffusion de l'innovation dans le reste de l'économie, processus grâce auquel toutes les entreprises pourront bénéficier de ces innovations (OCDE, 2016f).

Enfin, les projecteurs de l'innovation sont braqués sur le fonctionnement des pouvoirs publics. Par exemple, à l'heure où les administrations recueillent d'importants volumes de données et les mettent de plus en plus en libre accès, l'analytique des données massives permet de les exploiter, ce qui ouvre la voie à des possibilités de recherche et d'innovation majeures. Il n'est pas rare que les pouvoirs publics fassent eux-mêmes preuve d'innovation, menant des expériences et s'appuyant de plus en plus sur les technologies numériques au service de l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques.

Le rôle des pouvoirs publics à l'appui de la recherche

La recherche publique, financée par l'État, joue un rôle déterminant dans les systèmes d'innovation et les processus de décision. Elle est source de connaissances nouvelles, en particulier dans les domaines d'intérêt public comme la recherche fondamentale ou les domaines en rapport avec les enjeux sociaux et environnementaux, dans lesquels les entreprises ne sont pas toujours motivées ou équipées pour investir. En outre, les gouvernements jouent un rôle fondamental dans la garantie de l'autonomie scientifique. Dans la plupart des pays de l'OCDE, ils soutiennent également les dépenses de R-D des entreprises à hauteur de 10 % à 20 %. L'aide publique se justifie généralement par la défaillance du marché : les entreprises ont tendance à sous-investir dans la R-D en raison des coûts et de l'incertitude qui y sont associés, du délai de rentabilisation de l'investissement et du risque que des concurrents ne mettent à profit certaines retombées intellectuelles – en raison du caractère non rival et partiellement non exclusif de la R-D. Toutes ces explications sur le soutien à la recherche publique et à la R-D des entreprises devraient rester valables sur les 10 à 15 prochaines années. La question est de savoir si les gouvernements pourront se permettre les investissements nécessaires.

Crise budgétaire de l'État ?

Les pressions budgétaires pourraient bien continuer de s'accumuler dans de nombreux pays à mesure que la démographie évolue défavorablement et que s'intensifient les pressions exercées par les pensions, la santé, l'éducation et les investissements d'infrastructure sur les dépenses. En moyenne, dans les pays de l'OCDE, les dépenses sociales publiques sont passées d'à peine plus de 15 % du PIB à près de 22 % du PIB entre 1980 et 2014. Les pays sont également de plus en plus endettés, surtout depuis la crise financière, et beaucoup ont adopté récemment des mesures d'austérité afin de réduire, voire d'inverser, les ratios élevés de la dette sur le PIB. Dans le même temps, la mondialisation a ouvert des possibilités, pour les entreprises multinationales, de réduire de beaucoup leurs impôts. Le recours à des dispositifs légaux permettant de faire « disparaître » des bénéficiaires à des fins fiscales ou de les transférer artificiellement dans des pays ou territoires où ils sont faiblement taxés, voire ne le sont pas du tout, aboutit à un manque à gagner fiscal compris, selon des évaluations prudentes, entre 100 et 240 milliards USD, soit l'équivalent de 4 % à 10 % des recettes mondiales issues de l'impôt sur le bénéfice des sociétés (OCDE, 2015n). Malgré ces pressions, l'État demeure le plus gros investisseur dans la R-D publique, mais sa capacité à financer les activités dans le domaine STI aux niveaux actuels pourrait être compromise. De fait, les données les plus récentes dont on dispose sur les dépenses des administrations publiques consacrées à la R-D dans la zone OCDE montrent que le financement public a légèrement reculé (voir le chapitre 3), ce qui pourrait constituer un « signal faible » des tendances à venir pour les dépenses publiques.

Une crise de confiance dans le gouvernement ?

Au lendemain de la crise économique mondiale, la confiance à l'égard des pouvoirs publics et des institutions s'est érodée. La population a le sentiment que les autorités n'ont su ni réagir pendant la crise ni en gérer correctement les retombées. Le changement technologique s'accompagne d'une révolution de la production, mais influe également sur l'emploi et fait apparaître de nouveaux risques liés au respect de la vie privée et à la cybercriminalité. La corruption, qu'elle soit perçue ou effective, le niveau élevé du chômage, le creusement des inégalités de revenu et la crainte que les systèmes éducatifs soient

dépassés ou incapables d'assurer l'égalité des chances sont autant d'éléments qui alimentent la conviction générale selon laquelle les pouvoirs publics ne sont pas à même de protéger l'intérêt supérieur des citoyens (OCDE, 2015k). Cette crise de confiance a aussi des conséquences pour la politique STI étant donné qu'une grande partie de la R-D continue d'être effectuée dans le secteur public. En outre, on attend des gouvernements qu'ils jouent un rôle normatif et réglementaire important dans sa gestion de la recherche et de l'innovation, par exemple avec la certification de l'innocuité de nouveaux produits, rôle d'autant plus difficile à tenir dans un monde d'incertitude générée par l'évolution technologique rapide et mondialisée.

Une instabilité grandissante dans le système étatique international ?

Diverses tendances et évolutions à l'échelle mondiale et couvertes ailleurs dans ce chapitre, par exemple l'importance croissante des pays émergents et en développement, le déplacement du centre de gravité économique vers l'Asie et le recul concomitant du poids économique relatif de l'Amérique du Nord et de l'Europe, ou encore la progression de chaînes de valeur mondiales, traduisent le passage à un monde plus multipolaire. Ce passage induit d'ores et déjà des incertitudes grandissantes dans le système international.

Il apparaît que, ces deux dernières décennies, le nombre (et la gravité) des conflits armés internes à travers le monde a progressivement décliné, passant d'un pic en 1994, quand près d'un quart des pays de la planète étaient impliqués dans un conflit civil, à moins de 15 % actuellement. Ce recul résulte en grande partie d'améliorations généralisées dans des facteurs tels que niveau d'instruction, la diversification économique ou des évolutions démographiques plus favorables (Hegre et Nygard, 2014). Le nombre de conflits entre États, bien que quelque peu fluctuant, est lui aussi sur une trajectoire descendante (Pettersen et Wallensteen, 2015), essentiellement grâce à un corpus grandissant de normes mondiales contre la guerre et à l'approfondissement des interactions économiques et financières entre pays. Il est peu surprenant de constater que, s'agissant des perspectives à plus long terme concernant les conflits armés, les opinions divergent. Selon Hegre et Nygard (2014), par exemple, cette tendance à la baisse va se poursuivre, avec un recul du nombre de pays impliqués dans des luttes armées internes à 12 % en 2030 et à 10 % en 2050, les conflits se concentrant essentiellement en Afrique subsaharienne et en Asie du Sud. D'autres sont un peu moins optimistes. Le Conseil national du renseignement des États-Unis (NIC, 2012) affirme que les risques de conflits entre États augmentent en raison de changements dans l'architecture internationale, mais il ne prévoit pas de conflit de l'ampleur d'une guerre mondiale impliquant toutes les puissances majeures. Ces risques accrus pourraient pousser les gouvernements à augmenter leurs dépenses de défense. Dans de nombreux pays, une large part du soutien public en faveur de la R-D va d'ores et déjà à des entreprises du secteur de la défense en vue du développement d'équipements militaires et de potentielles applications civiles. Et cette part pourrait encore s'accroître en cas d'escalade des tensions internationales.

Aujourd'hui, 50 pays sont des États fragiles, caractérisés par des institutions publiques soit faibles, soit source d'abus (OCDE, 2015m). Y vivent 1.4 milliard de personnes, mais on anticipe que leur population va progresser, pour atteindre 1.9 milliard en 2030 et 2.6 milliards en 2050. L'Afrique subsaharienne est de loin la région la plus représentée. En raison de la faible capacité des États fragiles à faire face aux chocs et aux tensions, le risque qu'ils connaissent, à l'avenir, une faillite politique, sociale ou humanitaire est plus élevé (OCDE, 2015m). De telles crises peuvent facilement déborder sur les pays limitrophes, voire plus loin,

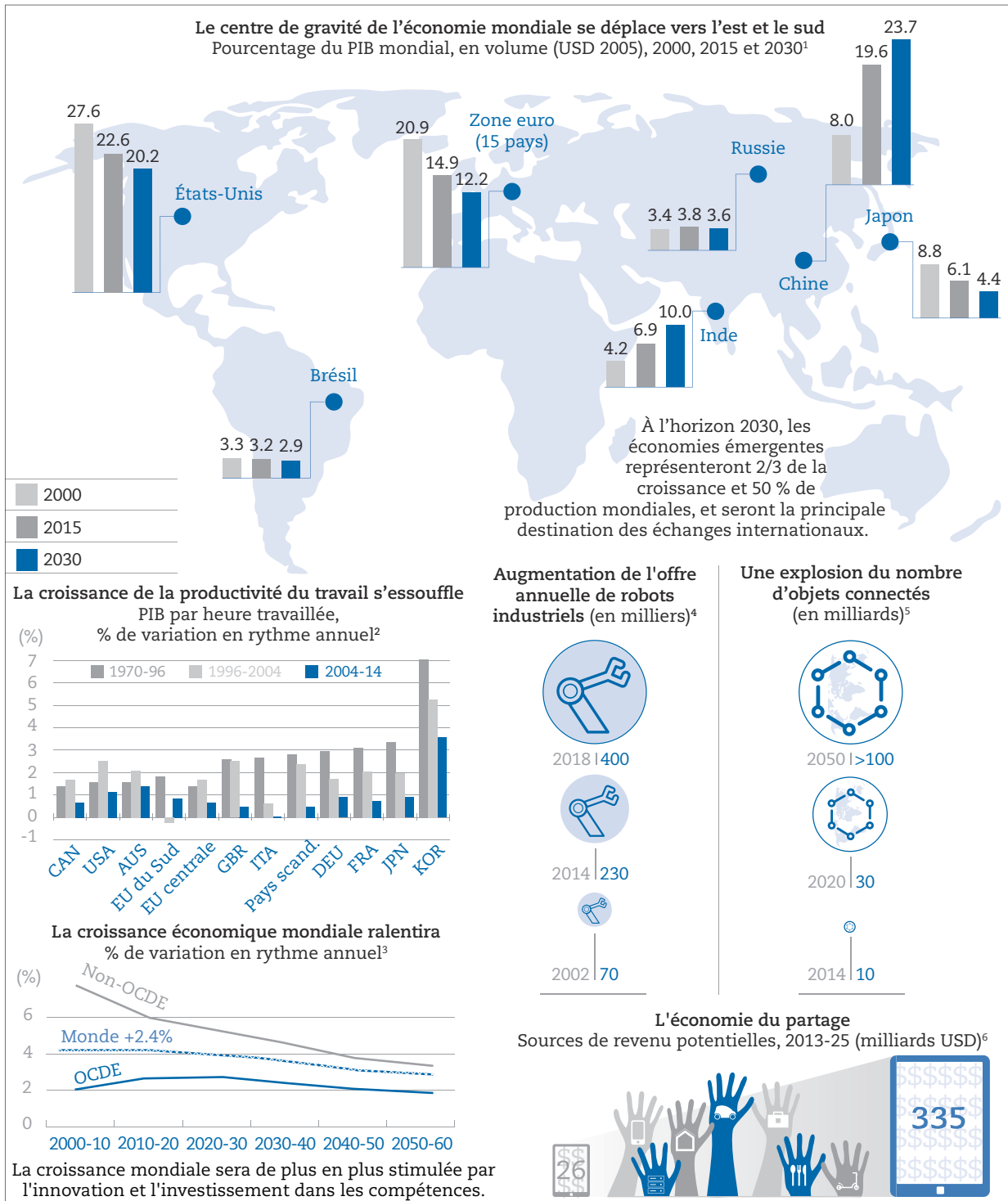
avec des conséquences dans les domaines de la santé, des migrations, etc. Les réactions mondiales à certaines de ces crises, en particulier à celles concernant des menaces sanitaires mondiales, pourraient bien avoir une incidence majeure sur les futurs programmes STI.

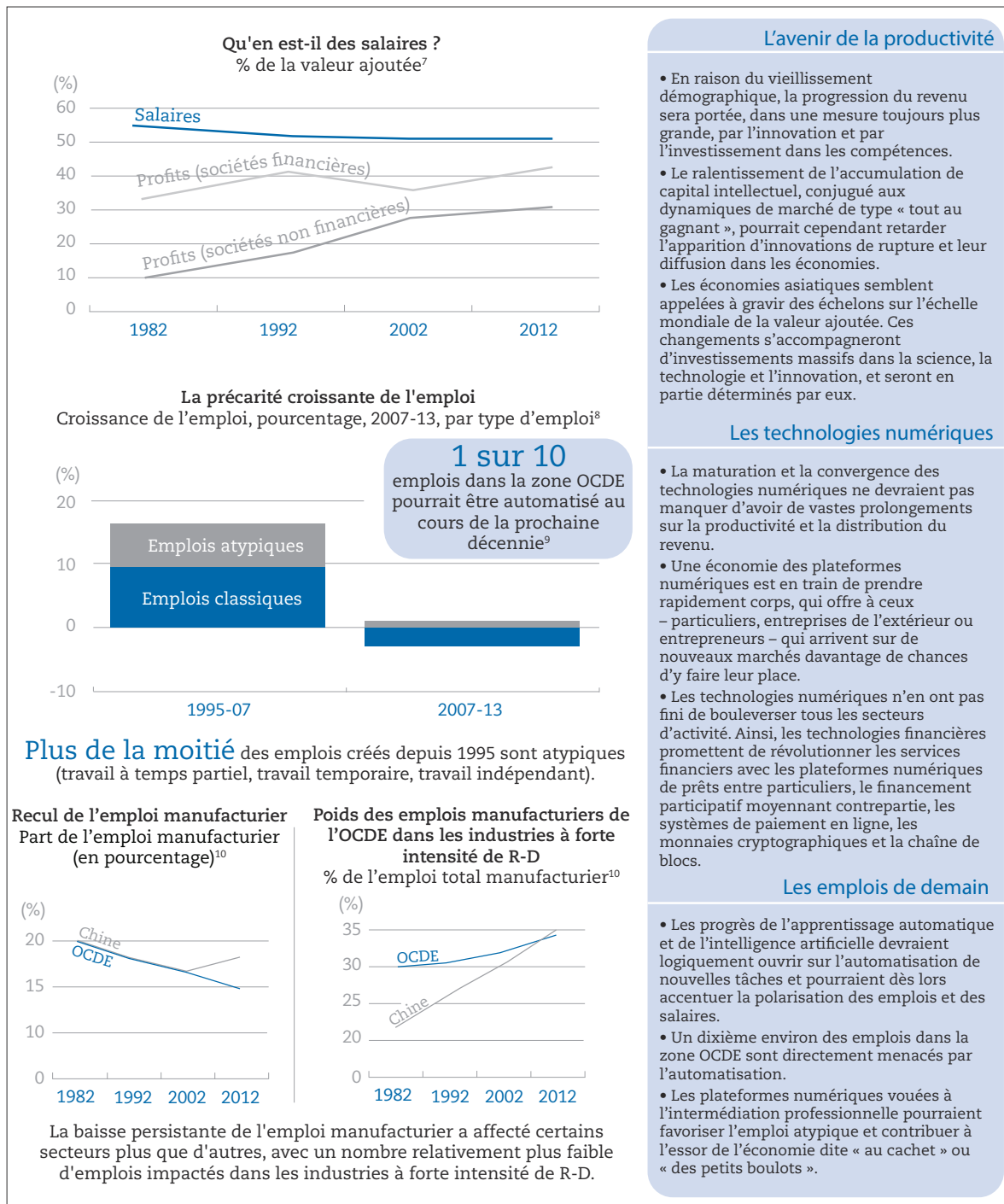
Importance croissante des acteurs non étatiques

On anticipe que les acteurs non étatiques, tels que les entreprises multinationales, les organisations non gouvernementales, les fonds souverains, les mégalo-poles, les instituts universitaires ou les fondations à la portée mondiale, vont tous gagner en influence dans les prochaines décennies. Dans certains cas, ils pourraient même jouer un rôle crucial dans la formation de nouvelles alliances et coalitions bénéficiant de l'appui du grand public, pour s'atteler à plusieurs défis mondiaux : pauvreté, environnement, sécurité, etc. (NIC, 2012). Dans le domaine STI, les entreprises sont les principaux bailleurs de fonds de la R-D et le centre de la plupart des activités d'innovation. Les pouvoirs publics vont de plus en plus établir des partenariats avec les entreprises, les ONG et les organisations philanthropiques afin de soutenir les activités STI, ce qui influencera les programmes de recherche publique (voir chapitre 3).

Les villes, en particulier les mégalo-poles, se distinguent comme l'un des acteurs infranationaux dont la puissance progresse. Les zones métropolitaines sont les principaux moteurs de la croissance. Plus de 50 % de la croissance économique et des créations d'emplois de la zone OCDE se concentrent dans ses 275 zones métropolitaines, c'est-à-dire les zones abritant plus de 500 000 habitants (OCDE, 2013c). Le nombre de mégalo-poles, comptant au moins 10 millions d'habitants, a presque triplé ces 25 dernières années, et elles représentent aujourd'hui 12 % de la population urbaine de la planète : en 2030, on en dénombrera une quarantaine. Les villes et régions appuient déjà les activités de recherche et d'innovation dans leur juridiction, et de plus en plus d'entre elles formulent des stratégies pour l'innovation, tendance qui va probablement se confirmer.

Économie, emplois et productivité





Sources : 1. OCDE (2014i) ; 2. OCDE (2016f) ; 3. OCDE (2014j) ; 4. International Federation of Robotics (2015) ; 5. Gartner (2013) ; 6. OCDE (2016g) ; 7. OCDE (2016h) ; 8. Arntz, Gregory et Zierahn (2016) ; 9. OCDE (2015r) ; 10. OCDE (2015g). Les pertes d'emplois manufacturiers dans la zone OCDE ont frappé certaines industries plus durement que d'autres. Ces 30 dernières années, le poids des industries à forte intensité de R-D dans l'emploi manufacturier n'a cessé d'augmenter, passant de 30 % à environ 35 %. En d'autres termes, dans ce groupe d'industries (produits chimiques, machines et matériel de transport), la baisse de l'emploi a été moindre que dans d'autres secteurs (textile, matières plastiques, métallurgie de base, etc.). Avec l'évolution des schémas productifs mondiaux, la Chine a davantage orienté ses activités de fabrication vers des industries à forte intensité de R-D : la part de l'emploi y est ainsi passée de 20 % au début des années 80 à environ 35 % ces dernières années. Une forte présence d'industries à forte intensité de R-D n'est toutefois pas nécessairement synonyme de dépenses de R-D élevées, car la R-D peut être, en grande partie, intégrée à des biens intermédiaires importés.

L'avenir de la croissance de la productivité

D'après les estimations, le rythme de la croissance mondiale va aux devants d'un ralentissement qui le fera passer de 3.6 % en 2010-20 à 2.4 % en 2050-60. En raison du vieillissement démographique, la progression du revenu sera portée, dans une mesure toujours plus grande, par l'innovation et par l'investissement dans les compétences (Braconier et al., 2014 ; Adalet McGowan et al., 2015). Or la croissance de la productivité du travail affiche une croissance en berne, dans de nombreux pays de l'OCDE, sur les deux dernières décennies, qui s'explique avant tout par un affaiblissement des gains de productivité globale des facteurs. D'aucuns tenants du pessimisme considèrent que le phénomène s'inscrira dans la durée du fait de l'essoufflement du progrès technologique, lequel sous-tend la croissance de la productivité. De leur point de vue, les innovations introduites dans la première moitié du XX^e siècle (comme l'électrification) ont été bien plus déterminantes qu'aucune de celles qui leur ont fait suite (pas même les TIC), voire qui restent à venir (Gordon, 2012 ; Cowen, 2011). Ceux qui posent sur la technologie un regard optimiste (par exemple Brynjolfsson et McAfee, 2011), soutiennent de leur côté que le rythme du progrès technologique sous-jacent n'a pas ralenti et que la révolution numérique induira une nouvelle métamorphose des économies situées à la frontière (OCDE, 2016i).

Des analyses récentes consacrées par l'OCDE aux tendances de la productivité donnent à penser que la cause principale du ralentissement de la productivité n'est pas tant le fléchissement du rythme de l'innovation dans les entreprises les plus avancées au niveau mondial que celui du rythme auquel les innovations se propagent à l'ensemble de l'économie, soit un enrayement du mécanisme de diffusion (Andrews, Criscuolo et Gal, 2015). Il y a plusieurs explications possibles à ce phénomène de rétention de l'innovation : par exemple, il se peut que nous ayons amorcé une nouvelle trajectoire technologique, avec des évolutions dominées par quelques pionniers. Dans la mesure où la diffusion des technologies suit une courbe sigmoïde, un certain délai doit s'écouler avant qu'elle n'atteigne son plein potentiel. À cela s'ajoute une autre explication, qui suscite un intérêt croissant : l'influence de la dynamique du « tout au gagnant », qui semble particulièrement marquée dans certaines industries, notamment en présence de cyberplateformes (voir plus loin). Depuis la crise financière, la faiblesse persistante de l'investissement dans le capital physique (machines et biens d'équipement, infrastructure physique) a elle aussi concouru à freiner la croissance de la productivité du travail. Toutefois, l'accumulation de capital intellectuel accuse depuis le début des années 2000 un ralentissement peut-être plus préoccupant encore puisque c'est généralement elle qui est derrière les innovations et qui sous-tend ensuite leur adoption. Ce déclin laisse donc craindre un fléchissement structurel de la croissance de la productivité, et pourrait augurer un éventuel ralentissement des arrivées d'innovations de rupture (OCDE, 2016i).

L'investissement à long terme est lui aussi essentiel à la croissance fondée sur l'innovation et à la création d'emplois. Les entreprises utilisent la plupart du temps les bénéfices non distribués pour financer leurs investissements, si bien qu'il est assez rare qu'elles mobilisent des ressources extérieures. Ces dernières années, profitant de la faiblesse des taux d'intérêt sur les emprunts, elles ont distribué à leurs actionnaires, entre dividendes et rachats d'actions, une part appréciable de ces bénéfices mis en réserve. Ces flux de trésorerie ont fait diminuer leurs investissements « de croissance » à long terme. L'OCDE estime que les entreprises des économies avancées pourraient accroître leurs dépenses d'investissement de 60 % en moyenne, sans avoir recours à l'emprunt, simplement en modérant les versements de dividendes et les rachats d'actions (OCDE, 2016i). Les pouvoirs publics se verront par conséquent au défi de mettre en place des mesures d'incitation en

faveur de l'investissement durable propres à corriger la propension du système financier à mesurer les marges bénéficiaires sur le court terme (FEM, 2011).

Le centre de gravité de l'économie mondiale se déplace vers l'est et le sud

Au cours du prochain demi-siècle l'économie mondiale verra son centre de gravité se déplacer en direction de l'est et du sud. On estime que d'ici 2030, les pays en développement assureront les deux tiers de sa croissance et la moitié de sa production et seront la principale destination des échanges mondiaux. Les économies émergentes, comme la Chine et l'Inde, représentent des marchés de plus en plus importants pour les entreprises de nombreux secteurs. Une nouvelle classe moyenne s'y forme rapidement, qui fera bondir la consommation de produits de base, mais pas uniquement. Au vu de ces facteurs de demande, les économies émergentes demeureront vraisemblablement privilégiées pour les activités de production, et il est d'autant moins probable, par conséquent, que l'on assiste à un vaste mouvement de relocalisation dans les pays de l'OCDE (OCDE, 2015h). À cela s'ajoute que la progression du revenu et l'évolution des modes de consommation laissent augurer une montée en gamme, sur l'échelle de la valeur ajoutée, des exportations de produits manufacturés de la Chine, de l'Inde et d'autres pays d'Asie, tandis qu'une nette réorientation de l'activité vers les services permettra à la Chine et à d'autres économies émergentes de ravir, à long terme, d'importantes parts de marché aux pays de l'OCDE (Johansson et Olaberria, 2014b). Ces changements s'accompagneront d'investissements STI et seront en partie déterminés par eux. Ainsi, la Chine arrive déjà en deuxième place pour les dépenses de recherche, ne le cédant à cet égard qu'aux États-Unis (voir chapitre 3).

Les technologies numériques n'en ont pas fini de bousculer les économies

La maturation et la convergence des technologies numériques ne devraient pas manquer d'avoir de vastes prolongements sur la productivité, la distribution du revenu, le bien-être et l'environnement. D'ici 2030, les entreprises auront pour l'essentiel achevé leur transition numérique qui les rendra à même de concevoir, fabriquer et distribuer leurs produits selon des procédés hautement intégrés et avec un maximum d'efficacité. Les technologies de fabrication additive feront que certains produits pourront être adaptés aux besoins spécifiques des utilisateurs, tandis que l'IDO, l'analytique de données massives, l'intelligence artificielle et les outils d'apprentissage automatique entraîneront l'apparition de machines intelligentes dont les facultés d'adaptation iront croissant grâce aux technologies de capteurs, à la puissance de calcul bon marché et au calcul d'algorithmes en temps réel (OCDE, 2015h).

Le coût des biens d'équipement et de la puissance de calcul va poursuivre sa diminution, tandis que l'essor des pratiques de développement en code source libre (*open source*) suscitera de nouvelles communautés de développeurs qui s'intéresseront non seulement aux logiciels mais aussi au matériel et au cerveau humain (*wetware*), par exemple dans le cadre d'activités de biologie de synthèse « à faire soi-même » (voir chapitre 2). Ceux qui font leur entrée sur de nouveaux marchés – qu'il s'agisse de particuliers, d'entreprises de l'extérieur ou d'entrepreneurs – auront davantage de chances de réussir à s'y implanter. Les technologies de reconnaissance de formes, comme les données massives et l'apprentissage automatique, faciliteront l'évaluation des besoins des utilisateurs en même temps qu'elles soutiendront la demande globale d'innovation. Les risques devraient s'amenuiser et le délai entre le développement d'un produit et sa mise sur le marché raccourcir, ce qui ne fera qu'encourager la nouveauté. Les coûts de production liés à l'innovation vont reculer dans les industries clés, cependant que les services d'informatique en nuage et d'impression tridimensionnelle offriront

un créneau pour l'arrivée de nouvelles entreprises. Les coûts de distribution vont eux aussi aller en diminuant, entraînant à leur suite les coûts imputables au lancement de produits et services (OCDE, 2015o). Ces évolutions pourraient également être propices à un rattrapage technologique des économies émergentes, et pourquoi pas leur permettre d'accéder rapidement à des niveaux de productivité assez similaires à ceux relevés dans les pays de l'OCDE.

Dans le secteur des services, les technologies numériques ont favorisé la création de nouvelles entreprises, plus efficaces, stimulé la croissance de la productivité et facilité les échanges internationaux. Les activités manufacturières, dans les pays de l'OCDE, misent de plus en plus sur une composante « services » pour assurer la création de valeur ajoutée, si bien que les différences entre les deux secteurs s'estompent progressivement. Une grande part de la croissance future de l'industrie devrait provenir de ces « indus-services » qui combinent des activités manufacturières de pointe avec un éventail de services. Les interactions toujours plus nombreuses et complexes que l'industrie entretient avec le secteur des services vont exiger une prise en considération simultanée de l'un et de l'autre dans les stratégies d'entreprise, ainsi que dans les débats d'orientation (OCDE, 2015h).

L'essor des plateformes numériques

Une économie des plateformes numériques est en train de prendre rapidement corps. En 2015, les opérateurs de ces plateformes dominaient presque entièrement les 15 premières places du classement des entreprises de l'internet au regard de la capitalisation boursière (OCDE, 2016j). Les plateformes sont diverses dans leur envergure et leurs fonctions. À titre d'exemple, elles peuvent servir de base au développement d'applications (tel Android de Google et iOS chez Apple) ; prendre en charge des fonctions de recherche et des médias sociaux (ainsi de Google et Facebook) ; servir à la prestation de services (comme Airbnb et Uber) ; faire office de place de marché (Amazon et eBay) ; ou offrir des services d'intermédiation (c'est le cas de Mechanical Turk d'Amazon et de UpWork). Elles ont pour effet d'abaisser les obstacles qui s'opposent d'habitude à l'entrée de petits prestataires sur les marchés. Elles provoquent la réorganisation d'un vaste éventail de marchés et de systèmes d'organisation du travail mais aussi, en dernière analyse, celle de la création de valeur et de la récupération des plus-values (Kenney et Zysman, 2016). Il pourrait en résulter d'importants bouleversements aux plans économique et social, qui feront des gagnants et des perdants.

Une fois que les réseaux d'une plateforme ont atteint une taille critique, les externalités qu'ils génèrent sont susceptibles de protéger la position de ladite plateforme et de faire obstacle à l'arrivée de nouvelles entreprises ou plateformes concurrentes (OCDE, 2016i). Avec ces effets de réseau, les innovations associées aux plateformes numériques s'apparentent à un nouvel avatar des monopoles naturels en ce qu'ils permettent à une ou deux entreprises de s'accaparer une large part de la valeur globale créée par l'ensemble des utilisateurs d'une plateforme donnée (OCDE, 2016i ; Kenney et Zysman, 2016).

Les emplois de demain

La diminution du coût de la puissance de calcul, et d'autres progrès des technologies numériques avec elle, est d'ores et déjà en train de transformer les marchés du travail et de faire perdre leur emploi à certains (Brynjolfsson et McAfee, 2011). L'informatique a commencé à se substituer au travail humain pour l'exécution de tâches répétitives explicites (codifiables) faisant l'objet de procédures précises et bien comprises, ainsi des tâches administratives (par exemple la comptabilité) et de diverses interventions humaines le long de chaînes de production. Pour l'instant, les tâches qui ne se prêtent pas à une décomposition en actions successives et qui s'inscrivent dans un cadre particulier demeurent inaccessibles à l'automatisation (Autor, 2015). D'un caractère plus abstrait, elles font souvent intervenir la résolution de problèmes, l'intuition,

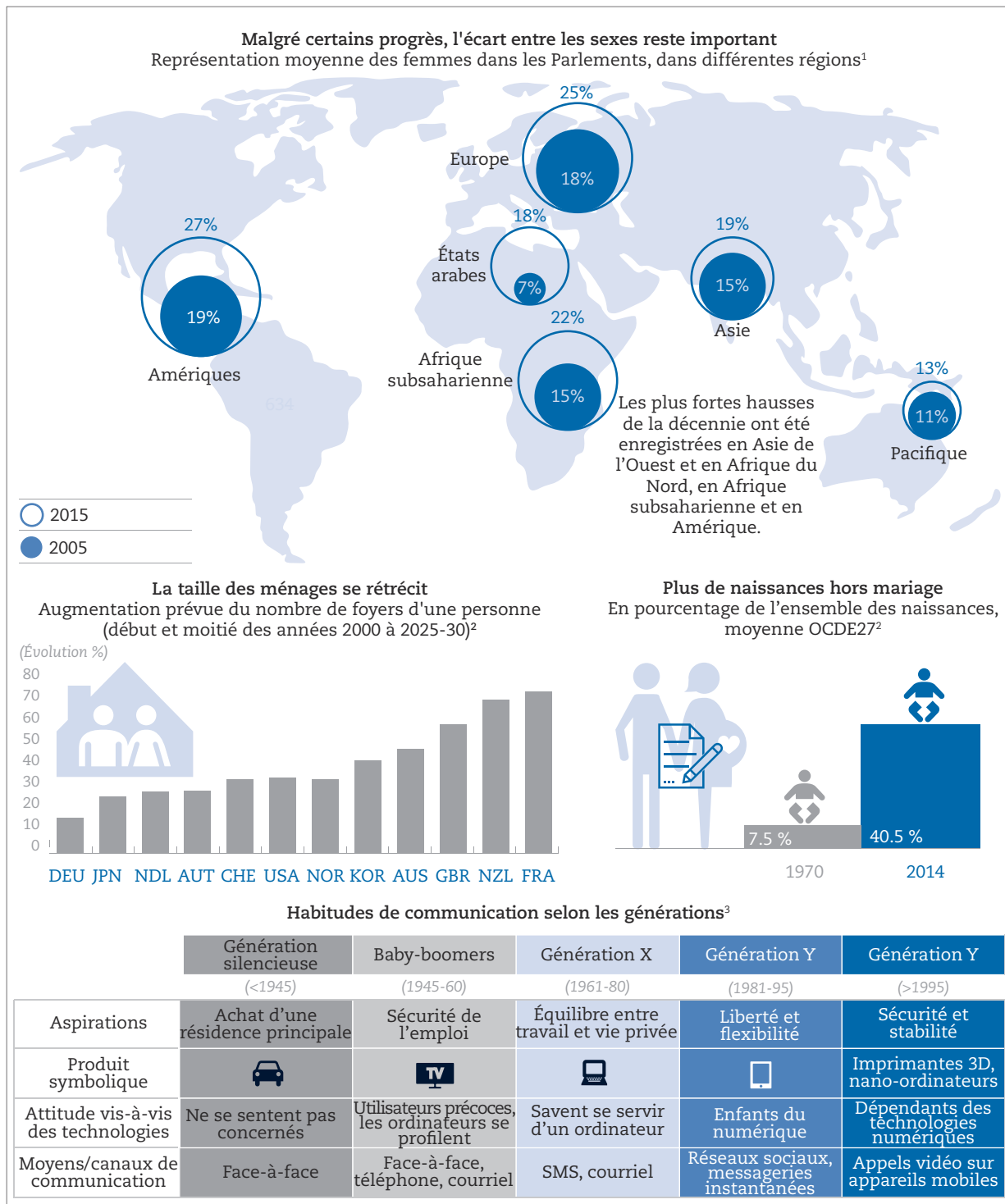
la créativité et la persuasion. Il n'empêche que les progrès de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle devraient logiquement élargir la palette des activités automatisables et pourraient dès lors être à l'origine de bouleversements sans précédent et conduire en particulier à une polarisation plus marquée de l'emploi et des salaires. De récents travaux de recherche menés pour le compte de l'OCDE (Arntz et al., 2016) révèlent que, dans les pays de l'OCDE, un emploi sur dix environ est directement menacé par l'automatisation. Parallèlement, ces innovations sont tout à fait capables de raffermir la croissance de la productivité et de susciter de nouveaux emplois jusque-là inconnus (OCDE, 2016i).

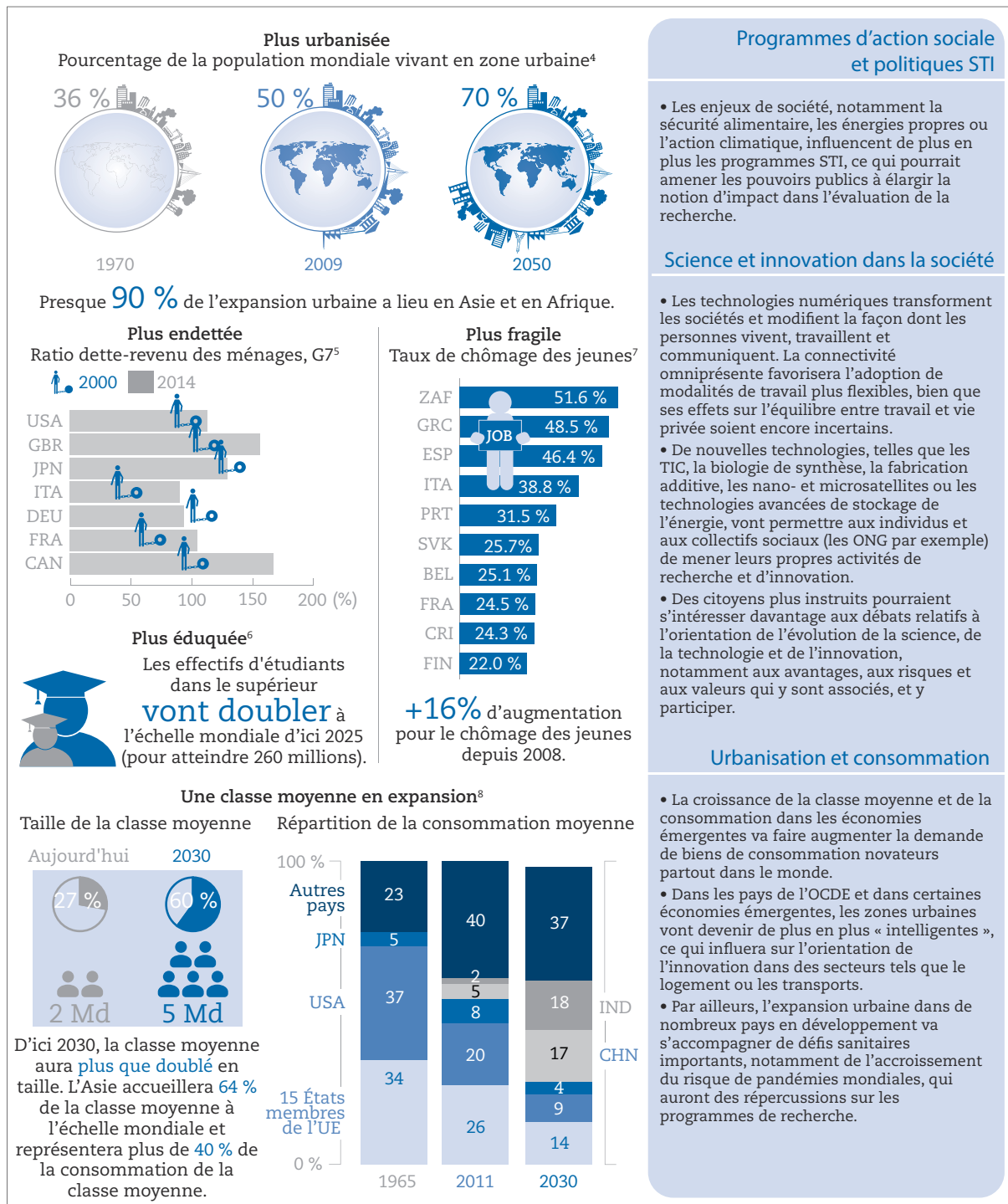
Selon la vitesse à laquelle les économies parviennent à créer de nouveaux emplois en remplacement de ceux perdus et suivant l'évolution que suivront les salaires, il se pourrait que les emplois soient quand même trop peu nombreux et que leur déficit soit permanent. Un recours accru au partage du travail et la réduction de la durée hebdomadaire de celui-ci aideraient peut-être à sa distribution plus équitable, mais rendraient nécessaire la garantie d'un salaire minimum – éventuellement à travers une forme ou une autre de « revenu universel de base » (Skidelsky, 2013). Le travail se fait d'ores et déjà plus fragmenté et « atypique », avec un nombre croissant de personnes qui cumulent plusieurs emplois à temps partiel – c'est l'essor de l'économie dite « au cachet » ou « des petits boulots ». Le développement des plateformes électroniques, qui permettent à un vaste vivier de travailleurs indépendants, établis en différents endroits du monde, d'entrer en relation avec des entreprises qui les invitent à proposer leurs services pour l'exécution des tâches les plus diverses, est de nature à accélérer le cours des choses. Si de telles plateformes offrent de la souplesse aux deux parties, elles soulèvent des questions épineuses quant aux protections sur le lieu de travail et aux caractéristiques auxquelles on reconnaîtra un emploi de qualité dans l'avenir (OCDE, 2016k). Qui plus est, les deux principaux marchés investis par ces plateformes sont l'Inde et les Philippines, où le faible coût de la vie permet aux travailleurs de pratiquer des prix inférieurs à leurs concurrents des pays de l'OCDE. Il pourrait s'ensuivre une « course au moins-disant », synonyme de nivellement par le bas des salaires réels et de creusement des inégalités dans ces pays (Fox et O'Connor, 2015).

L'avenir de la finance

Les pays de l'OCDE ont vu la part de la valeur ajoutée du secteur financier dans le PIB progresser régulièrement au cours du dernier demi-siècle tandis que grandissait l'influence exercée par la finance sur l'économie et la société au sens large (Mukunda, 2014). Avec sa part des profits en expansion et sans équivalent dans le reste de l'économie et ses salaires élevés, le secteur n'a pas manqué d'attirer à lui des individus brillants, aux dépens peut-être d'autres domaines d'activité bien plus prometteurs pour ce qui est de l'innovation productive (Cournède et al., 2015 ; Cecchetti et Kharroubi, 2015). Si ces tendances pourraient bien se maintenir au cours des 10 à 15 années qui viennent, sinon s'intensifier sous l'effet du développement des services financiers dans les économies émergentes, les technologies financières n'en promettent pas moins de révolutionner le secteur. Ainsi, les banques vont se heurter, dans leurs activités de prêt, à la concurrence croissante des plateformes numériques de prêts entre particuliers, à quoi s'ajoute le financement participatif avec contrepartie, appelé lui aussi à prendre de l'importance (OCDE, 2015p). On prévoit de même une prolifération des systèmes de paiement en ligne (comme PayPal) et des monnaies cryptographiques (comme le bitcoin). D'autres innovations reposant sur la chaîne de blocs viendront tirer vers le bas les coûts de transaction et offrir des solutions peu gourmandes en puissance de calcul pour sécuriser les transferts de valeur. Cela pourrait ébranler des institutions, notamment bancaires, dont la raison d'être est de servir d'intermédiaire de confiance dans les transactions.

Société





Sources : 1. UIP (2016) ; 2. OCDE (2016). Les périodes sur lesquelles portent les projections d'évolution (début ou moitié des années 2000 à 2025-30) sont les suivantes : Allemagne (2007 à 2025), Australie (2006 à 2026), Autriche (2007 à 2030), Corée (2007 à 2030), États-Unis (2000 à 2025), France (2005 à 2030), Japon (2005 à 2030), Norvège (2002 à 2030), Nouvelle-Zélande (2006 à 2031), Pays-Bas (2009 à 2030), Royaume-Uni (2006 à 2031) et Suisse (2005 à 2030) ; 3. Le club des élus numériques (2014) ; 4. OCDE (2012a) ; 5. OCDE et DPB (2016). Les données de l'OCDE concernant le Japon sont disponibles seulement jusqu'en 2013. Les valeurs indiquées pour le Japon correspondent aux années 2000 et 2013 ; 6. Goddard (2012) ; 7. OCDE (2016h) ; 8. AEE (2016a). Les 15 pays de l'UE retenus sont : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni et Suède. Pas de données disponibles pour la Chine pour 1965.

Familles et ménages

Ces dernières décennies, dans la zone OCDE, la famille a enregistré des bouleversements profonds. La famille élargie a presque disparu dans de nombreux pays, et la famille traditionnelle, composée d'un couple marié avec des enfants, est bien moins répandue, alors que les divorces, la cohabitation, les couples « qui vivent chacun chez soi », les familles monoparentales et les unions entre personnes de même sexe se sont tous multipliés. Les cultures et les valeurs se sont diversifiées avec la hausse de l'immigration, les femmes sont plus nombreuses à avoir un emploi, davantage de jeunes entreprennent des études ou une formation plus longues et les personnes âgées vivent plus longtemps et, de plus en plus, vivent seules (OCDE, 2011). On s'attend à ce que ces tendances se poursuivent dans les décennies à venir et à ce que de nombreux pays de l'OCDE enregistrent une augmentation significative du nombre de ménages composés d'une seule personne (pouvant représenter 30 % à 40 % de l'ensemble des ménages d'ici 2025-30 dans de multiples pays), de familles monoparentales (30 % à 40 % de l'ensemble des ménages avec enfants d'ici 2025-30 dans certains pays) et de couples sans enfant. La multiplication des couples sans enfant, des divorces, des remariages et des familles recomposées peut affaiblir les liens familiaux et compromettre la capacité de prise en charge informelle par la famille, tandis que le nombre croissant de ménages d'une personne exercera une pression accrue sur le logement (OCDE, 2011). Du point de vue de la science, de la technologie et de l'innovation, ces tendances auront des conséquences sur la consommation et la demande d'innovation, alors que, selon toute vraisemblance, le déficit de prise en charge des personnes âgées induira un accroissement de la demande de technologies d'aide à l'autonomie, notamment des soins à distance et de la robotique.

Éliminer les inégalités entre hommes et femmes

Plusieurs signaux indiquent que l'écart entre les hommes et les femmes se réduit : l'engagement des femmes en politique augmente, tout comme leur taux d'inscription dans des établissements d'enseignement supérieur et leur participation au marché du travail. S'agissant de l'enseignement supérieur, l'égalité des sexes tend à s'imposer : dans la plupart des pays de l'OCDE, les femmes représentent déjà au moins 50 % des étudiants. L'émergence de telles cohortes de femmes très qualifiées a des répercussions considérables sur la croissance économique, le marché du travail, la vie de famille, les modalités de garde des enfants et d'aide aux personnes âgées. Dans les pays en développement, la scolarisation des filles à tous les niveaux a significativement augmenté ces vingt dernières années. L'optimisme est de mise : d'ici 2050, les inégalités entre les sexes dans l'enseignement primaire auront largement disparu à l'échelle mondiale, même si les filles resteront probablement peu instruites dans nombre des pays où la pauvreté est la plus tenace (Ministère de la Défense du Royaume-Uni, 2014). Dans le domaine STI, et bien que des progrès aient été accomplis dans la lutte contre les inégalités, la proportion de femmes scientifiques tend à diminuer à mesure que le niveau de responsabilité augmente (voir le chapitre 3). Les créateurs d'entreprise sont plus nombreux que les créatrices et la proportion de femmes qui choisissent de diriger une entreprise n'a pas véritablement augmenté (OCDE, 2015q). La majorité des travaux de recherche scientifique n'envisagent pas le sexe comme une variable et considèrent le masculin comme la norme, ce qui se traduit par des résultats en matière de santé et de sécurité différents pour les femmes et les hommes (Commission européenne, 2013). Ces disparités criantes entraînent la sous-utilisation des compétences des femmes et limitent les retombées positives de la science d'aujourd'hui.

Des sociétés plus connectées

Les technologies numériques transforment nos sociétés et modifient la façon dont les personnes vivent, travaillent et communiquent. Au cours de la décennie à venir, l'IDO va par exemple permettre une interconnexion croissante des lieux de vie et de travail et de

l'environnement au sens large (notamment les infrastructures urbaines modernes). Cette connectivité omniprésente favorisera l'adoption de modalités de travail plus flexibles, bien que ses effets sur l'équilibre entre travail et vie privée soient encore incertains. Dans les pays en développement, la pénétration de l'internet s'est rapidement accrue, en grande partie grâce au haut débit mobile. On estime que sur la période de 7 ans entre 2014 et 2020, 1.1 milliard de personnes supplémentaires feront l'acquisition de leur premier téléphone mobile, soit 155 millions par an. De plus, le nombre d'abonnements au haut débit mobile atteindra 7.7 milliards dans le monde d'ici 2020 (Ericsson, 2015).

Classe moyenne à l'échelle mondiale et consommation

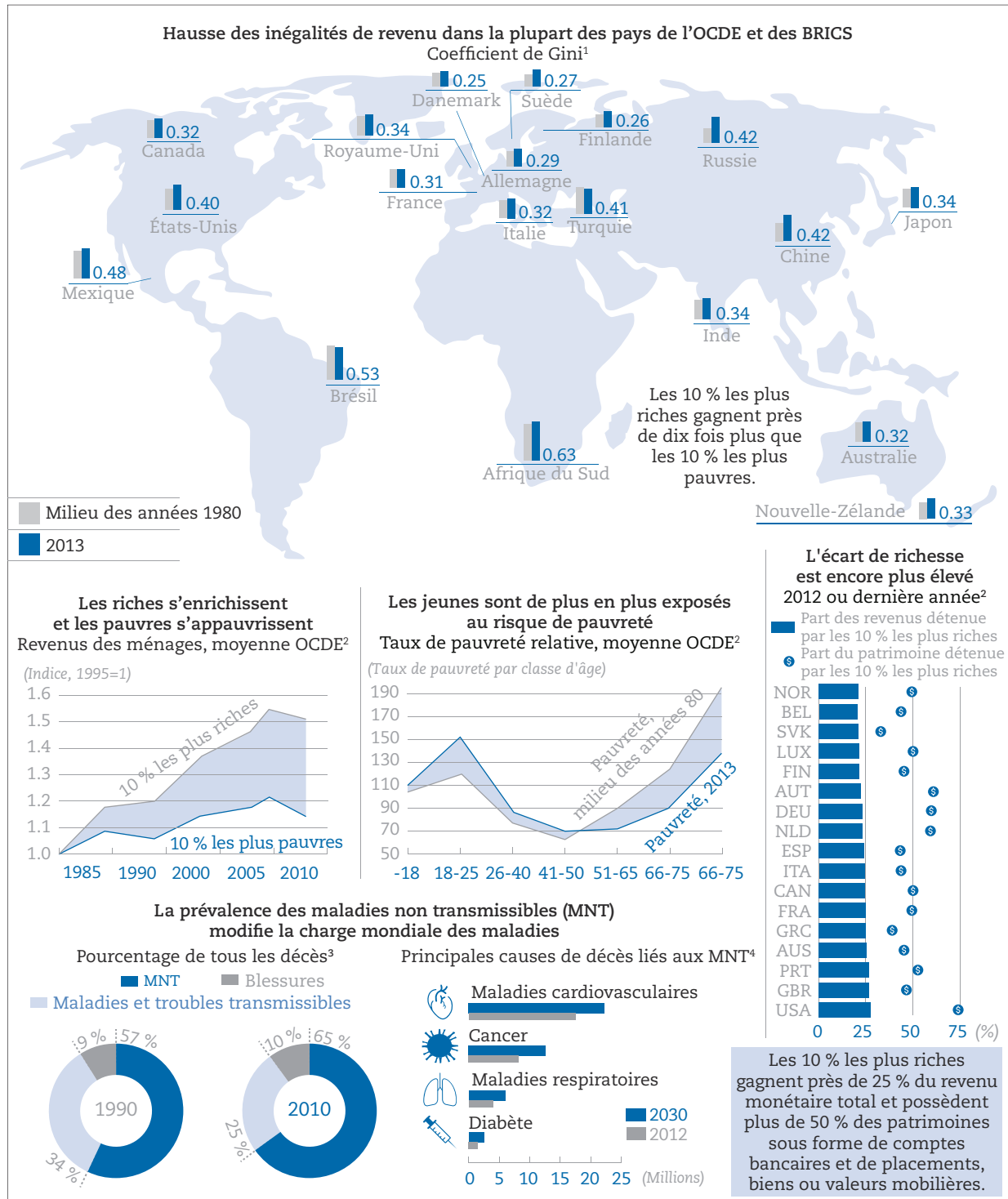
L'accroissement de la richesse et des revenus dans les pays en développement va de pair avec l'émergence d'une classe moyenne à l'échelle mondiale. Selon les prévisions actuelles, la classe moyenne devrait plus que doubler entre 2009 et 2030, passant de 1.8 milliard à presque 5 milliards de personnes (environ 60 % de la population mondiale). On estime que les deux tiers environ de cette classe moyenne vivent en Asie (Gros et Alcidi, 2013). Une grande variété de catégories de dépenses peuvent définir la classe moyenne, si bien que cette catégorie de population est plus riche d'un pays à l'autre. À l'heure actuelle, la classe moyenne en Europe et en Amérique du Nord représente un peu plus de la moitié du total en nombre d'individus mais presque les deux tiers des dépenses totales effectuées dans le monde. Toutefois, on s'attend à ce que la part des dépenses de la classe moyenne asiatique passe d'environ un quart aujourd'hui à presque 60 % en 2030, entraînant un énorme recul des dépenses de première nécessité au profit des dépenses facultatives (Kharas et Gertz, 2010).

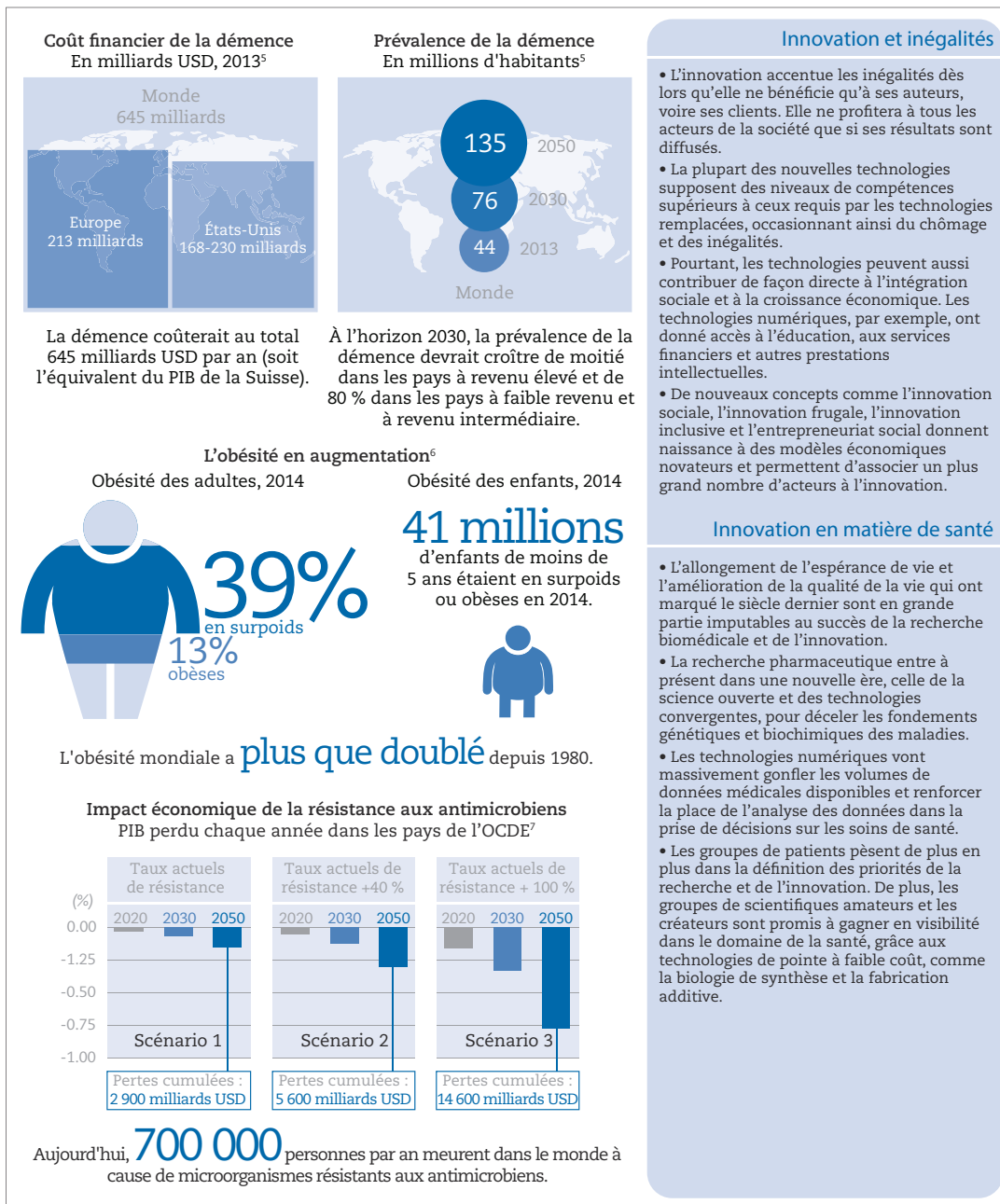
Urbanisation

On estime que, d'ici 2050, la population urbaine dépassera les 6 milliards d'habitants, contre moins de 1 milliard en 1950 (OCDE, 2015s). Près de 90 % de la croissance démographique urbaine va se concentrer en Asie et en Afrique. Dans les villes, il est plus facile d'offrir des infrastructures énergétiques et hydrauliques modernes à un nombre croissant d'individus. Mettant à profit les progrès réalisés dans le domaine des capteurs et de leur connectivité grâce au calcul hautes performances, les zones urbaines des pays les plus avancés vont progressivement devenir des « villes intelligentes ». Les divers réseaux et systèmes de transport et de services d'utilité publique seront de plus en plus interconnectés, favorisant ainsi une utilisation et une gestion plus durables des ressources (Commission européenne, 2014).

Parallèlement, de plus en plus de ménages à faible revenu s'installeront dans les villes au cours des prochaines décennies si bien que, dans certaines régions, la croissance urbaine sera pratiquement synonyme de formation de bidonvilles. La mauvaise qualité des logements et l'absence de services de distribution d'eau, d'assainissement et de gestion des déchets qui caractérisent les bidonvilles ont des effets nuisibles sur la santé humaine et l'environnement (OCDE, 2012a). De telles zones sont également plus sujettes aux conflits et aux tensions sociales (Ministère de la Défense du Royaume-Uni, 2014). La pollution atmosphérique et les déchets non traités constitueront de sérieux problèmes de santé publique dans de nombreuses zones urbaines (OCDE, 2012a). Au cours des décennies à venir, le changement climatique provoquera des marées de tempête et l'élévation du niveau de la mer, ce qui aura des conséquences graves pour les villes côtières de faible élévation, notamment en Asie, où vit une grande partie de la population urbaine mondiale. En outre, des phénomènes météorologiques extrêmes viendront perturber les systèmes urbains complexes (OCDE, 2014k), tandis que l'émergence de mégapoles à proximité de zones caractérisées par un stress hydrique grave et une pollution élevée posera probablement de nouveaux problèmes de santé et d'environnement. Étant donné leur gravité, il est probable que ces difficultés auront une influence déterminante sur les futurs programmes d'action dans le domaine STI.

Santé, inégalités et bien-être





Sources : 1. PovcalNet (2016). Données d'après les données brutes d'enquêtes sur les ménages obtenues des organismes statistiques gouvernementaux et des départements-pays de la Banque mondiale. Le coefficient de Gini correspond au rapport entre la proportion cumulée de la population et la proportion cumulée du revenu total qu'elle perçoit ; il est compris entre 0, en cas d'égalité parfaite, et 1, en cas d'inégalité totale. Le taux de pauvreté correspond à la proportion de personnes (au sein d'un groupe d'âge donné) dont le revenu est inférieur au seuil de pauvreté (sur la base de la moitié du revenu médian des ménages). Toutefois, deux pays affichant le même taux de pauvreté peuvent connaître des situations différentes s'agissant du niveau de revenu relatif des plus démunis ; 2. OCDE (2015r) ; OCDE (2016m) ; 3. AEE (2016b). DALY se traduit par AVCI, pour Années de vie corrigées de l'incapacité, et est défini par l'OMS comme étant « la somme des années de vie potentiellement perdues du fait d'un décès prématuré et des années de vie productive perdues en raison d'une incapacité » ; 4. OMC (2015a) ; 5. OCDE (2015t) ; 6. OMC (2015b). Les données concernent l'Europe (2008), l'Irlande (2010), le Royaume-Uni (2014), les États-Unis (2010) et le reste du monde (2010). Compte tenu des grandes disparités méthodologiques existant entre les études considérées, ce chiffre n'est fourni qu'à titre indicatif. Si les estimations incluent généralement les coûts indirects, comme le coût d'opportunité des soins informels, les méthodes employées pour calculer ces coûts varient. Tous les coûts sont indiqués en USD, corrigés de l'inflation mesurée par l'indice des prix à la consommation, aux prix de 2013, et ne correspondent donc pas nécessairement aux chiffres indiqués dans les documents sources ; 7. Cecchini, Langer et Slawomirski (2015).

Répartition du patrimoine et des revenus : vers une convergence mondiale

À moins d'une catastrophe planétaire et malgré des taux de croissance en berne, tout indique que le monde sera beaucoup plus riche au milieu du siècle. D'après les prévisions, le PIB mondial va plus que tripler à l'horizon 2060, le revenu par habitant affichera lui aussi une forte croissance et l'accumulation de richesse continuera sur sa lancée. Quant à savoir si le monde sera également meilleur, la réponse à cette question dépendra largement de la manière dont les revenus et le patrimoine seront répartis à l'échelle du globe et à l'intérieur des pays. Même s'il se réduit depuis plusieurs dizaines d'années, un large fossé sépare encore les économies développées de celles en développement en termes de prospérité. En 2060, les écarts internationaux de PIB par habitant se seront certainement réduits : le revenu par habitant devrait plus que quadrupler dans les économies actuellement les plus pauvres (sur la base des parités de pouvoir d'achat de 2005), mais seulement doubler dans les économies les plus riches ; et être multiplié par sept en Chine et en Inde (Johansson et al., 2012). Dans la plupart des cas, cette convergence économique coïncidera avec un renforcement des capacités STI dans les économies émergentes et en développement. Ces capacités pourront s'obtenir de diverses manières, principalement par les investissements dans l'éducation et la R-D, lesquels vont croître dans les universités et autres centres de recherche hors OCDE. Les relations nouées avec les sources étrangères de connaissances, par le biais des échanges, de l'IDE, de la mobilité humaine et de la collaboration en matière de R-D, joueront elles aussi très probablement un rôle de premier plan dans la modernisation technologique des économies émergentes.

Divergence locale des revenus et du patrimoine

Les inégalités à l'échelle nationale feront naître d'immenses risques politiques, sociaux et économiques dans les années à venir. Dans la plupart des pays avancés, l'écart entre riches et pauvres n'a jamais été aussi grand depuis trente ans. Dans la zone OCDE, les 10 % les plus riches gagnent aujourd'hui près de dix fois plus que les 10 % les plus pauvres, contre sept fois plus dans les années 80. Ce ratio varie grandement d'un pays à l'autre. Nettement inférieur à la moyenne dans les pays nordiques et une grande partie de l'Europe continentale, il est proche de 10 à 1 en Corée, en Italie, au Japon, au Portugal et au Royaume-Uni. Le rapport se situe entre 13 et 16 aux États-Unis, en Grèce, en Israël, en Turquie et entre 27 et 30 au Mexique et au Chili (OCDE, 2015r). C'est la population d'âge actif, familles avec enfants inclus, qui fait les frais du creusement des inégalités, compte tenu de la montée du chômage observée au cours des dernières années de la période considérée. Parallèlement à l'élargissement de la distribution des revenus, le profil d'âge de la pauvreté monétaire s'est modifié : dans le prolongement de la tendance apparue au milieu des années 80, ce sont désormais les jeunes et non plus les personnes âgées qui sont les plus menacés par la pauvreté (OCDE, 2015r).

La distribution du patrimoine est nettement plus inégale que celle des revenus, le patrimoine des ménages et sa concentration ayant sensiblement augmenté au cours des quatre dernières décennies. Dans les pays de l'OCDE pour lesquels des données sont disponibles, les 5 % et 1 % des ménages les plus riches possèdent respectivement 37 % et 18 % du total du patrimoine privé, contre seulement 13 % pour les 60 % des ménages situés dans le bas de la distribution (OCDE, 2016i).

Les inégalités réduisent les possibilités d'éducation des personnes défavorisées et, par ricochet, la mobilité sociale, entraînant ainsi un ralentissement de l'accumulation du capital humain. D'après des analyses récentes (par exemple, Piketty et Zucman, 2013 ; Braconier et al.,

2014), les inégalités de revenu et de patrimoine vont très certainement continuer de se creuser de nombreuses années encore. Compte tenu des tendances actuelles, l'inégalité moyenne des revenus dans l'OCDE pourrait croître de plus de 30 % d'ici au milieu du siècle, ce qui ramènerait l'ensemble des pays de l'OCDE au niveau affiché par les États-Unis (Braconier et al., 2014). S'agissant des économies émergentes et en développement, plus des deux tiers, soit 86 % de la population du monde en développement, seront confrontés au creusement des inégalités. Pour beaucoup, les perspectives d'aide à long terme sont particulièrement sombres : en 2030, quelque deux tiers des pauvres de la planète pourraient vivre dans un État « fragile » (ESPAS, 2015).

En modifiant la manière dont le capital et la main-d'œuvre sont déployés au sein d'une économie, l'évolution technologique et l'innovation influent sur la répartition des revenus. Dans la mesure où l'innovation profite principalement à ses auteurs, parfois aussi à leurs clients, elle accentue les inégalités. Elle ne profitera à tous les acteurs de la société que si ses résultats sont diffusés. S'agissant de l'emploi, la plupart des nouvelles technologies supposent des niveaux de compétences supérieurs à ceux requis par les technologies remplacées. Cette évolution en faveur de la main-d'œuvre qualifiée constitue l'un des facteurs d'inégalité depuis quelques dizaines d'années (Paunov, 2013). Pourtant, les technologies peuvent aussi contribuer de façon directe à l'intégration sociale et à la croissance économique. Les technologies numériques, par exemple, ont donné accès à l'enseignement par le biais des MOOC (cours en ligne ouvert et massif) et des ressources éducatives en libre accès (REL) ; l'accès mobile à bas prix a mis les services intellectuels et d'information à la portée des populations isolées ou à faible revenu moyennant une somme modique, voire nulle ; tandis que les systèmes de paiement numériques et la banque mobile ont rendu les services financiers accessibles aux personnes dépourvues de compte bancaire (OCDE, 2016). Par ailleurs, de nouveaux concepts comme l'innovation sociale, l'innovation frugale, l'innovation inclusive et l'entrepreneuriat social donnent naissance à des modèles économiques novateurs et permettent d'associer un plus grand nombre d'acteurs à l'innovation (Paunov, 2013). Ces concepts regroupent pêle-mêle des méthodes de marché traditionnelles, des solutions aux besoins des sociétés et de l'environnement sur le long terme et les principaux enjeux des pouvoirs publics, tels que la lutte contre le chômage, la pauvreté et les changements climatiques.

Des niveaux de formation de plus en plus élevés

Avoir accès à l'enseignement et pouvoir acquérir des connaissances et compétences feront partie des conditions premières pour améliorer ses chances dans la vie, et ce non seulement dans les économies avancées, mais aussi et surtout dans les pays en développement. Le niveau d'études moyen est appelé à croître plus rapidement dans les seconds que dans les premiers, ce qui réduira d'autant l'écart qui les sépare. D'après les prévisions, le nombre des étudiants aura plus que doublé en 2025 pour atteindre 262 millions dans le monde. Cette croissance interviendra presque exclusivement dans le monde en développement, notamment en Chine et en Inde pour plus de la moitié. Il y a donc lieu de penser qu'au milieu du siècle, la majorité des jeunes dans le monde aura fait des études universitaires ou supérieures. En 2025, la part des diplômés sera certainement montée en flèche dans la quasi-totalité des pays de l'OCDE (OCDE, 2008).

Maladies infectieuses

D'importants clivages pourraient persister un certain temps encore eu égard à la technologie, à l'éducation, aux revenus et au patrimoine, mais aussi et surtout dans le

domaine de la santé. Dans l'avenir, les systèmes de santé seront confrontés à un éventail grandissant de problèmes, principalement du fait de l'évolution rapide du panorama mondial des pathologies. Des progrès ont été accomplis dans la lutte contre certaines maladies infectieuses, comme la tuberculose, le VIH/sida et le paludisme. Ces dernières années ont été marquées par la chute de la mortalité due au VIH/sida et par le déclin, quoique lent, du nombre des décès liés à la tuberculose (dont 95 % surviennent dans les pays à revenu faible et intermédiaire) (OMS, 2014a). En ce qui concerne le paludisme, environ la moitié de la population mondiale est exposée au risque de contracter la maladie (dont 90 % des cas mortels surviennent en Afrique), mais, entre 2000 et 2013, grâce à l'expansion des interventions, son incidence a baissé de 30 % à l'échelle mondiale et de 34 % en Afrique. Au cours de la même période, le taux de mortalité palustre a reculé de 47 % dans le monde, d'après les estimations, et de 54 % en Afrique (OMS, 2015). En conséquence, les taux d'espérance de vie augmentent et convergent aux quatre coins de la planète. Cela dit, le combat contre les maladies infectieuses s'annonce de plus en plus difficile en raison de plusieurs phénomènes : l'urbanisation continue de s'accélérer dans le monde en développement ; les changements climatiques influent sur l'évolution géographique des infections humaines et animales (comme le paludisme) ; le tourisme international ne cesse de s'étendre ; et il est peu probable que les flux migratoires mondiaux diminuent.

La tendance probablement la plus inquiétante qui caractérise la lutte contre les maladies infectieuses est la résistance aux antimicrobiens. L'utilisation abusive et excessive de ces médicaments chez l'homme et les animaux d'élevage a favorisé la sélection et la propagation des bactéries résistantes. L'essentiel des antimicrobiens sont donnés aux animaux. Aux États-Unis, par exemple, leur utilisation dans le secteur de l'élevage représente quelque 80 % de la consommation totale annuelle. D'après les prévisions, la consommation mondiale d'antimicrobiens dans le secteur de l'élevage augmentera d'environ 67 % entre 2010 et 2030 (Cecchini et al., 2015). Sous l'effet de cette utilisation intensive, les médicaments antibactériens deviennent moins efficaces, sinon inefficaces. De même, l'absence de progrès dans la mise au point de nouveaux antimicrobiens contribue au renforcement de la résistance à l'échelle planétaire. Par conséquent, l'urgence sanitaire croît à un rythme qui dépassera bientôt celui de la mise à disposition des traitements (OMS, 2014c).

Maladies non transmissibles et neurologiques

S'il est prévu que le nombre annuel des décès dus à une maladie infectieuse diminue, celui des décès dus à une maladie non transmissible devrait passer de 38 millions en 2012 à 52 millions en 2030. Cette épidémie est le résultat de plusieurs tendances lourdes : vieillissement démographique, urbanisation galopante non programmée et mondialisation des modes de vie dangereux pour la santé. Alors que de nombreuses maladies chroniques ne progressent que lentement, les changements de mode de vie et de comportement apparaissent et se généralisent rapidement. Les maladies non transmissibles qui ont causé le plus grand nombre de décès en 2012 sont les maladies cardio-vasculaires, les cancers, les maladies respiratoires et le diabète. Toutes quatre sont responsables de 82 % des décès dus à une maladie non transmissible. D'après les prévisions, le nombre annuel des décès dus à une maladie cardio-vasculaire passera de 17.5 millions en 2012 à 22.2 millions en 2030, et celui des décès dus à un cancer de 8.2 millions à 12.6 millions (OMS, 2014b). S'agissant du diabète, sa prévalence mondiale augmente depuis plusieurs décennies et l'OMS prévoit qu'il sera la septième cause de mortalité en 2030. Les maladies non transmissibles pénalisent déjà de

façon disproportionnée les pays à faible revenu et à revenu intermédiaire et, d'après les projections actuelles, c'est en Afrique et dans d'autres pays à faible revenu et à revenu intermédiaire que la mortalité due à ces maladies aura le plus fortement augmenté à l'horizon 2020 (OMS, 2011).

Sous l'effet de l'allongement de la durée de vie et de l'accélération du vieillissement des sociétés, les cas de maladie neurologique sont appelés à se multiplier. D'après les estimations de l'organisation Alzheimer's Disease International (ADI), 46.8 millions de personnes étaient atteintes de démence en 2015 et leur nombre devrait pratiquement doubler tous les 20 ans au point d'atteindre 76 millions en 2030 et 135 millions en 2050. Cinquante-huit pour cent des personnes atteintes de démence vivent dans des pays considérés comme à faible revenu ou à revenu intermédiaire par la Banque mondiale. Ce pourcentage devrait atteindre 63 % en 2030 et 68 % en 2050 (ADI, 2015).

Progrès de la recherche médicale et des technologies

L'allongement de l'espérance de vie et l'amélioration de la qualité de la vie qui ont marqué le siècle dernier sont en grande partie imputables au fait que la recherche biomédicale et l'innovation ont permis de venir à bout de maladies potentiellement mortelles et de pathologies débilitantes. Les défis sanitaires qu'il faudra relever dans le monde au cours des prochaines décennies n'en demeurent pas moins considérables. Toutefois, leur ampleur ouvre un vaste champ d'application, que ce soit dans le monde en développement ou les économies avancées, aux procédures médicales novatrices et traditionnelles, aux traitements spécialisés, aux nouvelles médecines et solutions technologiques ainsi qu'aux systèmes innovants de santé ou encore de coordination et de gestion des activités de soins. La recherche pharmaceutique entre à présent dans une nouvelle ère, celle de la science ouverte et des technologies convergentes, pour déceler les fondements génétiques et biochimiques des maladies. Les progrès technologiques accomplis dans le séquençage de l'ADN, les technologies en « omique », la biologie de synthèse et l'édition génomique ont doté les chercheurs de nouveaux outils pour décrypter et traiter les maladies non transmissibles chroniques (OCDE, 2015i). Les technologies numériques – par le biais de l'IDO (avec, par exemple, les capteurs médicaux ou le phénomène du « soi quantifié »), l'analytique des données massives et l'intelligence artificielle – vont massivement gonfler les volumes de données médicales disponibles et renforcer la place de l'analyse des données dans la prise de décision. De même, la robotique et les neurotechnologies vont certainement se généraliser dans le domaine médical. Chacune de ces technologies numériques est examinée dans le chapitre 2, qui met en lumière un grand nombre de leurs applications dans le secteur des soins de santé. Enfin, quoiqu'encore restreints et marginaux, les groupes de scientifiques amateurs et les makers sont promis à gagner en visibilité dans le domaine de la santé, grâce aux technologies de pointe à faible coût, comme la biologie de synthèse et la fabrication additive, qui leur permettent de mener leurs propres travaux de recherche et de mettre au point leurs propres appareils médicaux et thérapeutiques.

Observations finales

Ce chapitre a exposé les principales mégatendances mondiales qui devraient avoir des incidences majeures sur les sociétés et les économies au cours des 10 à 15 prochaines années. L'étude de leurs impacts sur la STI fait apparaître plusieurs thèmes communs. Premièrement, les mégatendances vont à l'avenir façonner les programmes de R-D, ainsi que le champ et l'échelle de la demande d'innovation. Ainsi, le vieillissement des sociétés, les efforts déployés pour limiter les effets du changement climatique et s'y adapter, les différents défis qui se posent en termes de santé et la montée en puissance du numérique sont autant de facteurs qui devraient influencer sur les activités de recherche et d'innovation des entreprises et du système scientifique public.

Deuxièmement, les dynamiques et les incidences de la plupart de ces facteurs ont une portée transnationale, voire planétaire, justifiant par là-même l'instauration d'un cadre international pour les activités et politiques STI. Les activités STI sont d'ores et déjà fortement mondialisées – en témoignent les activités des entreprises multinationales et la coopération scientifique internationale entre les universités et les établissements publics de recherche. Le développement des économies émergentes a également contribué à faire évoluer la répartition des activités STI dans le monde, un phénomène qui est appelé à se poursuivre dans les décennies à venir. En revanche, les politiques STI dépassent rarement le cadre national. Si les raisons sont souvent légitimes, l'échelle et la portée des « grands défis » à venir appellent un renforcement de la coopération internationale dans ce domaine, par le biais notamment de programmes conjoints, de partage d'installations, etc., ciblant le transfert de technologie et la collaboration scientifique.

Troisièmement, les mégatendances laissent à penser que les activités STI pourraient se heurter à des contraintes de ressources au cours des prochaines décennies. Nombre de ces mégatendances posent des questions urgentes appelant une action des pouvoirs publics, qui peut alors entrer en concurrence avec l'attention et les ressources susceptibles d'être accordées à la STI. Qui plus est, la croissance et le vieillissement de la population mondiale, couplés à l'évolution des schémas de mobilité et de migration, pourraient à l'avenir changer la donne sur les marchés du travail STI.

L'influence n'est évidemment pas unidirectionnelle, et l'évolution de la STI façonnera les forces à l'œuvre dans les mégatendances, apportant des solutions aux défis qu'elles font naître. Par exemple, la mondialisation ne pourrait se faire sans les avancées dans les domaines des communications et des technologies de transport ; la croissance future des revenus sera de plus en plus tirée par les progrès de la STI ; et l'amélioration des résultats sur le plan de la santé et l'allongement de l'espérance de vie dépendent fortement de l'innovation dans les technologies médicales. À ces aspects bénéfiques s'ajoutent toutefois de possibles effets négatifs. De fait, les progrès de la STI peuvent contribuer à creuser les inégalités si l'on ne prête pas une attention suffisante à la diffusion des technologies et à l'acquisition des compétences ; de même, les progrès dans les domaines de l'intelligence artificielle et de la robotique ne vont pas sans susciter des inquiétudes pour l'avenir de l'emploi. Le chapitre 2 examine ces impacts de la STI – et bien d'autres encore – sachant que l'évolution technologique constitue à elle seule une mégatendance majeure.

Références

- Adalet McGowan, M. et al. (2015), *The Future of Productivity*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/eco/growth/OECD-2015-The-future-of-productivity-book.pdf (consulté le 29 août 2016).
- ADI (Alzheimer's Disease International) (2015), *World Alzheimer Report 2015: The Global Impact of Dementia – An Analysis of Prevalence, Incidence, Cost and Trends*, ADI, Londres.
- AEE (Agence européenne pour l'environnement) (2016a), *Development, Aid and Governance Indicators (DAGI)*, Brookings Institution.
- AEE (2016b), *IHME Global health data exchange* (base de données), www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/global-health-data-exchange-ghdx-database.
- AEE (2015), *The European Environment: State and Outlook 2015 – Assessment of Global Megatrends*, AEE, Copenhague.
- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2015a), *World Energy Outlook 2015*, OCDE/AIE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/weo-2015-en>.
- AIE (2015b), « Energy and Air Pollution », *World Energy Outlook 2015*, www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChange.pdf (consulté le 29 août 2016).
- AIE (2015c), *Energy Technology Perspectives 2015*, OCDE/AIE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/energy_tech-2015-en.
- AIE (2014a), *World Energy Outlook 2014*, OCDE/AIE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/weo-2014-en>.
- AIE (2014b), *Energy Technology Perspectives 2014*, OCDE/AIE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/energy_tech-2014-en.
- AIE (2011), *Biofuels for Transport*, IEA Technology Roadmaps, OCDE/AIE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264118461-en>.
- 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, <http://dx.doi.org/10.1787/5jrql2q2jj7b-en>.
- Arntz, M., T. Gregory et U. Zierahn (2016), « The Risk of Automation for Jobs in OECD Countries: A Comparative Analysis », *Documents de travail de l'OCDE sur les affaires sociales, l'emploi et les migrations*, n° 189, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jlz9h56dvq7-en>.
- 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.
- Boswinkel, J.A. (2000), Note d'information, International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC), Netherlands Institute of Applied Geoscience, Pays-Bas.
- Braconier, H., G. Nicoletti et B. Westmore (2014), « Policy challenges for the next 50 years », *Documents d'orientation du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 9, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jz18gs5fckf-en>.
- British Council (2013), *The Future of the World's Mobile Students to 2024*, Education Intelligence.
- Brynjolfsson, E. et A. McAfee (2011), *Race Against The Machine: How the Digital Revolution is Accelerating Innovation, Driving Productivity, and Irreversibly Transforming Employment and the Economy*, Digital Frontier Press, Lexington.
- Burt, D. et al. (2014), *Cyberspace 2025: Today's decisions, tomorrow's terrain – Navigating the future of cybersecurity policy*, Microsoft Corporation, www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/HQ/CI/CI/pdf/Events/netconference_march2015_submissions/C/reference_from_microsoft_cyberspace2025.pdf.
- CE (Commission européenne) (2014), *European Commission Foresight fiches: « Global Trends to 2030 »*, document de travail, <https://ec.europa.eu/digital-agenda/en/news/european-commission-foresight-fiches-global-trends-2030>.
- CE (2013), *Gendered Innovations – How Gender Analysis Contributes to Research*, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg, <http://dx.doi.org/10.2777/11868>.
- Cecchetti, S.G. et E. Kharroubi (2015), « Why does financial sector growth crowd out real economic growth? », *Document de travail de la BRI (Banque des règlements internationaux)*, n° 490, BRI, Bâle.
- Cecchini, M., J. Langer et L. Slawomirski (2015), *Antimicrobial Resistance in G7 Countries and Beyond: Economic Issues, Policies and Options for Action*, rapport de l'OCDE élaboré pour la Réunion des

- ministres de la Santé du G7, Berlin, Allemagne, 8 octobre 2015, Paris, Éditions OCDE, disponible à l'adresse : www.oecd.org/els/health-systems/Antimicrobial-Resistance-in-G7-Countries-and-Beyond.pdf.
- CNUCLD (Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification) (2014), *Désertification : La ligne de front invisible*, CNUCLD, Bonn, www.unccd.int/Lists/SiteDocumentLibrary/Publications/Desertification_The%20invisible_frontline.pdf (consulté le 29 août 2016).
- Cournède, B., O. Denk et P. Hoeller (2015), « Finance and inclusive growth », *Documents d'orientation du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 14, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5js06pbhf28s-en>.
- Cowen, T. (2011), *The Great Stagnation: How America Ate all the Low-Hanging Fruit of Modern History, Got Sick, and Will (Eventually) Feel Better*, Dutton Adult, New York.
- DAES (Département des affaires économiques et sociales des Nations Unies) (2015a), *World Population Prospects: The 2015 Revision*, DAES, Division de la population, New York, https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key_findings_wpp_2015.pdf (consulté le 29 août 2016).
- DAES (2015b), *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*, DAES, Division de la population, New York, <https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WUP2014-Report.pdf> (consulté le 29 août 2016).
- de la Maisonnette, C. et J. Oliveira Martins (2015), « The future of health and long-term care spending », *OECD Journal: Economic Studies*, vol. 2014, n° 1, http://dx.doi.org/10.1787/eco_studies-2014-5jz0v44s66nw.
- eBay (s.d.), *Micro-Multinationals, Global consumers, and the WTO: Towards a 21st Century Trade Regime*, www.ebaymainstreet.com/sites/default/files/Micro-Multinationals_Global-Consumers_WTO_Report_1.pdf.
- ECOSOC (Conseil économique et social des Nations Unies) (2016), www.csonet.org.
- Ericsson (2015), *Ericsson Mobility Report: On the Pulse of the Networked Society*, Ericsson, Stockholm www.ericsson.com/res/docs/2015/ericsson-mobility-report-june-2015.pdf (consulté le 29 août 2016).
- ESPAS (Système européen d'analyse stratégique et politique) (2015), *Tendances mondiales à l'horizon 2030 : L'Union européenne peut-elle relever les défis à venir ?*, ESPAS, Bruxelles, <http://europa.eu/espas/pdf/espas-report-2015.pdf>.
- ExxonMobil (2016), *The Outlook for Energy: A View to 2040*, Exxon Mobil Corporation, Irving, Texas, <http://cdn.exxonmobil.com/media/global/files/outlook-for-energy/2016/2016-outlook-for-energy.pdf> (consulté le 29 août 2016).
- FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) et CME (Conseil mondial de l'eau) (2015), *Towards a Water and Food Secure Future: Critical Perspectives for Policy-makers*, FAO/CME, Rome/Marseille, www.fao.org/nr/water/docs/FAO_WWC_white_paper_web.pdf (consulté le 29 août 2016).
- FEM (Forum économique mondial) (2014), *Towards the Circular Economy: Accelerating the Scale-Up across Global Value Chains*, Forum économique mondial, Genève, www3.weforum.org/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2014.pdf (consulté le 29 août 2016).
- FEM (2011), *The Future of Long-Term Investing*, Forum économique mondial, New York, www3.weforum.org/docs/WEF_FutureLongTermInvesting_Report_2011.pdf (consulté le 29 août 2016).
- Forbes (2016), « The World's Biggest Companies », *Forbes Global 2000 Ranking 2016*.
- Fox, K. et J. O'Connor (2015), « Five ways work will change in the future », *The Guardian*, 29 novembre, www.theguardian.com/society/2015/nov/29/five-ways-work-will-change-future-of-workplace-ai-cloudretirement-remote (consulté le 29 août 2016).
- Gartner (2013), *Gartner Says the Internet of Things Installed Base Will Grow to 26 Billion Units By 2020*, Communiqué de presse, 12 décembre, www.gartner.com/newsroom/id/2636073 (consulté le 29 août 2016).
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2014), *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, GIEC, Genève.
- Goddard, B. (2012), « Future perspectives: Horizon 2025 », in *Making a Difference: Australian International Education*, David, D. et B. Mackintosh (dir. pub.), Université de Nouvelle-Galles du Sud, Sydney.
- Gordon, R.J. (2012), « Is U.S. Economic Growth Over? Faltering Innovation Confronts the Six Headwinds », *NBER Working Paper*, n° 18315, Cambridge, Massachusetts, www.nber.org/papers/w18315.pdf (consulté le 29 août 2016).
- Gros, D. et C. Alcidi (dir. pub.) (2013), *The Global Economy in 2030: Trends and Strategies for Europe*, ESPAS, Bruxelles.

- Groupe de la Banque mondiale (2015), *Global Economic Prospects, January 2015: Having Fiscal Space and Using It*, Banque mondiale, Washington, DC, <http://dx.doi.org/10.1596/978-1-4648-0444-1>.
- Hegre, H. et H.M. Nygard (2014), « Peace on Earth? The future of internal armed conflict », *Conflict Trends*, vol. 2014, n° 1, Peace Research Institute, Oslo, http://file.prio.no/Publication_files/Prio/Hegre%20&%20Nyg%C3%A5rd%20-%20Peace%20on%20Earth.%20The%20Future%20of%20Internal%20Armed%20Conflict,%20Conflict%20Trends%20Policy%20Brief%201-2014.pdf (consulté le 29 août 2016).
- IFR (International Federation of Robotics) (2015), *Industrial Robot Statistics*, www.ifr.org/industrial-robots/statistics/.
- Ignaciuk, A. et D. Mason-D'Croz (2014), « Modelling adaptation to climate change in agriculture », *Documents de l'OCDE sur l'alimentation, l'agriculture et les pêcheries*, n° 70, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jxrcllnbxq-en>.
- ISU (Institut de statistique de l'UNESCO) (2014), *La mobilité des étudiants internationaux* (base de données), www.uis.unesco.org/education/pages/international-student-flow-vizFR.aspx.
- Johansson, Å. et E. Olaberria (2014a), « Global Trade and Specialisation Patterns Over the Next 50 Years », *Documents d'orientation du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 10, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jz18gpwfxq4-en>.
- Johansson, Å. et E. Olaberria (2014b), « Long-term patterns of trade and specialisation », *Documents de travail du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 1136, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jz158tbddbr-en>.
- Johansson, Å. et al. (2012), « Horizon 2060 : Perspectives de croissance économique globale à long terme : Un rapport " Objectif croissance " », *Documents d'orientation du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 3, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5k8zngscq3kf-fr>.
- Kenney, M. et J. Zysman (2016), « The Rise of the Platform Economy », *Issues in Science and Technology*, vol. 32, n° 3, printemps, <http://issues.org/32-3/the-rise-of-the-platform-economy>.
- Kharas, H. et G. Gertz (2010), « The new global middle class: A cross-over from west to east », projet de chapitre in C. Li (dir. pub.), *China's Emerging Middle Class: Beyond Transformation*, Brookings Institution Press, Washington, DC.
- Le club des élus numériques, juillet 2014.
- McKinsey Global Institute Company Base de données d'entreprises enregistrant un chiffre d'affaires ≥ 1 milliard USD par an.
- McKinsey Centre for Business and Environment et Fondation Ellen MacArthur (2015), *Growth Within: A Circular Economy Vision for a Competitive Europe*.
- MGI (McKinsey Global Institute) (2016), *Digital globalization: The new era of global flows*, www.mckinsey.com/business-functions/digital-mckinsey/our-insights/digital-globalization-the-new-era-of-global-flows.
- Ministère de la Défense du Royaume-Uni (2014), *Global Strategic Trends – Out to 2045*, Strategic Trends Programme, 5^e éd., Ministère de la Défense, Swindon, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/348164/20140821_DCDC_GST_5_Web_Secured.pdf (consulté le 29 août 2016).
- Mukunda, G. (2014), « The price of Wall Street's power », *Harvard Business Review*, vol. 92/6, <https://hbr.org/2014/06/the-price-of-wall-streets-power>.
- NASA (National Aeronautics and Space Administration) (29 septembre 2016), *Orbital Debris Program*, www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov (consulté le 29 septembre 2016).
- NIC (Conseil national du renseignement) (2012), *Global Trends 2030: Alternative Worlds*, NIC, Washington, DC.
- OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) (2016a), *Les clés de l'intégration : Les réfugiés et autres groupes nécessitant une protection*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264258365-fr>.
- OCDE (2016b), « A New Production Revolution: Interim Report », Direction de la science, de la technologie et de l'innovation, document interne, mars.
- OCDE (2016c), *Bases de données de l'OCDE sur l'environnement – Espèces menacées*, données extraites de https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=WILD_LIFE, 27 juillet.
- OCDE (2016d), « Illicit Trade: Converging Criminal Networks », *OECD Reviews of Risk Management Policies*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264251847-en>.

- OCDE (2016e), *OECD Regions at a Glance 2016*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/reg_glance-2016-en.
- OCDE (2016f), *OECD Compendium of Productivity Indicators 2016*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/pdtvy-2016-en>.
- OCDE (2016g), *Tendances et politiques du tourisme de l'OCDE 2016*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/tour-2016-fr>.
- OCDE (2016h), *Perspectives de l'emploi de l'OCDE 2016*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/10.1787/empl_outlook-2016-fr.
- OCDE (2016i), *L'articulation entre productivité et inclusivité*, Réunion du Conseil de l'OCDE au niveau des Ministres, Paris, 1-2 juin 2016, www.oecd.org/fr/rcm/documents/L-articulation-entre-productivite-et-inclusivite.pdf.
- OCDE (2016j), *OECD Business and Finance Outlook 2016*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264257573-en>.
- OCDE (2016k), « *New Forms of Work in the Digital Economy* », Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique, n° 260, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jlwnklt820x-en>.
- OCDE (2016l), *La base de données de l'OCDE sur la famille*, www.oecd.org/fr/els/famille/basededonnees.htm.
- OCDE (2016m), *Base de données sur la distribution des revenus : gini, pauvreté, revenus, méthodes et concepts*, www.oecd.org/fr/social/donnees-distribution-revenus.htm.
- OCDE (2015a), *Resserrer les liens avec les diasporas : Panorama des compétences des migrants 2015*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264241763-fr>, *Base de données sur les immigrés dans les pays de l'OCDE (DIOC) 2000/01 et 2010/11*.
- OCDE (2015b), *Les périls du tarissement : Vers une utilisation durable des eaux souterraines en agriculture*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264248427-fr>.
- OCDE (2015c), *La croissance verte dans les pêches et l'aquaculture*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264248397-fr>.
- OCDE (2015d), « *Déchets municipaux* », Statistiques de l'OCDE sur l'environnement (base de données), <http://dx.doi.org/10.1787/data-00601-fr>.
- OCDE (2015e), *Panorama de l'environnement 2015 : Les indicateurs de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264255531-fr>.
- OCDE (2015f), « *Vers une croissance verte ? Suivi des progrès* », *Études de l'OCDE sur la croissance verte*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264235663-fr>.
- OCDE (2015g), *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 (2015h), « *The next production revolution* », rapport établi pour la conférence « *Shaping the Strategy for Tomorrow's Production* », Copenhague, 27 février.
- OCDE (2015i), *L'impératif d'innovation : Contribuer à la productivité, à la croissance et au bien-être*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264251540-fr>.
- OCDE (2015j), *La gestion du risque de sécurité numérique pour la prospérité économique et sociale : Recommandation de l'OCDE et document d'accompagnement*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264246089-fr>.
- OCDE (2015k), « *OECD Global Strategy Group discusses megatrends and role of the Organisation in a changing world* », réunion du Groupe de stratégie globale, 2-3 décembre, www.oecd.org/fr/presse/global-strategy-group-discusses-megatrends-and-role-of-the-oecd-in-a-changing-world.htm.
- OCDE (2015l), *Panorama des administrations publiques 2015*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/gov_glance-2015-fr.
- OCDE (2015m), *États de fragilité 2015 : Réaliser les ambitions de l'après-2015*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264248878-fr>.
- OCDE (2015n), « *Taxing Multinational Enterprises: Base Erosion and Profit Shifting* », OECD Policy Brief, octobre, www.oecd.org/ctp/policy-brief-beps-2015.pdf.
- OCDE (2015o), *Innovation Policies for Inclusive Growth*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264229488-en>.

- OCDE (2015p), « Hearing on disruptive innovation in the financial sector », document de réflexion pour la réunion du Comité de la concurrence, 16-18 juin.
- OCDE (2015q), *OECD Report to G7 Leaders on Women and Entrepreneurship: A summary of recent data and policy developments in G7 countries*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/gender/OECD-Report%20-to-G7-Leaders-on-Women-and-Entrepreneurship.pdf (consulté le 29 août 2016).
- OCDE (2015r), *Tous concernés : Pourquoi moins d'inégalité profite à tous*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264235519-fr>.
- OCDE (2015s), *The Metropolitan Century: Understanding Urbanisation and Its Consequences*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264228733-en>.
- OCDE (2015t), « Addressing Dementia: The OECD Response », *Études de l'OCDE sur les politiques de santé*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264231726-en>.
- OCDE (2014a), « The Silver Economy as a Pathway for Growth: Insights from the OECD-GCOA Expert Consultation », compte rendu d'une réunion tenue à l'Université d'Oxford, 26 juin, www.oecd.org/sti/the-silver-economy-as-a-pathway-to-growth.pdf (consulté le 29 août 2016).
- OCDE (2014b), « Green Growth Indicators 2014 », *Études de l'OCDE sur la croissance verte*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264202030-en>.
- OCDE (2014c), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2014*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2014-fr.
- OCDE (2014d), « Perspectives économiques de l'OCDE no. 95 », *Perspectives économiques de l'OCDE : statistiques et projections (base de données)*, <http://dx.doi.org/10.1787/data-00688-fr>.
- OCDE (2014e), *Projections de la population (base de données)*, <http://dx.doi.org/10.1787/data-00538-fr>.
- OCDE (2014f), « The economic feedbacks of loss of biodiversity and ecosystems services », Direction de l'environnement de l'OCDE, document interne.
- OCDE (2014g), *OECD Pensions Outlook 2014*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/pens_outlook-2014-graph15-en.
- OCDE (2014h), *Lobbyists, Governments and Public Trust, Volume 3: Implementing the OECD Principles for Transparency and Integrity in Lobbying*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264214224-en>.
- OCDE (2014i), « Perspectives macroéconomiques à long terme : scénario de référence, no. 95 (Édition 2014) », *Perspectives économiques de l'OCDE : statistiques et projections (base de données)*, <http://dx.doi.org/10.1787/data-00690-fr>.
- OCDE (2014j), « Shifting Gear: Policy Challenges for the next 50 Years », *Notes de politique économique du Département des affaires économiques de l'OCDE, n° 24*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/eco/growth/Shifting%20gear.pdf (consulté le 29 août 2016).
- OCDE (2014k), *Cities and Climate Change – Policy Perspectives: National Governments Enabling Local Action*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/env/cc/Cities-and-climate-change-2014-Policy-Perspectives-Final-web.pdf (consulté le 29 août 2016).
- OCDE (2013a), *Sécurité alimentaire mondiale : Défis pour le système agricole et agro-alimentaire*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264201354-fr>.
- OCDE (2013b), *Les systèmes d'innovation agricole : Cadre pour l'analyse du rôle des pouvoirs publics*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264200661-fr>.
- OCDE (2013c), *Panorama des régions de l'OCDE 2013*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/reg_glance-2013-fr.
- OCDE (2012a), *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2050 : Les conséquences de l'inaction*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/env_outlook-2012-fr.
- OCDE (2012b), *L'éducation aujourd'hui 2013 : La perspective de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/edu_today-2013-fr.
- OCDE (2012c), « Mobiliser la technologie face aux catastrophes », in *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2012*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2012-fr.
- OCDE (2011), *The Future of Families to 2030*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264168367-en>.
- OCDE (2008), « L'enseignement supérieur à l'horizon 2030, Volume 1, Démographie », *La recherche et l'innovation dans l'enseignement*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264040687-fr>.

- OCDE et AIE (2015), *Energy Technology Perspectives 2015: Mobilising Innovation to Accelerate Climate Action*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/energy_tech-2015-en.
- OCDE et DBP (Bureau du Directeur parlementaire du budget) (2016), www.pbo-dpb.gc.ca/web/default/files/Documents/Reports/2016/Household%20Debt/Household_Debt_FR.pdf.
- OCDE et EUIPO (Office de l'Union européenne pour la propriété intellectuelle) (2016), *Trade in Counterfeit and Pirated Goods: Mapping the Economic Impact*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264252653-en>.
- OCDE et FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (2016), *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2016-2025*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2016-fr.
- OCDE et G20 (2016), *Érosion de la base d'imposition et transfert de bénéfices*, www.oecd.org/fr/fiscalite/beps/.
- OCDE et OMC (2016), *Échanges en valeur ajoutée (ÉVA) (base de données)*, http://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=TIVA2015_C2.
- OCDE et UE (Union européenne) (2014), *Gérer les migrations économiques pour mieux répondre aux besoins du marché du travail*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264217027-fr> (consulté le 29 août 2016).
- OMC (Organisation mondiale du commerce) (2015a), *Données de l'Observatoire de la santé mondiale*, www.who.int/gho/fr/.
- OMC (2015b), « Obésité et surpoids », Aide-mémoire n° 311, www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/fr/.
- OMC (2013), *World Trade Report 2013: Factors Shaping the Future of World Trade*, OMC, Genève, www.wto.org/english/res_e/books_e/world_trade_report13_e.pdf (consulté le 29 août 2016).
- OMS (Organisation mondiale de la santé) (2016), « Paludisme », Aide-mémoire n° 94, mis à jour en avril, www.who.int/mediacentre/factsheets/fs094/fr/ (consulté le 29 août 2016).
- OMS (2014a), *Global Tuberculosis Report 2014*, OMS, Genève, http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/137094/1/9789241564809_eng.pdf (consulté le 29 août 2016).
- OMS (2014b), *Global Status Report on Noncommunicable Diseases 2014*, OMS, Genève, http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/148114/1/9789241564854_eng.pdf?ua=1 (consulté le 29 août 2016).
- OMS (2014c), *Antimicrobial Resistance: Global Report on Surveillance*, OMS, Genève, http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/112642/1/9789241564748_eng.pdf?ua=1 (consulté le 29 août 2016).
- OMS (2011), *Global Status Report on Noncommunicable Diseases 2010*, OMS, Genève, www.who.int/nmh/publications/ncd_report_full_en.pdf (consulté le 29 août 2016).
- ONU (Organisation des Nations Unies) (2015a), *World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables*, Département des affaires économiques et sociales, Division de la population, New York, https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key_findings_wpp_2015.pdf (consulté le 29 août 2016).
- ONU (2015b), communiqué de presse, www.un.org/press/fr/2015/sgsm16842.doc.htm.
- ONU (2011), *World Population Prospects: The 2010 Revision*, Département des affaires économiques et sociales, Division de la population, New York, www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/trends/WPP2010/WPP2010_Volume-I_Comprehensive-Tables.pdf (consulté le 29 août 2016).
- Paunov, C. (2013), « Innovation and Inclusive Development: A Discussion of the Main Policy Issues », *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, n° 2013/01, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5k4dd1rvsnjj-en>.
- Pettersson, T. et P. Wallensteen (2015), « Armed conflicts, 1946-2014 », *Journal of Peace Research*, vol. 52, n° 4.
- Piketty, T. et G. Zucman (2013), « Capital is Back: Wealth-Income Ratios in Rich Countries 1700-2010 », présentation lors du séminaire de recherche de l'initiative Nouvelles approches face aux défis économiques (NAEC), 21 octobre, OCDE, Paris.
- PNUE (Programme des Nations Unies pour l'environnement) (2015), *The Emissions Gap Report 2015: A UNEP Synthesis Report*, PNUE, Nairobi, http://uneplive.unep.org/media/docs/theme/13/EGR_2015_301115_lores.pdf (consulté le 29 août 2016).
- PNUE (2014), *The Emissions Gap Report 2014*, UNEP, Nairobi, <http://uneplive.org/theme/index/13#indcs> (consulté le 29 août 2016).
- PNUE (2008), *Vital Water Graphics – An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters*, 2^e éd., PNUE, Nairobi, Kenya, www.unep.org/dewa/vitalwater/index.html (consulté le 29 août 2016).

- PovcalNet (2016), <http://iresearch.worldbank.org/PovcalNet/home.aspx>.
- Sharifian, F. (2013), *Globalisation and developing metacultural competence in learning English as an International Language*, SpringerOpen, <http://dx.doi.org/10.1186/2191-5059-3-7>.
- Skidelsky, R. (2013), « Rise of the robots: What will the future of work look like? », *The Guardian*, 19 février, Londres.
- UIP (Union interparlementaire) (2016), *Les femmes dans les parlements nationaux*, www.ipu.org/wmn-f/world-arc.htm.
- UNODC (Office des Nations Unies contre la drogue et le crime) (2011), *Estimating illicit financial flows resulting from drug trafficking and other transnational organized crimes*, UNODC, Vienne, www.unodc.org/documents/data-and-analysis/Studies/Illicit_financial_flows_2011_web.pdf (consulté le 29 août 2016).
- Warwick, K. (2013), « Beyond Industrial Policy: Emerging Issues and New Trends », *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, n° 2, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5k4869clw0xp-en>.
- Waste Management World (2015), « The future of the circular economy », *Waste Management World*, 24 juin, <http://waste-management-world.com/a/the-future-of-the-circular-economy> (consulté le 29 août 2016).
- Westmore, B. (2014), « International Migration: The relationship with economic and policy factors in the home and destination country », *Documents de travail du Département des affaires économiques de l'OCDE*, n° 1140, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jz123h8nd7l-en> (consulté le 29 août 2016).
- Zucman, G. (2015), « The Hidden Wealth of Nations – The Scourge of Tax Havens », University of Chicago Press, Chicago, IL.

Chapitre 2

Futures tendances technologiques

Le changement technologique ne manquera pas d'avoir des impacts considérables, qui transformeront les économies et les sociétés à de nombreux niveaux, au cours des 10 à 15 prochaines années. Confrontés à de multiples défis, tels que le vieillissement, le changement climatique et l'épuisement des ressources naturelles, nous attendons de la technologie qu'elle contribue à apporter des solutions nouvelles ou meilleures aux problèmes à mesure qu'ils apparaissent. Ces demandes socio-écologiques façonneront la future dynamique du changement technologique, tout comme les évolutions de la science et de la technologie elles-mêmes.

Le présent chapitre passe en revue dix technologies clés ou émergentes figurant parmi les plus prometteuses, qui pourraient susciter le plus de bouleversements et qui comportent des risques importants. Ces dix technologies ont été sélectionnées sur la base des résultats de quelques grands exercices de prospective conduits ces dernières années. Il s'agit des suivantes : internet des objets ; analytique de données massives ; intelligence artificielle ; neurotechnologies ; nano/microsatellites ; nanomatériaux ; fabrication additive ; technologies avancées de stockage de l'énergie ; biologie de synthèse ; chaîne de blocs. Le chapitre décrit tour à tour chaque technologie, en soulignant certains de ses impacts socio-économiques possibles et en examinant les questions connexes pour l'élaboration des politiques. Une section finale met en exergue certains des thèmes communs à ces dix technologies.

Introduction

Le changement technologique est en lui-même une mégatendance significative, qui remodèle en permanence, et souvent de façon radicale, les économies et les sociétés. Le champ couvert par la technologie – qu’il s’agisse des filières, des bases de connaissances ou des domaines d’application – est extrêmement vaste et diversifié, et les interactions entre la technologie et les économies et les sociétés sont complexes, sachant que les technologies évoluent en s’influençant les unes les autres. Ces conditions entourent de grandes incertitudes les orientations et impacts futurs du changement technologique, mais contribuent également à donner aux entreprises, aux industries, aux pouvoirs publics et aux citoyens l’occasion de façonner le développement des technologies et leur déploiement. Divers types d’études des technologies, comme des analyses de tendances, des évaluations, des prévisions et des exercices de prospective, peuvent fournir des éclairages utiles à cet égard.

La prévision technologique est une activité à laquelle on a largement recours depuis les années 50 pour la gestion des entreprises, des politiques publiques et de la R-D. Son objectif est de prédire avec autant de précision que possible les trajectoires technologiques et leurs impacts. Les méthodes utilisées sont multiples. Un grand nombre d’entre elles sont quantitatives et exploitent, par exemple, les données sur les brevets et les indicateurs bibliométriques pour identifier les technologies naissantes à un stade relativement précoce. D’autres s’appuient sur des appréciations d’experts, en particulier lorsque les évolutions à venir s’accompagnent d’incertitudes considérables. Comme ces méthodes présentent toutes des atouts et des faiblesses bien documentés, il est courant d’en appliquer plusieurs simultanément.

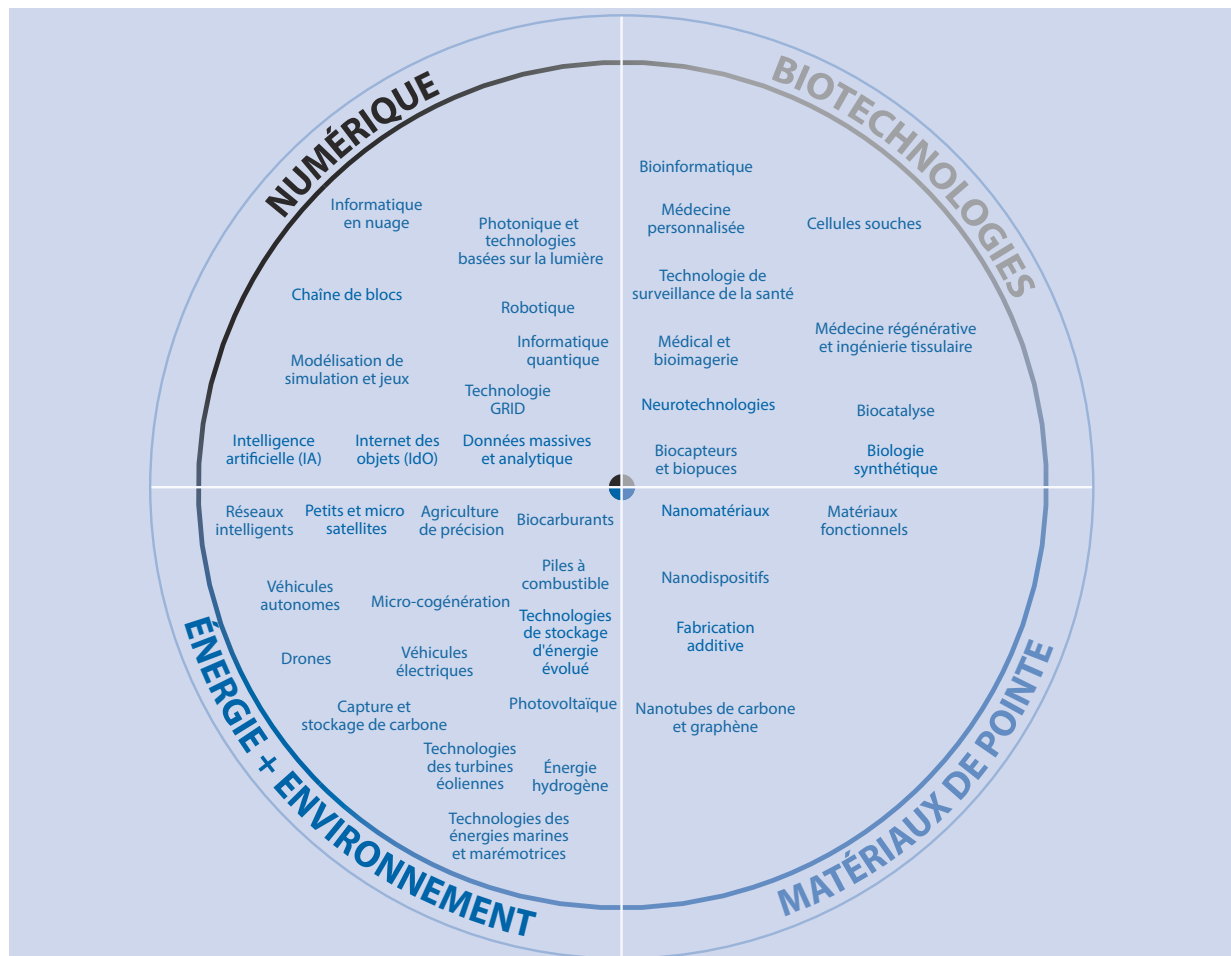
Depuis deux décennies, la prospective technologique apparaît comme un moyen de compléter les prévisions. Plus activement engagée dans une vision de l’avenir, elle préfère, aux prévisions définies, des avènements multiples, qu’elle présente souvent sous la forme de scénarios, en y acceptant les incertitudes. S’attachant à participer à la construction de l’avenir, et pas seulement à tenter de le prévoir, les exercices de prospective technologique invitent à une participation élargie, qui fait généralement intervenir des centaines, voire des milliers, de personnes de tous milieux, appelées à débattre de l’avenir. Beaucoup de ces exercices sont néanmoins dominés par les experts, et certaines formes de prévision technologique figurent habituellement parmi les méthodes employées. La finalité est souvent d’établir des listes de technologies clés ou émergentes pour favoriser les investissements et attirer l’attention des responsables politiques.

De nombreuses administrations nationales conduisent régulièrement des exercices de prospective afin d’identifier les technologies naissantes prometteuses, en général à un horizon de 10 à 20 ans. Le présent chapitre examine les résultats de tels exercices récemment menés par ou pour les pouvoirs publics de quelques pays de l’OCDE – Allemagne, Canada, Finlande, Royaume-Uni – et de la Fédération de Russie, où les résultats étaient disponibles à l’heure de la rédaction de ce rapport. Il intègre également les résultats d’un exercice récent de la Commission européenne. Chacun de ces examens est brièvement décrit dans l’annexe 2.A1.

Ces six exercices ont permis d'identifier, au total, bien plus d'une centaine de technologies clés ou émergentes, comme l'illustrent les tableaux de l'annexe 2.A2. Le degré de similitude entre les résultats des différents exercices peut sembler frappant : il convient néanmoins de garder à l'esprit que cette ressemblance est en partie un artéfact de la méthode de cartographie utilisée. À des fins de concision, sont indiqués uniquement les intitulés des familles de technologies, sous lesquels on pourra retrouver des informations plus détaillées et propres à chaque pays qui reflètent les atouts et les besoins technologiques nationaux. Dans le même temps, beaucoup sont des technologies clés génériques, donc il n'est pas surprenant que de nombreux pays les considèrent comme des priorités.

Le graphique 2.1 répertorie certaines des technologies les plus souvent recensées, réparties en quatre quadrants correspondant chacun à un domaine technologique général : les biotechnologies, les matériaux avancés, les technologies numériques et l'énergie et l'environnement. Dans la mesure du possible étant donné le graphique, les technologies sont représentées à une distance des « frontières » avec les autres domaines qui traduit la proximité ou l'éloignement relatif de la technologie par rapport aux autres domaines. Le reste du chapitre présente dix de ces technologies (mises en exergue dans le graphique 2.1), en décrivant brièvement leurs principales caractéristiques, leur dynamique

Graphique 2.1. **40 technologies clés et émergentes pour le futur**



de développement et les perspectives qu'elles offrent (essentiellement, leurs applications économiques, sociales et environnementales actuelles/possibles) et les principaux obstacles auxquels pourraient se heurter leur futur développement et/ou leurs futures applications, notamment les difficultés d'ordre technique, éthique ou réglementaire. Ces dix technologies sont les suivantes : **internet des objets ; analytique de données massives ; intelligence artificielle ; neurotechnologies ; nano/microsatellites ; nanomatériaux ; fabrication additive ; technologies avancées de stockage de l'énergie ; biologie de synthèse ; et chaîne de blocs**¹.

Cette sélection ne présuppose aucun ordre de priorité de ces technologies par rapport à d'autres. L'objectif est plutôt de fournir un échantillon des filières technologiques clés ou émergentes recouvrant un large éventail de domaines et de montrer les ruptures que le changement technologique pourrait induire au cours des 10 à 15 prochaines années. La section finale du chapitre met en exergue plusieurs caractéristiques communes à ces technologies et certaines des implications que cela entraîne pour l'action publique.

Internet des objets

L'internet des objets (IDO) nous promet un environnement hyperconnecté, en mesure de réagir à la vitesse du numérique, qui transformera profondément l'économie et la société à tous les niveaux. S'il constitue une possibilité formidable de soutenir le développement humain, sociétal et environnemental, il nécessite cependant la mise en place de plusieurs garanties pour assurer la sécurité et la protection des données.

Un internet multidimensionnel

L'IDO comprend l'ensemble des dispositifs et objets dont l'état peut être modifié via l'internet, avec ou sans intervention humaine active (OCDE, 2015a). Dépassant la seule sphère des terminaux traditionnellement connectés à l'internet, comme les ordinateurs portables et les smartphones, il recouvre tous les types d'appareils et de capteurs, présents dans l'espace public, sur le lieu de travail ou au domicile, qui collectent des données et les échangent avec d'autres objets ou des individus. L'IDO est, de fait, un internet multidimensionnel puisqu'il permet non seulement les connexions entre objets, mais aussi les connexions numériques avec d'autres composantes du monde physique, telles que les personnes, les animaux, l'air et l'eau. Les capteurs et les actionneurs en réseau de l'IDO servent, entre autres applications, à suivre la santé, la localisation et les activités des personnes et des animaux, ainsi que l'état des processus de production et de l'environnement naturel (OCDE, 2016a). Mais l'IDO est aussi étroitement lié à l'analytique de données massives et à l'informatique en nuage. Tandis que l'IDO collecte les données et agit en fonction de règles déterminées, l'infonuagique fournit la capacité de stockage nécessaire et l'analytique de données massives donne les moyens de traiter les données et de prendre des décisions. Ensemble, ces technologies sont à même d'alimenter les systèmes intelligents et les machines autonomes.

L'IDO se diffuse rapidement

Le nombre d'appareils connectés à l'intérieur et aux alentours du domicile dans les pays de l'OCDE passera sans doute de 1 milliard en 2016 à 14 milliards en 2022 (OCDE, 2015a). Le graphique 2.2 montre la répartition par pays des 363 millions de dispositifs connectés, systématiquement recensés par Shodan, un moteur de recherche des appareils connectés à l'internet. On estime qu'en 2030, 8 milliards de personnes et peut-être 25 milliards

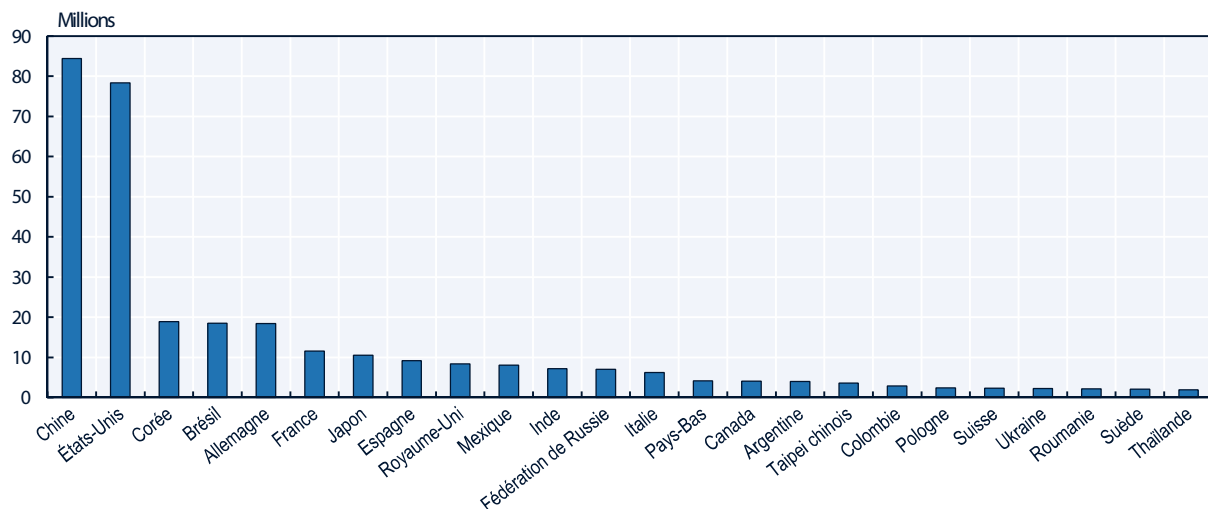
d'appareils « intelligents » actifs seront interconnectés et s'enchevêtreront dans un seul et même vaste réseau d'informations (OCDE, 2015b). D'autres estimations donnent la fourchette de 50 à 100 milliards de dispositifs connectés à l'intérieur et à l'extérieur du domicile d'ici 2020 (Evans, 2011 ; MGI, 2013 ; Perera et al., 2015). De cette évolution devrait émerger un « super-organisme » aussi gigantesque que puissant, dans lequel l'internet jouera le rôle de « système nerveux numérique mondial » (OCDE, 2015b).


L'IDO laisse présager de profondes transformations de nos sociétés

L'IDO devrait favoriser le développement d'une société hyperconnectée, rendue ultraréactive par le numérique. Son impact économique pourrait être compris entre 2 700 milliards et 6 200 milliards USD par an d'ici 2025 (MGI, 2013). Moteur de transformations profondes à tous les niveaux et dans tous les secteurs de l'économie, l'IDO devrait cependant avoir l'impact le plus déterminant sur le secteur des soins de santé, le secteur manufacturier, les industries de réseau et les collectivités locales.

Santé et soins de santé : L'IDO donne la possibilité de procurer de meilleurs soins de santé et d'améliorer la santé des individus en permettant la connexion de capteurs corporels internes et externes à la fois à des appareils de suivi médical individuel et aux systèmes de soins de santé des professionnels. Il permet en particulier le suivi à distance des patients à leur domicile et sur leur lieu de travail (OCDE, 2015a). Un internet des bionano-objets capable de surveiller et de gérer les risques internes et externes pour la santé pourrait être en train d'apparaître (Akyildiz et al., 2015). Le traitement des patients atteints de maladies chroniques, en particulier, devrait devenir plus efficace (MGI, 2013).

Graphique 2.2. **Objets connectés, 24 premiers pays, 2015**



Source : OCDE (2015a), *Perspectives de l'économie numérique 2015*, <http://dx.doi.org/10.1787/193eea37-fr>, citant Shodan, www.shodanhq.com.
StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433251>

Fabrication intelligente : L'IDO aura aussi un impact sur le secteur manufacturier auquel il donnera des moyens d'améliorer les opérations dans les usines et de gérer les risques au niveau de la chaîne d'approvisionnement (OCDE, 2015a). Les processus métier existants, tels que la logistique des produits, la gestion des inventaires et la maintenance des machines, seront radicalement modifiés. Par exemple, l'emploi de capteurs et de coupe-circuits pourrait considérablement réduire les pertes et les déchets. L'IDO propose

des données et des outils pour injecter de l'intelligence tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Associée aux progrès de la robotique, cette évolution pourrait conduire à des processus de production entièrement automatisés, de la personnalisation des spécifications par l'utilisateur jusqu'à la livraison finale (OCDE, 2015c).

Systèmes énergétiques : Les réseaux intelligents équipés de l'IDO et de compteurs intelligents permettront la communication bidirectionnelle entre les consommateurs et le réseau énergétique (OCDE, 2015a). En fournissant des informations en temps réel sur l'état du réseau, ils aideront les énergéticiens à réduire leurs coûts d'exploitation, et permettront de limiter le nombre de coupures de courant et les pertes d'électricité (OCDE, 2015a). De plus, l'IDO donnera aux usagers la possibilité d'accéder en temps réel à des données sur leur consommation d'énergie, ce qui devrait les encourager à la gérer en fonction des programmes de tarification intelligente (déjà mis en œuvre dans certaines régions des États-Unis) conçus pour inciter à consommer moins d'énergie lorsque la demande est particulièrement élevée.

Systèmes de transport : L'IDO promet de grandes améliorations de la gestion des transports et de la sécurité routière. Les capteurs intégrés aux véhicules et aux éléments de l'infrastructure routière pourraient devenir interconnectés, et ainsi contribuer à produire des informations sur les flux de circulation et l'état technique des véhicules et de l'infrastructure routière elle-même. Aujourd'hui déjà, les prestataires de services de navigation ont très largement recours aux smartphones pour suivre l'utilisation du réseau routier et fournir des points de circulation en temps réel à leurs clients. Les feux de circulation et les systèmes de péage routier pourraient être mieux adaptés à l'utilisation réelle qui est faite de la route, les services d'urgence pourraient être appelés automatiquement, et la protection contre le vol de véhicules pourrait être renforcée (OCDE, 2015a).

Villes et infrastructures urbaines intelligentes : L'IDO permet d'envisager, au-delà des réseaux intelligents et de l'optimisation du trafic, d'autres gains d'efficacité pour le fonctionnement des villes. Avec des capteurs embarqués dans les conteneurs à ordures ménagères ou intégrés aux infrastructures de gestion de l'eau, les collectivités pourraient rationaliser le ramassage des ordures et améliorer la gestion de l'eau (MGI, 2013). De plus, les citoyens pourraient utiliser des services de localisation sur leurs téléphones portables pour participer à la vie civique (par exemple, pour signaler l'endommagement d'une route ou d'un autre type d'infrastructure) ou pour apporter aux responsables de l'aménagement urbain de nouveaux éclairages sur l'utilisation des voies publiques (OCDE, 2015a).

Administration connectée : Tout comme ils peuvent améliorer les processus de production, les moyens de suivi en temps réel et les systèmes intelligents équipés de l'IDO peuvent bénéficier au secteur public. Une administration connectée associe les technologies de l'information, des communications et de l'exploitation pour planifier et gérer ses activités à tous les niveaux et ainsi apporter des efficacités et fournir de meilleurs services publics (OCDE, 2016a). Les responsables de l'élaboration des politiques pourraient mettre à profit les grandes quantités de données générées par l'IDO pour concevoir des instruments réactifs et adaptables avec suivi et évaluation en temps réel.

Le développement de l'IDO se heurte aux coûts élevés des TIC et au besoin de nouvelles compétences

La vitesse et l'efficacité du développement de l'IDO au cours des 15 prochaines années dépendent dans une large mesure du déploiement des réseaux haut débit fixes et mobiles et de la baisse du coût des appareils (OCDE, 2015a). De plus, l'optimisation du potentiel de l'IDO

nécessite que les entreprises et les pouvoirs publics créent les capacités nécessaires au traitement de grandes quantités de données très diverses. En effet, les volumes considérables de données produites par l'IDO sont de peu de valeur si l'information ne peut pas être extraite et analysée. À cette fin, l'analytique de données fournit un ensemble de techniques et d'outils employés pour extraire de l'information des données (OCDE, 2015b). Ces moyens sont notamment l'exploration de données (identification de motifs d'information à partir d'ensembles de données), le profilage (construction de profils dans lesquels on classe des entités en fonction de leurs attributs), l'information décisionnelle (création à intervalles réguliers de rapports sur les principaux indicateurs utiles à la gestion des processus), l'apprentissage automatique (algorithmes d'auto-amélioration permettant d'exécuter certaines tâches) et l'analytique visuelle (outils et techniques de visualisation des données). Les compétences en analytique de données sont un atout fondamental pour l'avenir, et pas seulement pour la croissance : l'iniquité sociale pourrait s'aggraver si l'écart continue de se creuser entre les personnes qui peuvent et les personnes qui ne peuvent pas suivre l'évolution de l'IDO (Horizons de politiques Canada, 2013).

Des incertitudes technologiques persistent

Le développement de l'IDO est sous-tendu par les progrès concomitants réalisés dans les domaines des données massives, de l'infonuagique, de la communication entre machines et des capteurs. Son impact dépendra en particulier des évolutions technologiques émergentes et futures en analytique de données massives et en intelligence artificielle. Dans le même temps, l'IDO ne peut se généraliser que si les capteurs, les ordinateurs, les actionneurs et les autres types de dispositifs communiquent efficacement entre eux. Pour l'heure, le contexte favorable de l'IDO a donné naissance à diverses normes concurrentes pour les solutions de connectivité filaire et sans fil, les plateformes logicielles et les applications, ce qui pose des questions d'interopérabilité (OCDE, 2016a). Les mécanismes de marché devraient à terme faire converger ces options vers un nombre plus réduit de solutions efficaces.

La question de la confiance est au cœur de toutes les préoccupations

Les atteintes possibles à la sécurité et à la vie privée sont considérées comme les risques les plus importants pour ce qui est de l'IDO. Des hackers pourraient prendre le contrôle à distance de certains objets connectés tels que le réseau électrique ou des voitures sans conducteur, ou manipuler des données générées par l'IDO. La fiabilité du réseau est un enjeu majeur, puisque des vies humaines pourraient dépendre du succès de transferts de données, parfois effectués en temps réel. La question fondamentale du consentement et peut-être la notion même de vie privée sont également remises en cause par le flux presque continu de données sensibles que les milliards de capteurs omniprésents produiront (OCDE, 2015a). Qui plus est, il se peut que des artéfacts de l'IDO deviennent des extensions du corps et de l'esprit, déplaçant l'autonomie et l'action humaines vers l'IDO, ou les lui déléguant, ce qui présenterait là encore des risques pour la sécurité et la vie privée des utilisateurs (IERC, 2015).

Le déploiement de services IDO à l'échelle nationale peut être entravé par la réglementation en vigueur ou l'incertitude réglementaire (OCDE, 2015a). La dimension internationale de l'IDO ajoute de la complexité, puisque les objets et les artéfacts peuvent être contrôlés à distance depuis l'étranger, tandis que les actions en justice sont régies par des cadres juridiques nationaux.

Analytique de données massives

Les outils et techniques de l'analytique sont nécessaires pour récolter tous les fruits des données massives. Les implications socio-économiques sont considérables, mais le défi majeur pour l'élaboration des politiques sera de trouver l'équilibre entre la nécessité d'ouverture et la protection contre les menaces qu'une « mise en données » extrême de la vie sociale pourrait faire peser sur la vie privée, la sécurité, l'équité et l'intégrité.

Concrétiser le potentiel des données massives

L'analytique de données massives recouvre l'ensemble de techniques et d'outils employés pour traiter et interpréter les gros volumes de données que produisent la numérisation croissante des contenus, la surveillance accrue des activités humaines et la diffusion de l'IDO (OCDE, 2015b). Elle peut être utilisée pour inférer des relations, établir des dépendances et prédire des résultats ou des comportements (Helbing, 2015 ; Kuusi et Vasamo, 2014). Plusieurs types de méthodes permettent d'extraire de l'information des données en les contextualisant et en examinant leur organisation et leur structure (OCDE, 2015b). L'exploration de données désigne l'ensemble de technologies de gestion de données, de techniques de prétraitement (nettoyage des données) et de méthodes d'analyse permettant de découvrir des motifs d'information à partir d'ensembles de données. Le profilage consiste à identifier des profils dans les attributs d'une entité particulière (par exemple, clients ou bons de commande) et effectuer des classements en conséquence. L'information décisionnelle a pour but de surveiller les indicateurs clés des activités en cours et de créer des rapports types à intervalles réguliers afin d'étayer la prise de décisions de gestion. L'apprentissage automatique englobe la conception, le développement et l'utilisation d'algorithmes qui peuvent exécuter une tâche donnée tout en apprenant simultanément à améliorer leurs performances. Enfin, l'analytique visuelle est un ensemble d'outils et de techniques permettant d'observer efficacement les données, de les interpréter et de les diffuser via des tableaux et des graphiques (souvent interactifs).

L'analytique de données massives offre la possibilité de stimuler la productivité, de favoriser une croissance plus inclusive et de contribuer au bien-être des citoyens (OCDE, 2015b). Les entreprises, les pouvoirs publics et les individus ont de plus en plus accès à des volumes de données sans précédent, qui leur permettent d'étayer leurs décisions en temps réel en combinant une large palette d'informations issues de sources diverses. L'IDO ainsi que l'augmentation constante, d'une part, des volumes de données accessibles et exploitables et, d'autre part, des vitesses d'accès à ces données accéléreront encore davantage le développement de l'analytique de données massives.

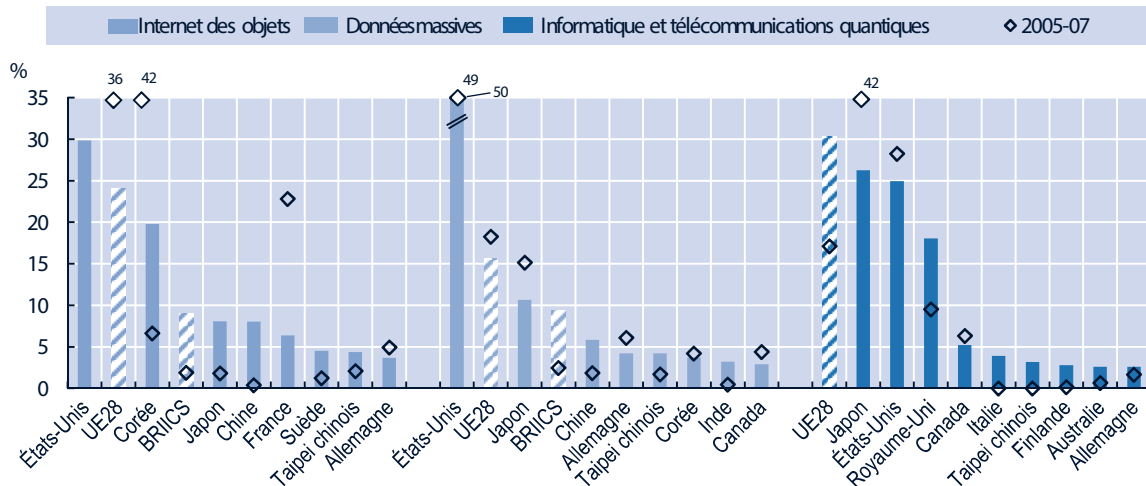
Les données massives créeront des opportunités considérables pour les entreprises et les consommateurs

L'exploitation des données massives deviendra un déterminant clé de l'innovation et un facteur de compétitivité des entreprises (MGI, 2011). D'une part, elle permet aux entreprises de surveiller étroitement et d'optimiser leurs activités, en collectant de grandes quantités de données non seulement sur leurs processus de production ou de fourniture de services, mais aussi sur la façon dont les clients prennent contact avec elles et passent commande. D'autre part, elle offre aux consommateurs des produits et des services plus personnalisés, spécifiquement adaptés à leurs besoins. L'abondance des applications commerciales possibles transparaît à travers l'investissement croissant dans l'analytique

de données massives et les technologies associées (IDO, informatique quantique et télécommunications), comme le montre le graphique 2.3. Depuis quelques années, le nombre de dépôts de brevet dans ces domaines enregistre une croissance à deux chiffres.

Graphique 2.3. Chefs de file en matière de brevets dans une sélection de technologies émergentes

Part des économies dans les familles de brevets IP5 déposés auprès de l'USPTO et de l'EPO, 2005-07 et 2010-12



Source : OCDE (2015d), Science, technologie et industrie : Tableau de bord de l'OCDE 2015 : L'innovation au service de la croissance et de la société, http://dx.doi.org/10.1787/sti_scoreboard-2015-fr.

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433269>

Les données massives seront aussi sources d'opportunités pour le secteur public

L'analytique de données massives offre également de nombreuses possibilités d'augmenter l'efficacité des administrations publiques (MGI, 2011). La collecte et l'analyse de gros volumes de données du secteur public peuvent contribuer à améliorer les politiques et les services publics, donc à accroître l'efficacité et la productivité de l'administration. L'analytique prédictive, par exemple, peut aider à déterminer les nouveaux besoins des administrations et de la société (OCDE, 2015b). De plus, il est possible que les données ouvertes du secteur public soient exploitées à des fins commerciales par des entreprises privées. Il s'agit aussi d'une ressource essentielle pour établir la confiance du public en renforçant l'ouverture, la transparence, la réactivité et la responsabilité du secteur public (Ubaldi, 2013). Grâce à l'analytique de données massives, les citoyens pourront prendre des décisions mieux informées et participer plus activement aux affaires publiques.

Les systèmes de recherche et les soins de santé, en particulier, devraient en bénéficier

Élargir l'accès à la production scientifique publique peut contribuer à améliorer l'efficacité et la productivité de l'ensemble de l'appareil de recherche, cela en diminuant le chevauchement des activités et les coûts dans la création, le transfert et la réutilisation des données ; en permettant la réutilisation de mêmes données pour plusieurs travaux de recherche, y compris dans le secteur privé ; et en multipliant les opportunités de participation à la recherche dans le pays et à l'échelle mondiale (OCDE, 2015b). L'essor des données ouvertes et des politiques et infrastructures de libre accès contribue déjà à l'intégration des ensembles de données et résultats scientifiques isolés aux données massives. Le nombre de parties prenantes à l'élaboration des politiques et des pratiques de recherche va continuer d'augmenter, transformant la science en entreprise citoyenne,

favorisant une approche plus entrepreneuriale de la recherche et encourageant des politiques de recherche plus responsables.

L'analytique de données massives offre la possibilité d'améliorer substantiellement plusieurs aspects des soins de santé, notamment les soins au patient, la gestion des systèmes de santé, la recherche sur la santé et le suivi de la santé publique (OCDE, 2015b). En utilisant les systèmes de dossiers médicaux électroniques pour partager des données sur la santé, on peut accroître l'accès efficient aux soins de santé et obtenir de nouveaux éclairages au service de la conception de produits et services de santé innovants (OCDE, 2013a). Le diagnostic, le traitement et le suivi thérapeutique des patients pourraient devenir des activités menées conjointement par des médecins et par des logiciels analytiques. De plus, les soins cliniques pourraient devenir plus préventifs par nature, à mesure que le suivi thérapeutique et l'analytique prédictive aideront à détecter les pathologies à un stade précoce. En complément des données ouvertes de la recherche, l'IDO fournira lui aussi une pléthore de données sur la santé des personnes malades comme des personnes bien portantes, qui pourront venir alimenter la recherche et faire progresser la médecine. On pourrait associer des données générales sur l'utilisation des soins de santé avec des données biologiques et cliniques plus approfondies pour identifier de nouveaux axes de progrès des connaissances communes, par exemple sur les maladies liées au vieillissement, ou soutenir la recherche interdisciplinaire, par exemple sur les effets combinés des traitements et des soins (Anderson et Oderkirk, 2015).

Des lacunes, au niveau des infrastructures TI, des compétences et du cadre juridique, restent à combler

L'essor de l'analytique de données massives pose de grandes difficultés pour les politiques de développement des compétences et de l'emploi (OCDE, 2015b). La demande de compétences de spécialistes des données dépassera à la fois l'offre actuelle sur le marché du travail et les capacités existantes des systèmes d'éducation et de formation, ce qui nécessitera d'ajuster rapidement les programmes de cours ainsi que les palettes de compétences des professeurs et des travailleurs formés sur le tas. Les données massives devraient aussi accentuer la nécessité de disposer d'une importante puissance de calcul intensif, de grandes installations de stockage et d'un internet rapide, omniprésent et ouvert (avec IDO), que les infrastructures TI actuelles ne peuvent pas totalement soutenir. Les instances juridiques doivent aussi évoluer pour mieux promouvoir un flux de données sans heurt entre pays, secteurs ou organisations. Certaines questions suscitent des préoccupations croissantes, notamment la façon de définir et d'attribuer des droits d'accès ouvert tout en préservant ce qui incite les éditeurs et les chercheurs à publier et à conduire des recherches. La coopération internationale sera essentielle à cet égard.

Les inégalités sociales risquent de se creuser

Le creusement des inégalités sociales résultera non seulement de la destruction et de la polarisation des emplois qui accompagneront inévitablement les transformations structurelles des compétences, mais aussi d'une plus faible mobilité sociale et d'une fracture numérique persistante. La discrimination que permettra l'analytique de données pourrait générer davantage d'efficacité, mais également limiter l'aptitude d'un individu à modifier ses trajectoires éducative et professionnelle, contraintes par le phénomène de dépendance au sentier, et à lever les verrous socio-économiques. De surcroît, une nouvelle fracture numérique voit le jour du fait des asymétries accrues de l'information et de la

perte de pouvoir qui s'ensuit, des individus au profit des organisations, et des entreprises classiques et des administrations au profit des entreprises axées sur les données (OCDE, 2015b). La cohésion sociale et la résilience économique pourraient être remises en cause, en particulier dans les économies en développement. Pour éviter l'augmentation des inégalités de revenu, les pouvoirs publics devront aider les travailleurs à s'adapter aux évolutions de la demande de compétences en promouvant l'apprentissage tout au long de la vie et en améliorant l'accès à un enseignement de haute qualité.

La protection de la vie privée, la sécurité et l'intégrité sont également en jeu

L'analytique de données massives pourrait inciter à la collecte à grande échelle de données personnelles auxquelles il pourrait devenir possible d'accéder par des méthodes qui portent atteinte au droit à la vie privée. Par exemple, si le fait, pour des patients, de partager des données sensibles sur leur santé peut contribuer à soutenir la recherche médicale et leur permettre de bénéficier d'un traitement médical préférentiel, le fait de rendre des données médicales accessibles à des intérêts commerciaux (par exemple, compagnies d'assurance et employeurs) soulève de graves questions en matière de protection de la vie privée et d'équité. La vie privée est également menacée si les données ne sont pas bien protégées et si des atteintes à la sécurité ouvrent la voie à des piratages ou des utilisations frauduleuses.

L'analytique de données massives offre la possibilité sans précédent de combiner des données personnelles avec des programmes de reconnaissance de formes pour obtenir de nouvelles informations et connaissances à propos de la population (FIT, 2014). Cependant, les mêmes données et programmes pourraient servir à manipuler les personnes, à déformer leur perception de la réalité et à influencer leurs choix (Glancy, 2012 ; Helbing, 2015 ; IERC, 2015 ; Piniewski, Codagnone et Osimo, 2011). L'autonomie, la liberté de pensée et le libre-arbitre seraient remis en cause, ce qui pourrait fragiliser les fondements des sociétés démocratiques modernes. Les décideurs devront promouvoir l'utilisation responsable des données personnelles pour empêcher les violations de la vie privée, notamment en définissant le bon ensemble de politiques de la concurrence et de protection des consommateurs, et élargir la capacité de surveillance des autorités de protection de la vie privée.

Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) vise à doter les machines de capacités de raisonnement qui pourraient un jour surpasser celles des êtres humains. Il est difficile d'estimer l'impact global d'une telle évolution. Néanmoins, il est probable que les systèmes intelligents seront à l'origine de gains de productivité considérables et de transformations irréversibles de nos sociétés.

Quand les machines commencent à penser

On entend par IA la capacité des machines et des systèmes à acquérir et appliquer des connaissances et à adopter des comportements intelligents. Cette notion recouvre une vaste palette de tâches cognitives : perception, traitement du langage parlé, raisonnement, apprentissage, prise de décision et capacité de déplacer et de manipuler des objets en conséquence. Pour agir et apprendre, les systèmes intelligents s'appuient simultanément sur l'analytique de données massives, l'informatique en nuage, la communication entre machines et l'IDO (OCDE, 2015a). L'IA donne naissance à de nouveaux types de logiciels et de robots de plus en plus à même d'agir comme des agents autonomes, donc de fonctionner

beaucoup plus indépendamment des décisions de leurs créateurs et opérateurs humains que les machines ne l'avaient fait jusqu'à présent.

L'essor des machines intelligentes

Les premiers efforts de développement des IA avaient pour but de définir des ensembles de règles que les logiciels pourraient appliquer pour exécuter une tâche. De tels systèmes fonctionnaient pour résoudre des problèmes étroitement circonscrits, mais étaient tenus en échec lorsqu'il s'agissait d'accomplir des tâches plus complexes telles que la traduction ou la reconnaissance vocale (OCDE, 2015b). Le recours aux méthodes statistiques a permis de franchir des étapes déterminantes dans le domaine de l'IA en axant les travaux sur l'analytique de données. Au lieu de s'en remettre à un ensemble exhaustif de procédures prescriptives, l'apprentissage automatique (ou statistique) vise à fonder la prise de décision sur des fonctions de probabilité dérivées de l'expérience passée. De cette façon, un ordinateur peut jouer aux échecs non seulement en utilisant l'ensemble des mouvements autorisés disponibles et en calculant leurs résultats possibles, mais aussi en se référant aux jeux précédents et en calculant la probabilité qu'un mouvement spécifique mène à la victoire. Grâce à l'apprentissage automatique, les applications logicielles peuvent exécuter certaines tâches tout en apprenant simultanément à améliorer les performances, c'est-à-dire en collectant et en analysant des données sur leur expérience afin de proposer des ajustements à leur propre fonctionnement qui soient susceptibles d'améliorer progressivement les modalités d'exécution des tâches. De ce fait, les machines conçoivent, adaptent et perfectionnent les règles mêmes qui guident leurs opérations. Les progrès de l'IDO et de l'analytique de données nourrissent cette branche de l'algorithmique en lui apportant toujours plus de données pour la prise de décision. Grâce aux progrès de la puissance de calcul et des techniques d'apprentissage automatique, il est escompté que les capacités cognitives des machines surpasseront un jour celles des humains (Helbing, 2015).

L'IA n'est pas confinée au monde numérique : associée aux progrès réalisés en génie mécanique et électrique, elle a aussi accru la capacité des robots à exécuter des tâches cognitives dans le monde physique. De fait, elle permettra aux robots de s'adapter à de nouveaux environnements de travail sans reprogrammation (OCDE, 2015c). Les robots avancés qui peuvent s'adapter à l'évolution des conditions de travail et apprendre de manière autonome pourraient générer des économies importantes sur les coûts de la main d'œuvre ainsi que des gains de productivité. L'IA pourrait, par exemple, améliorer la gestion des inventaires et l'optimisation des ressources. De plus, l'IA est très prometteuse pour la sécurité : en remplaçant physiquement les individus, elle pourrait réduire les accidents du travail et améliorer la prise de décision dans des situations menaçantes et dangereuses.

L'IA pourrait profondément bouleverser les activités industrielles

Les robots dotés d'une IA occuperont une place de plus en plus centrale dans les activités logistiques et manufacturières, remplaçant le travail humain dans les processus de production (OCDE, 2015b). L'IA élargit la sphère d'utilisation des robots, historiquement cantonnés aux tâches monotones demandant vitesse, précision et dextérité. Les lignes de production sont de plus en plus équipées de capteurs intégrés, ce qui ajoute de l'intelligence et de l'efficacité, et permet l'adaptation des processus au fil de l'évolution des exigences de production et des conditions de travail. Les secteurs qui connaîtront probablement des transformations radicales et une nouvelle révolution de leur production sont l'agriculture, les produits chimiques, le pétrole et le charbon, le caoutchouc et les plastiques, la chaussure et le

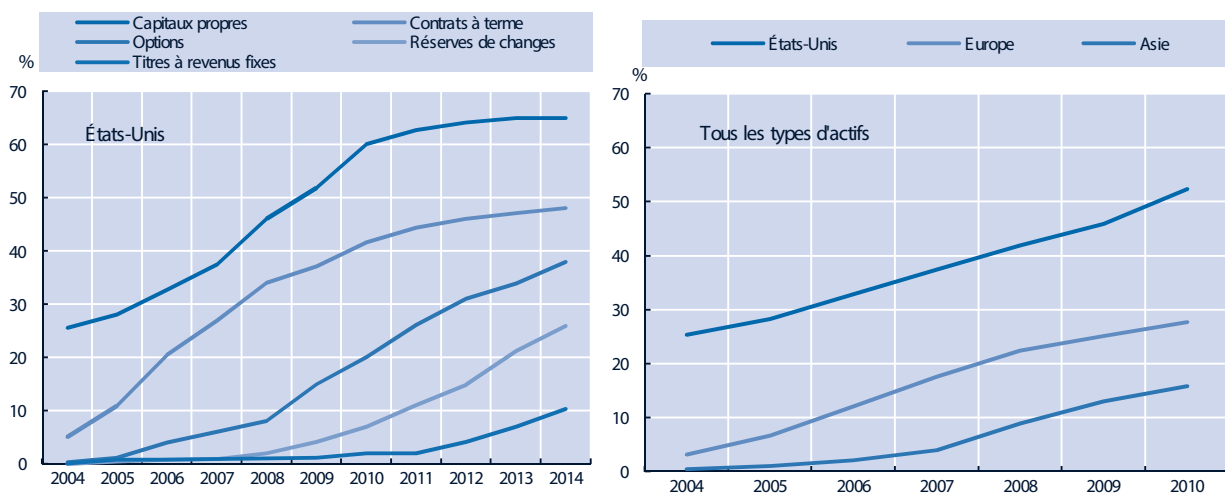
textile, les transports, la construction, la défense, et la surveillance et la sécurité (López Peláez et Kyriakou, 2008 ; FIT, 2015 ; Roland Berger, 2014 ; ESPAS, 2015 ; MGI, 2013 ; UK GOS, 2012).

L'IA pourrait aussi révolutionner un large éventail de services


Le déploiement de l'IA est appelé à se généraliser dans un grand nombre de secteurs des services, notamment le divertissement, la médecine, le marketing et la finance. La finance a déjà été transformée par l'analytique de données massives et l'IA puisque, désormais, les algorithmes effectuent plus de transactions de manière autonome que les personnes aux États-Unis (graphique 2.4). Cette tendance, particulièrement marquée sur les places boursières, est également visible pour les transactions d'autres types d'actifs tels que les contrats à terme, les options et les changes. L'apprentissage automatique a le potentiel de renforcer le rôle des algorithmes dans les transactions en leur permettant d'ajuster leurs stratégies au cours du temps. À l'heure actuelle, beaucoup de produits créés autour de l'IA ont la forme de services en ligne (OCDE, 2015b). Par exemple, les moteurs de recommandation utilisés par Amazon, Netflix et Spotify sont fondés sur des techniques d'apprentissage automatique. Dans le secteur de la santé, les diagnostics deviendront sans doute plus exacts et accessibles quand on aura recours à l'IA pour analyser des bases de données médicales (OCDE, 2016a). Des robots de chirurgie sont déjà utilisés, et il est très probable qu'on assistera à davantage d'automatisation de tâches liées à la santé (López Peláez et Kyriakou, 2008). À mesure que ses performances augmentent, en particulier son anthropomorphisme, l'IA pourrait être de plus en plus amenée à accomplir des tâches sociales. Des « robots sociaux » pourraient répondre aux besoins des sociétés vieillissantes en aidant les personnes physiquement et psychologiquement, par exemple en faisant artificiellement office de compagnons afin de réduire l'isolement social des personnes âgées (IERC, 2015).

Graphique 2.4. Les algorithmes effectuent de plus en plus de transactions de manière autonome

Part des transactions algorithmiques dans l'ensemble des transactions financières, pour une sélection de pays, 2004-10 et par type d'actifs aux États-Unis, 2004-14



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

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433273>

L'IA pourrait entraîner un phénomène massif de « destruction créatrice »

Les progrès de l'apprentissage automatique et de l'IA pourraient bientôt élargir les possibilités d'automatisation des tâches. Si le taux de remplacement de la main d'œuvre

par l'IA fait toujours débat, il n'en est pas moins inévitable que le développement des systèmes intelligents permettra d'automatiser une partie du travail intellectuel. La décision d'automatiser ne dépendra plus de la distinction entre travail manuel et travail intellectuel, mais du degré plus ou moins routinier des tâches. Des pressions particulières pourraient peser sur les catégories des revenus intermédiaires, à mesure que davantage d'activités administratives, cognitives et analytiques pourront être confiées à des applications axées sur l'IA et les données.

Récolter les bénéfices de l'IA nécessite que plusieurs conditions-cadres soient en place

Pour cueillir les fruits de l'IA, il est essentiel d'assurer la fourniture de réseaux fiables de transport, d'énergie et de communication, dont l'IDO (OCDE, 2015a). L'IA peut commettre des erreurs susceptibles de causer des dommages graves (par exemple, mauvais diagnostic d'un patient). Ses décisions pourraient également susciter malentendus, critiques ou rejets (par exemple, refus d'un prêt). La nature imparfaite de l'IA soulève des questions concernant les principes de la responsabilité juridique et la manière de répartir cette responsabilité entre l'IA elle-même, ses constructeurs, ses programmeurs, ses propriétaires, etc. Une grande partie des bénéfices de l'IA ne peuvent être récoltés sur des marchés comme ceux des transports ou de la santé que si des lois et des cadres législatifs ont été préalablement élaborés et déployés. L'IA pose également l'autre question juridique des droits de propriété intellectuelle des inventions fondées sur l'IA, et des modalités de répartition des droits et recettes correspondants. Les considérations juridiques auront des conséquences majeures sur les marchés de l'assurance et les régimes de la propriété intellectuelle.

Compte tenu de ces prévisions de tendances, de nouveaux besoins de compétences devraient émerger. La demande de travailleurs intellectuels aptes à développer des IA et à exécuter des tâches rendues possibles par l'IA augmentera. Le savoir créatif ou tacite, moins codifiable, et les compétences nécessitant une interaction sociale ou de la dextérité physique, moins facilement automatisables, devraient rester entre les mains humaines au cours des prochaines décennies (López Peláez et Kyriakou, 2008 ; Brynjolfsson et McAfee, 2015). Les systèmes d'enseignement d'aujourd'hui devront veiller à ce que les jeunes soient dotés des compétences dont ils auront besoin pour agir dans l'environnement augmenté par l'IA de demain. Les systèmes de formation aideront à faciliter la transition et à s'assurer que les individus peuvent faire face au développement des technologies de l'IA et en tirer le meilleur parti.

L'IA pourrait modifier les individus de manière imprévisible

L'intégration de l'IA à la sphère privée conduira les personnes à nouer de nouveaux liens affectifs, en particulier avec les robots dotés de l'IA de forme humanoïde, et modifiera les comportements sociaux humains. Certains avancent que les différences de comportement entre machines avec IA et machines sans IA pourraient justifier d'accorder des droits juridiques aux robots sociaux et que leur protection pourrait servir de guide à une réglementation plus large des comportements socialement désirables (Darling, 2012). D'autres considèrent que les relations sociales entre humains et robots devraient se traduire par une obligation morale (Coeckelbergh, 2010). Plus largement, la présence de l'IA dans toutes les activités humaines pose plusieurs questions éthiques et philosophiques concernant la vie humaine, et notamment la déshumanisation possible de la société. Elle questionne le rôle des êtres humains dans une nouvelle société à laquelle contribue l'IA et pourrait redéfinir la façon dont les personnes occupent leur temps, autrement dit rééquilibrer le rapport entre travail et loisir.

Neurotechnologies

Les neurotechnologies émergentes sont riches de promesses en matière de diagnostic et de thérapies aux fins d'un vieillissement en bonne santé et d'une augmentation généralisée de l'être humain. Toutefois, certaines neurotechnologies soulèvent de profondes questions éthiques, juridiques, sociales et culturelles, et appellent l'attention des pouvoirs publics.

Que sont les neurotechnologies ?

Une neurotechnologie peut être définie comme tout moyen artificiel permettant d'interagir avec le cerveau et le système nerveux dans le but d'examiner la structure et la fonction des systèmes neuronaux, d'y accéder et de les manipuler (Giordano, 2012). Il s'agit, par exemple, de la recherche sur le cerveau ; des appareils électroniques pouvant réparer des fonctions cérébrales ou s'y substituer ; des dispositifs de neuromodulation utilisés pour traiter des troubles mentaux ; des synapses et réseaux neuronaux artificiels utilisés dans les interfaces cerveau-machine, ou encore du développement de l'IA.

Les neurotechnologies sont riches de promesses pour de nouvelles thérapies et pour l'augmentation de l'homme

Les neurotechnologies renferment plusieurs promesses : mieux comprendre les processus naturels du cerveau, étudier et traiter les troubles et traumatismes neurologiques, et augmenter les capacités cognitives en vue d'améliorer les performances humaines. Voici quelques exemples de neurotechnologies, au stade de la recherche ou de l'application :

- **L'optogénétique** : contrôle optique actif de neurones visant à observer et à contrôler leur connexion et leur fonction (Hoffman et al., 2015). Les approches optogénétiques promettent de révolutionner les neurosciences en utilisant la lumière pour manipuler l'activité neuronale de neurones génétiquement ou fonctionnellement définis, avec une précision de l'ordre de la milliseconde. Elles offrent aux neuroscientifiques un outil puissant pour étudier les liens de causalité entre cellules neuronales, réseaux neuronaux et comportement. Avec les futurs travaux, les sciences du cerveau s'étendront au domaine des émotions, permettant d'explicitier davantage de faits concernant les maladies neurodégénératives, le comportement et la pensée (Kravitz et Bonci, 2013).
- **Les technologies de neuromodulation** : stimulation neuronale ciblée, utilisée aux fins de la recherche fondamentale ou en cas de troubles neuronaux. Les dispositifs de neuromodulation deviennent de plus en plus importants dans le traitement des troubles du système nerveux, et soulèvent des questions concernant l'authenticité et le soi, l'augmentation, leur utilisation chez les populations vulnérables (par exemple les enfants et les individus souffrant de troubles mentaux), leur utilisation non volontaire (par exemple suite à une décision de justice ou sur prescription d'un psychiatre) ou leur utilisation non supervisée.
- **Les interfaces cerveau-machine** : utilisées pour capter et décoder les schémas d'activité neuronale au moyen de dispositifs extérieurs, afin de mettre en relation des commandes par la pensée et des appareils externes. Grâce aux interfaces cerveau-machine (ou cerveau-ordinateur), des appareils peuvent être contrôlés sans solliciter les mains et l'on peut suivre l'état de l'utilisateur, ce qui peut être utile pour les conducteurs d'automobile, les pilotes, les spationautes et d'autres personnes effectuant une activité exigeante au niveau de la concentration (Potomac Institute, 2015 ; Shih, Krusienski et Wolpaw, 2012).

Supposition plus audacieuse, les interfaces cerveau-machine pourraient être utilisées pour améliorer le niveau d'intelligence, en permettant à plusieurs cerveaux de coopérer sur certaines tâches, avec à la clé de meilleures performances. Elles pourraient également servir à développer de nouveaux sens chez les êtres humains, tels que la capacité à sentir les champs magnétiques, le rayonnement infrarouge ou les ondes radio. Des difficultés techniques restent à surmonter, comme la mise au point d'interfaces neuronales entièrement implantables, autonomes et cliniquement viables, fonctionnant pendant toute la vie de l'utilisateur, ou l'amélioration des performances de la commande des appareillages prothétiques (Maharbiz, 2015).

- **Les nanorobots** : pourraient être définis comme des systèmes constitués d'assemblages de composants à l'échelle du nanomètre, et dont la dimension varie entre 1 nanomètre (nm) et 100 nm (Mavroidis et Ferreira, 2013). Les nanorobots, qui peuvent être injectés par millions dans le sang, représentent un potentiel formidable pour les neurosciences, le diagnostic et la thérapie. Les applications de demain pourraient porter sur l'actionnement, la détection, la signalisation, le traitement de l'information, l'intelligence et le comportement en essaim, ainsi que le contournement de la barrière hémato-encéphalique. La potentielle commande informatisée des nanorobots à partir de diverses machines et le comportement en essaim représentent, pour les futurs diagnostics et thérapies, une rupture dans l'innovation en matière de santé.

Les progrès dans les sciences du cerveau sont cruciaux pour développer des neurotechnologies innovantes (et vice versa)

Toute future émulation informatique des fonctions cérébrales trouvera ses racines dans les initiatives actuelles de recherche sur le cerveau. Des consortiums de recherche collaborative à travers le monde visent à progresser encore dans les sciences du cerveau dans l'optique de créer de nouveaux paradigmes pour la recherche et les produits d'innovation. Entre autres, les initiatives majeures de recherche sur le cerveau listées dans le tableau 2.1 devraient permettre d'apporter des réponses à des questions qui se posent depuis longtemps en sciences du cerveau, médecine et philosophie : quels sont les corrélats neuronaux de l'esprit et de la conscience ? Comment de grands réseaux de cellules nerveuses traitent-ils l'information dans des cerveaux sains, et quelles modifications pathologiques interviennent dans les maladies neurodégénératives ? Comment des parties distinctes du cerveau se coordonnent-elles et travaillent-elles ensemble ? Et comment construire des ordinateurs de manière différente et « plus intelligente » ?

Les projets actuels en sciences du cerveau ont un potentiel énorme : ils pourraient permettre de résoudre des difficultés persistantes en médecine, de créer les outils qui transformeront l'industrie et de donner les clés de la compréhension du cerveau et de l'esprit. Toutefois, malgré de nombreux progrès remarquables en neurosciences et malgré le large champ des applications technologiques futures, la recherche fondamentale n'a pas encore répondu à l'une des questions essentielles à la compréhension du fonctionnement du cerveau : quelle est la relation biologique et physique entre les assemblages de neurones et les éléments de pensée ?

On anticipe que les secteurs des biens de consommation et de la défense vont investir davantage dans les sciences du cerveau à mesure que le potentiel des neurotechnologies augmentera. L'innovation en la matière est florissante, et des brevets ont été accordés à des entreprises dont les activités sont très éloignées du champ médical, opérant par exemple

Tableau 2.1. **Initiatives majeures dans le domaine des sciences du cerveau**

Initiative (Pays/Région)	Objectif	Futur impact potentiel
Human Brain Project (HBP) (Europe)	Obtenir une compréhension intégrée et à plusieurs niveaux de la structure et des fonctions du cerveau grâce au développement et à l'utilisation des TIC.	Technologies neuromorphiques et neuro-robotiques ; technologies de calcul intensif afin de simuler le fonctionnement du cerveau ou de contrôler des robots et des systèmes autonomes et pour d'autres applications à forte intensité de données ; médecine personnalisée dans les domaines de la neurologie et de la psychiatrie.
Israel Brain Technologies (Israël)	Promouvoir la collaboration et le dialogue internationaux ; accélérer la recherche, les activités industrielles et l'innovation locales.	Plateformes mobiles permettant l'interprétation en temps réel de l'activité cérébrale émotionnelle et cognitive ; traitements et guérison de la sclérose latérale amyotrophique (SLA) ; neurotechnologie avec plateforme implantée utilisable pour les interfaces cerveau-machine, le suivi de l'épilepsie et de la neuromodulation.
Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies, « Brain/MINDS » (Japon)	Cartographier la structure et la fonction des circuits neuronaux dans le but ultime de comprendre la complexité du cerveau humain.	Techniques d'imagerie haute résolution, grand angle, profonde et longue pour connaître les structures et fonctions du cerveau ; techniques de contrôle de l'activité neuronale ; détermination de la relation causale entre les lésions structurelles/fonctionnelles des circuits neuronaux et les phénotypes des maladies, et <i>in fine</i> mise au point d'interventions thérapeutiques innovantes pour certaines maladies.
Blue Brain Project (Suisse)	Établir, au moyen d'un supercalculateur, une reconstruction numérique du cerveau d'un rongeur et, à terme, du cerveau humain.	Neurorobotique et applications de calcul neuromorphique afin de mieux comprendre le cerveau et de progresser dans le diagnostic et le traitement des maladies cérébrales.
Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies, « BRAIN Initiative » (États-Unis)	Accélérer le développement et l'application de nouvelles technologies qui permettront aux chercheurs de produire des images dynamiques du cerveau montrant comment les différentes cellules cérébrales et les circuits neuronaux complexes interagissent à la vitesse de la pensée.	Ciblage, dans les manipulations thérapeutiques chez les humains, d'un type de cellule spécifique pour lequel la preuve de principe est établie ; appareils permettant l'enregistrement haute densité intracellulaire <i>in vivo</i> ; technologies hybrides qui améliorent notre capacité à suivre l'activité du cerveau humain de manière non invasive ; liens entre activité cérébrale et comportement ; outils d'analyse de données aidant à comprendre le fondement biologique des processus mentaux.

dans les jeux vidéo, la publicité, l'automobile ou la défense (Sriraman et Fernandez, 2015). En particulier, les interfaces cerveau-machine pourraient être largement utilisées dans des domaines tels que le divertissement, la défense, la finance, les interactions homme-machine, l'éducation et la domotique, les domaines les plus prometteurs étant les technologies d'assistance et les jeux. Les interfaces cerveau-machine sont également utilisées pour observer les réactions et les évaluations dans des domaines tels que le marketing et l'ergonomie.

Les sciences du cerveau et les neurotechnologies nécessitent d'importantes quantités de ressources

Les sciences du cerveau demeurent un domaine de recherche grand consommateur de ressources et économiquement risqué. Dans une large mesure, la réussite en matière de recherche fondamentale et d'innovation technologique est tributaire d'infrastructures de pointe et souvent très coûteuses, telles que de la puissance de calcul ou des technologies d'imagerie haute résolution. Des partenariats collaboratifs et des modèles d'investissement originaux offrent des moyens interdisciplinaires pragmatiques de mutualiser les risques et de renforcer l'engagement dans les neurosciences et la technologie. Les ressources étant limitées, il a fallu concevoir des approches plus intégratives et centralisées de la recherche et de la création d'« observatoires du cerveau » (Alivisatos et al., 2015). Ces centres forment l'environnement collaboratif adéquat pour concrétiser et partager le potentiel de technologies innovantes en matière de recherches sur le cerveau. Toutefois, des investissements importants et des mécanismes originaux de partage des risques et des bénéfices nécessitent de nouvelles « règles » sur la gouvernance de l'usage collectif et du brevetage des données et des neurotechnologies complexes.

Les neurotechnologies induisent des risques

Des paradigmes et technologies nouveaux visant à augmenter l'être humain pourraient bien se développer rapidement. Les innovations actuelles dans les sciences et technologies du cerveau donnent naissance à une quantité vertigineuse de nouvelles approches pour comprendre nos cerveaux et nos esprits. Des neurotechnologies invasives nécessitant de la neurochirurgie induisent le risque de potentiels changements physiologiques et fonctionnels non désirés dans le cerveau par suite de l'implantation d'électrodes ou de cellules souches, ou encore d'infections et de saignements liés à l'opération chirurgicale elle-même. Les neurotechnologies non invasives induisent moins de risques, mais leur utilisation à long terme pourrait avoir des conséquences négatives sur la structure et le fonctionnement du cerveau (Mak et Wolpaw, 2009 ; Wolpaw, 2010 ; Nuffield Council on Bioethics, 2013) et pourrait également être associée à des effets complexes non désirés sur l'humeur, la cognition et le comportement (Nijboer et al., 2013).

Les neurotechnologies soulèvent des questions sociétales importantes

Les neurotechnologies ont le potentiel de modifier certaines hypothèses et catégories centrales utilisées pour observer et comprendre les valeurs, normes et règles liées au statut moral de l'être humain, ce qui n'est pas sans susciter certaines réflexions éthiques, juridiques et sociales. Du fait que la distinction entre homme et machine se brouille, il est plus difficile d'évaluer les limites du corps humain, et des questions se posent concernant le libre arbitre et la responsabilité morale (Schermer, 2009). D'autres interrogations importantes se font jour, par exemple : qui bénéficie le plus de ces interventions consommant beaucoup de ressources et souvent très coûteuses ? Comment concilier au mieux les risques et responsabilités éthiques associés aux sciences du cerveau et aux applications d'augmentation de l'humain et les possibilités thérapeutiques ? Comment faire face aux tensions naturelles entre régimes de droits de propriété intellectuelle et incitations à une ouverture accrue des découvertes et au partage de données ?

Étant donné que les technologies novatrices liées au cerveau et leurs applications sont potentiellement sources de rupture, les parties prenantes devraient s'attacher à examiner les questions éthiques, juridiques et sociales assez tôt dans le processus de recherche et de développement. Il est nécessaire de mettre en balance les opportunités offertes par des « dispositifs cérébraux » originaux, par exemple la commande mentale d'un ordinateur, la possibilité de « lire dans les pensées » ou la stimulation cérébrale profonde, et les répercussions potentielles en termes de dignité humaine, de vie privée et d'équité. Les instances de réglementation sont mises à l'épreuve par les récentes évolutions intervenues dans les paradigmes technologiques, qui incluent, par exemple, une complexité grandissante des produits ou la fusion des sciences naturelles, médicales et sociales. À cet égard, la science réglementaire est souvent perçue comme étant en retard au regard des rapides évolutions qui s'opèrent dans les technologies et les pratiques. Dans ce contexte, il est nécessaire que les décideurs politiques, les instances de réglementation et le grand public comprennent mieux les défis et opportunités associés aux technologies émergentes et la convergence des technologies, ce qui leur assurera leur liberté cognitive (c'est-à-dire le droit à l'autodétermination mentale) et facilitera une prise de décision responsable en ce qui concerne, par exemple, l'élaboration d'une politique publique réglementaire, les financements publics et privés ou l'adoption de produits.

Nano/microsatellites

Il est fait une utilisation croissante de petits et de très petits satellites aux capacités toujours plus grandes. Les pouvoirs publics disposent ainsi d'un spectre de plus en plus large d'outils sophistiqués pour relever les grands défis dans des perspectives à la fois civiles et militaires.

Toujours plus petits, moins chers et plus rapides

Ces dernières années, on a observé le début d'une révolution dans la conception, la production et le déploiement de satellites. Les petits satellites, devenus très populaires, pèsent moins de 500 kilogrammes (kg) (un satellite de télécommunications ou météorologique classique placé en orbite géostationnaire, à une altitude d'environ 38 000 kilomètres (km), pèse plusieurs tonnes, tandis qu'un satellite de surveillance environnementale, tel que Jason 2, en orbite basse, à une altitude d'environ 500 km, pèse un peu plus de 500 kg). Les nano- et microsatellites pèsent entre 1 et 50 kg. Les CubeSats sont des satellites miniaturisés dont le modèle initial mesurait 10 cm × 10 cm × 10 cm et pesait 1 kg (également appelé « 1 U » pour « 1 unité »).

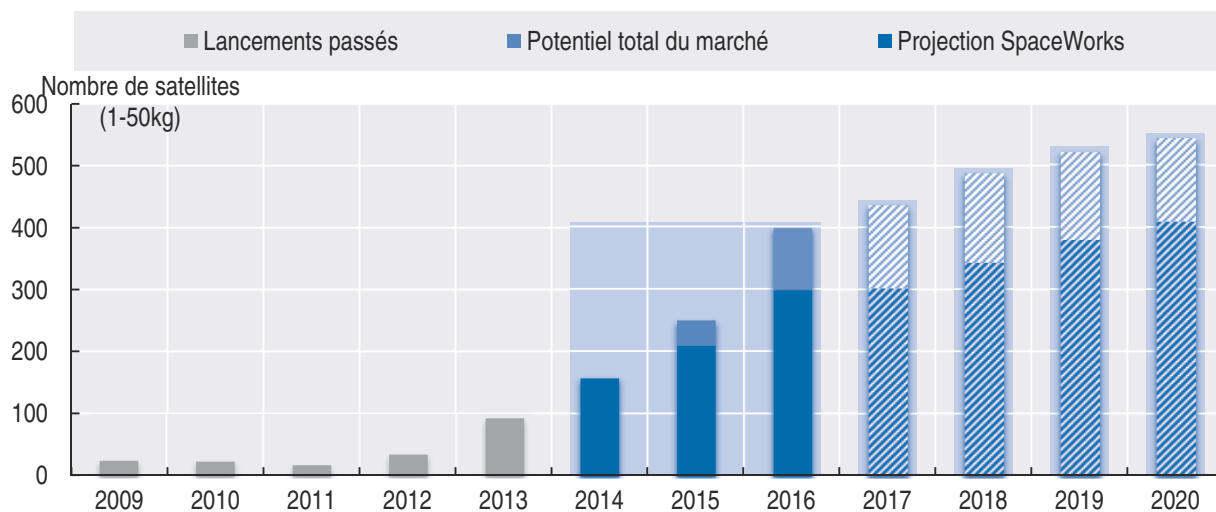
Les unités satellitaires peuvent être combinées afin de créer des CubeSats plus grands. Les petits satellites offrent de vastes opportunités sur le plan de la rapidité et de la flexibilité de construction : alors qu'il faut parfois plusieurs années voire plusieurs décennies pour que les grands satellites classiques passent de la planche à dessin aux missions opérationnelles, de très petits satellites peuvent être construits très rapidement. À titre d'exemple, il n'a fallu à Planet Labs que neuf jours pour construire deux CubeSats début 2015.

Plus le satellite est petit, moins il est cher à construire et à lancer. On peut construire un nano- ou un microsatellite pour 200 000 EUR à 300 000 EUR. Si les petits satellites deviennent bien plus abordables, c'est parce que désormais on utilise couramment des composants standard pour bâtir des plateformes satellites, ce qui favorise la production de masse. La majeure partie de l'électronique et des sous-systèmes indispensables à la construction d'un nanosatellite en interne peuvent être achetés en ligne (OCDE, 2014b). Le principal obstacle en termes de coûts reste l'accès à l'espace. Les petits satellites peuvent être lancés en qualité de charge utile secondaire pour moins de 100 000 EUR. Ils peuvent également être déployés à partir de la Station spatiale internationale, après y avoir été transportés dans un cargo de ravitaillement.

Depuis le lancement du premier CubeSat en 2002, le nombre de très petits satellites en fonctionnement a augmenté à un rythme remarquable. En 2014, 158 nano- et microsatellites ont été lancés, soit une hausse de 72 % par rapport à l'année précédente (US FAA, 2015). On anticipe qu'entre 2014 et 2020, il faudra prévoir le lancement de plus de 2 000 nano- et microsatellites à travers le monde (SpaceWorks, 2014) (graphique 2.5).


L'intérêt suscité par les petits satellites continue de croître à travers le monde

L'avènement des petits satellites ouvre une nouvelle ère d'applications à faible coût et fort bénéfique dans presque tous les champs de l'activité humaine. Les petits satellites s'avèrent utiles pour une vaste palette d'applications, allant de l'observation de la Terre aux télécommunications en passant par la recherche scientifique, la démonstration technologique et l'éducation, ou encore la défense. De plus en plus, un large éventail d'acteurs, dont des instituts de recherche, l'industrie et le secteur militaire, conçoivent des catégories de missions entièrement nouvelles (navigation, télécommunications ou télédétection), à des fins civiles ou militaires.

Graphique 2.5. **Historique des lancements de nano- et microsattelites et projections, 2009-20**

Note : L'ensemble de données « potentiel total du marché » est une combinaison d'intentions de lancement annoncées publiquement, d'études de marché et d'évaluations qualitatives/quantitatives tenant compte des activités et programmes futurs. La base de données de projections de Spaceworks implique des jugements de valeur des experts de Spaceworks quant aux résultats potentiels du marché.

Source : SpaceWorks, 2014, www.sei.aero/eng/papers/uploads/archive/SpaceWorks_Nano_Microsatellite_Market_Assessment_January_2014.pdf.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433285>

Création de nouveaux projets commerciaux dans le secteur spatial : L'utilisation croissante de composants standard, par opposition aux produits « qualifiés pour l'usage spatial », plus onéreux, crée un nouveau marché mondial pour les systèmes et services spatiaux. Les développeurs se tournent de plus en plus vers des architectures de systèmes complexes, permettant aux petits satellites d'interagir en constellations. Ainsi, en 2013, l'entreprise Skybox Imaging a lancé son premier satellite d'imagerie haute résolution s'inscrivant dans le cadre d'une constellation planifiée de 24 petits satellites visant à fournir une imagerie satellitaire sans cesse actualisée et bon marché. De même, début 2014, Planet Labs a lancé la constellation Flock 1, constituée de 28 nanosatellites. Certains experts établissent une analogie avec les macroordinateurs des années 70, qui ont cédé la place à des réseaux de petits ordinateurs connectés via l'internet.

Repousser les frontières des connaissances : Les CubeSats sont très populaires dans les universités comme démonstrateurs technologiques. Ils font figure de plateformes satellites éducatives bon marché et sont peu à peu devenus la norme pour la plupart des satellites universitaires. Au printemps 2014, près de 100 universités à travers le monde procédaient au développement de CubeSats (OCDE, 2014b). Sur le plan éducatif, les petits satellites universitaires aident les étudiants à mettre en pratique beaucoup plus rapidement leurs compétences scientifiques et techniques.

Observation des terres et des océans : Bien que les grands satellites en orbite géostationnaire restent des piliers clés des infrastructures météorologiques et de télécommunications, les petits satellites utilisés au sein de grandes constellations en orbite plus basse portent la promesse d'améliorations révolutionnaires, par exemple pour ce qui concerne l'observation de la Terre. Les microsattelites disposent des capacités pour une observation 24 h sur 24. L'observation de la santé des océans et des eaux intérieures constitue un bon exemple. Les constellations satellitaires peuvent être utilisées pour opérer un suivi de la pêche illégale et pour renforcer la sensibilisation aux milieux marins afin de lutter contre les activités illégales. De même, sur terre, ces constellations pourraient

contribuer à surveiller les récoltes, à améliorer la productivité agricole et à observer l'évolution de la déforestation.

Ouvrir l'espace à tout le monde : Les petits satellites sont devenus très attrayants ces cinq dernières années, en raison de l'abaissement des coûts de développement et du raccourcissement des délais de production. Ils suscitent donc un grand intérêt à travers le monde, et beaucoup de pays financent leur premier programme spatial grâce au développement de petits satellites. Près de 30 pays ont développé des CubeSats jusqu'à présent, plus de la moitié de ces satellites ayant été déployés par les États-Unis, suivis par l'Europe, le Japon, le Canada et plusieurs pays d'Amérique du Sud (OCDE, 2014b). Au cours de la dernière décennie, le lanceur ukrainien Dnepr a mis en orbite 29 % des satellites de 11 à 50 kg, le deuxième plus gros lanceur étant le Polar Satellite Launch Vehicle indien.

La poursuite de l'expansion du secteur des petits satellites se heurte à plusieurs difficultés

Un sempiternel arbitrage entre taille et fonctionnalité : Plus le satellite est petit, moins il peut transporter d'instruments, et plus son espérance de vie est courte, compte tenu de la plus faible quantité d'énergie embarquée. Les grands satellites ont toujours un rôle majeur à jouer, surtout pour mener des missions commerciales et gouvernementales importantes, du fait qu'ils peuvent transporter davantage d'instruments et qu'ils ont une durée de vie plus longue. Toutefois, les avancées récentes, aussi bien dans la miniaturisation que dans les technologies d'intégration satellite, ont nettement amoindri la difficulté de cet arbitrage (US NASA, 2014).

Des risques non négligeables : De plus en plus, les nano- et microsattelites sont lancés en grappes importantes, et un seul échec (au moment du lancement ou du déploiement) peut induire des pertes substantielles. L'échec du lancement, en 2014, de la fusée Antares a conduit à la perte de plus de 30 satellites (SpaceWorks, 2015).

Débris et collisions – une menace grandissante pour l'environnement : La principale préoccupation environnementale tient au fait que la rapide multiplication des petits satellites déployés va augmenter le risque de collision sur certaines orbites déjà surchargées, créant un cercle vicieux, puisque davantage de débris génèrent un risque toujours plus grand de nouvelle collision. D'après les lignes directrices internationales relatives à la réduction des débris spatiaux, la plupart des satellites devraient soit être envoyés sur une orbite de rebut (« orbite cimetière ») soit rentrer dans l'atmosphère après leur fin de vie opérationnelle. Toutefois, de par leur construction, les très petits satellites ne disposent pas de l'énergie embarquée suffisante pour des manœuvres de désorbitation.

Quelles sont les implications en matière de politique STI ?

Les pouvoirs publics pourraient soutenir le développement de nano- et microsattelites en encourageant leur utilisation à des fins éducatives dans les universités et les instituts de recherche, en mettant en place des conditions plus favorables pour les start-ups spécialisées et en stimulant les synergies dans les pôles d'entreprises dont l'activité est liée aux satellites.

À mesure que les usages des nano- et microsattelites se diversifient, le volume de données générées à des fins publiques et privées augmente. Les décideurs publics devraient créer les cadres réglementaires et environnements d'activité adéquats pour faire en sorte que cette explosion de données puisse être exploitée au profit du plus grand nombre.

Nanomatériaux

Les nanomatériaux présentent des propriétés optiques, magnétiques et électriques uniques exploitables dans de nombreux domaines, allant des soins de santé aux technologies de l'énergie. Cependant, des limitations techniques et les incertitudes concernant leur toxicité pour la population et l'environnement continuent de freiner leur application à grande échelle.

Les nanomatériaux présentent des propriétés uniques

Les nanomatériaux sont définis comme les matériaux ayant une dimension extérieure à la nano-échelle (10^{-9} mètre) ou ayant une structure interne ou une structure de surface à la nano-échelle, la nano-échelle étant l'intervalle allant approximativement de 1 nm à 100 nm (ISO, 2012). Les nanomatériaux peuvent être naturels, incidents ou manufacturés/d'ingénierie. Il peut s'agir de produits à base de carbone ; de métaux, d'alliages et de semiconducteurs nanostructurés ; de nanoparticules céramiques ; de polymères ; de nanocomposites ; et de matériaux de frittage ou biosourcés (VDI Technologiezentrum GmbH, 2015). Dans la famille des produits à base de carbone, les nanotubes et le graphène présentent un intérêt particulier pour l'industrie et la recherche. Parmi les autres matériaux qui suscitent actuellement le plus d'attention figurent le dioxyde de nanotitane, l'oxyde de nanozinc, le graphite, les aérogels et le nanoargent (CE, 2014).

Les nanomatériaux devraient avoir une influence considérable sur les applications tant de recherche que commerciales dans de nombreux secteurs industriels. Ils constituent un progrès révolutionnaire car on peut désormais contrôler la matière à une échelle à laquelle la forme et la taille des assemblages d'atomes déterminent les propriétés et les fonctions de tous les matériaux et systèmes, y compris les organismes vivants. De plus, quand on exploite les effets quantiques, des propriétés inédites, notamment optiques, magnétiques ou électriques, émergent à cette échelle. Cela est dû au fait que la proportion d'atomes de surface par rapport aux atomes de volume est beaucoup plus élevée dans les nanomatériaux que dans les matériaux macroscopiques. Le comportement des nanomatériaux est donc déterminé principalement par la chimie de surface. Cette part relative plus importante de la surface augmente l'énergie de surface des particules, donc abaisse le point de fusion et accroît la réactivité chimique.

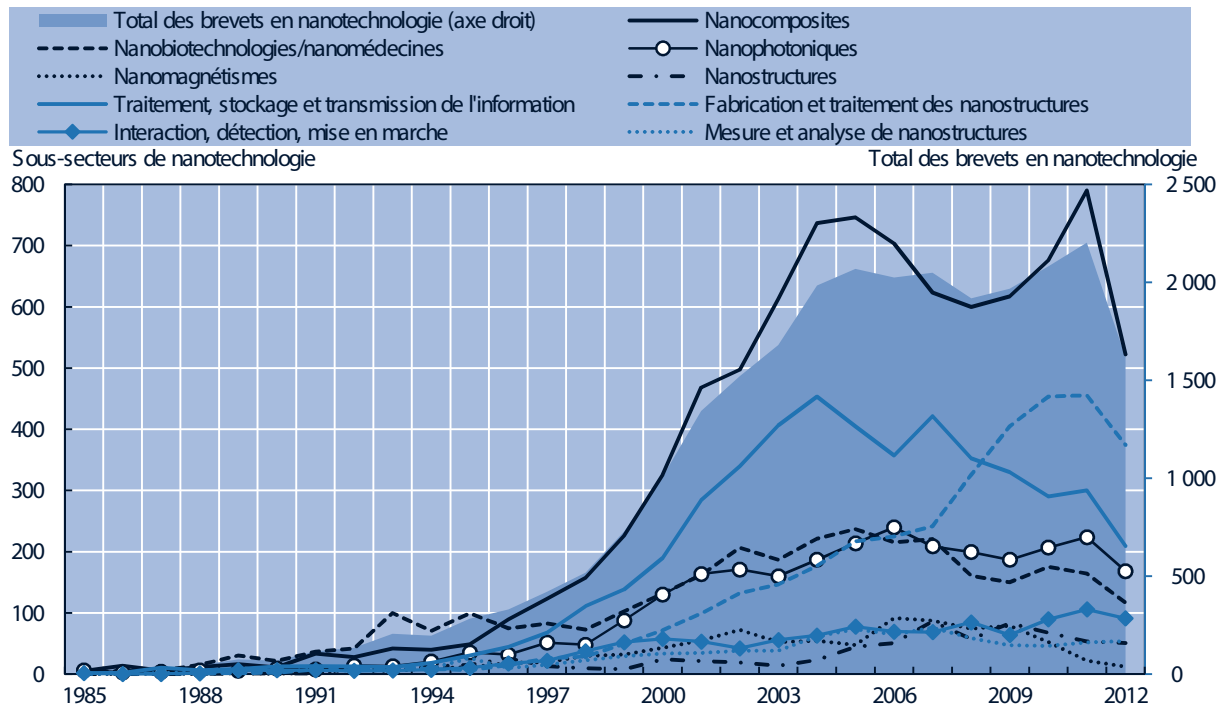
Les domaines d'application des nanomatériaux devraient être multiples

Le marché des nanomatériaux est actuellement estimé à environ 20 milliards EUR (CE, 2014) et l'éventail des applications commercialement viables devrait s'élargir au cours des prochaines années. Bien qu'elles soient commercialisées en petites quantités en valeur absolue, les applications de base telles que le noir de carbone et la silice amorphe, parvenues à maturité, représentent déjà des volumes importants du marché des nanomatériaux. Pour l'heure, les domaines d'application recouvrent la médecine, l'imagerie, l'énergie, le stockage de l'hydrogène, la catalyse, la construction légère et la protection contre les ultraviolets (VDI Technologiezentrum GmbH, 2015 ; Tsuzuki, 2009). Les secteurs où les applications totalisent les plus gros volumes sont généralement ceux où les nanomatériaux ont remplacé un matériau traditionnel, de taille de particule plus grande ou moins contrôlable. Les applications qu'on retrouve dans ces secteurs sont favorisées par les améliorations de performance que permet le contrôle des matériaux à l'échelle nanométrique ainsi que par l'efficacité d'utilisation des ressources que permet la réduction de la taille des particules. La

diversité des applications transparaît à travers le fait que les brevets relatifs aux nanotechnologies sont répartis dans pas moins de dix sous-domaines (correspondant souvent à un domaine d'application) (graphique 2.6).


Graphique 2.6. **Brevets de nanotechnologie par domaine et total, 1985-2012**

Nombre de demandes de brevet déposées en vertu du Traité de coopération en matière de brevets (PCT)



Note : Les données se rapportent aux demandes de brevet déposées en vertu du Traité de coopération en matière de brevets (PCT), par date de priorité et lieu de résidence de l'inventeur, en comptage fractionnaire.

Source : D'après STI Micro-data Lab: Intellectual Property Database (base de données sur la propriété intellectuelle, en anglais), <http://oe.cd/ipstats> ; données téléchargées en juillet 2016.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433297>

L'un des domaines les plus prometteurs pour l'application de nanomatériaux avancés (c'est-à-dire de nanomatériaux de composition et de forme complexes, conçus pour présenter des propriétés spécifiques) est celui de la médecine, qui totalise aujourd'hui la part la plus élevée de nanoproduits avancés appliqués (Vance et al., 2015). Les nanomatériaux devraient permettre d'améliorer les diagnostics de plusieurs façons : par exemple, la sensibilité accrue des puces de diagnostic (laboratoires sur puce) rendra possible un diagnostic plus précoce du cancer ; les marqueurs fluorescents robustes à base de nanomatériaux augmenteront sans doute la fiabilité des diagnostics *in vitro* (VDI Technologiezentrum GmbH, 2015) ; et les nanoparticules d'or marquées favoriseront le développement de l'imagerie moléculaire et peuvent aussi être utilisées pour cribler rapidement des médicaments anti-cancer candidats avec moins de matériel spécialisé que les méthodes traditionnelles (University of Massachusetts à Amherst, 2014). Enfin, les nanomatériaux devraient aider à améliorer les traitements médicaux, par exemple la nanocellulose biocompatible pourrait servir à traiter les brûlures.

Hors du domaine médical, les nanomatériaux se généraliseront dans les produits de la vie quotidienne. Par exemple, les nanofibres ont permis la mise au point de textiles résistant à l'eau, au froissement et aux taches ou, si on le souhaite, avec une perméabilité sélective. En

associant ces nanofibres aux textiles intelligents, on pourrait concevoir des tissus intelligents/textiles fonctionnels (VDI Technologiezentrum GmbH, 2015 ; CE, 2014) utilisables également dans des applications militaires ou d'intervention en cas d'urgence pour mieux garantir la sécurité des personnes. Les nanomatériaux pourront aussi probablement faciliter la conception de matériaux de construction fonctionnels tels que des bétons autonettoyants. Dans le secteur de l'énergie et de l'environnement, des nanocristaux de silicium entrent déjà dans la fabrication des cellules photovoltaïques, et on s'attend à ce que des nanopolymères intelligents soient utilisés pour la production d'emballages biodégradables et d'hydrogels (OCDE, 2011). Par ailleurs, les nanomatériaux sont à l'origine de diverses innovations de procédé. Par exemple, les encres fonctionnelles ont transformé de nombreux procédés d'impression, qu'il s'agisse de l'impression jet d'encre de haute précision utilisée pour l'électronique imprimée, de l'impression à grande échelle de matériaux stratifiés sans séchage entre deux dépôts de couche, ou encore de l'impression rotative utilisée pour la production à haut débit de cellules photovoltaïques de troisième génération. Le secteur des emballages alimentaires, quant à lui, utilise déjà dans les bouteilles en PET des nanomatériaux absorbants dans l'infrarouge spécialement conçus, afin de réduire la quantité d'énergie à apporter et le temps de cuisson pendant la fabrication.

Dans le secteur privé, la recherche sur les nanomatériaux est dominée par les entreprises multinationales

La recherche industrielle sur les nanomatériaux est dominée par les entreprises multinationales de divers secteurs. Par exemple, l'un des acteurs majeurs des nanotechnologies appliquées à la chimie, des matériaux nanostructurés, des nanoparticules et de la sûreté des nanomatériaux est le groupe BASF, leader mondial de la recherche sur les réseaux organométalliques appliqués aux industries de l'énergie et de l'environnement (BASF, 2015). De son côté, L'Oréal, qui est l'un des détenteurs du plus grand nombre de brevets relatifs aux nanotechnologies aux États-Unis, utilise des nanocapsules polymères pour acheminer les principes actifs dans les couches les plus profondes de l'épiderme (Nanowerk, 2015). Outre les multinationales, un nombre croissant de start-ups axées sur les technologies exploitent les nanomatériaux dans des domaines niches. Par exemple, l'une des applications prometteuses des nanomatériaux est le traitement des eaux usées par les particuliers dans les parties moins développées du monde. Une start-up a ainsi mis au point une membrane rentable à base de nanoparticules de dioxyde de titane qui filtre l'eau en éliminant les poussières et les bactéries (Nanowerk, 2014). Une autre a conçu un prototype de filtre à eau *open source* imprimable en 3D, fabriqué avec du charbon actif et une nanomembrane, qui peut être intégré au bouchon d'une bouteille d'eau (Faircap, 2014).

Des problèmes techniques et environnementaux non résolus limitent l'application des nanomatériaux

La recherche et le développement des nanomatériaux, ainsi que leur commercialisation, progressent beaucoup moins vite qu'on ne l'avait anticipé dans les années 80, quand on voyait dans les nanotechnologies « la prochaine révolution industrielle ». La raison de cette lente évolution est double. Premièrement, le coût de l'instrumentation de R-D nécessaire à la recherche sur les nanomatériaux avancés bride les activités de nombreux laboratoires universitaires ainsi que l'innovation dans les petites entreprises. Deuxièmement, la production à l'échelle industrielle de nanomatériaux avancés est souvent retardée car on comprend encore mal les phénomènes physiques et chimiques à l'échelle nanométrique et

on ne sait pas contrôler à cette échelle les paramètres de production à haut rendement. Ces limitations techniques continuent d'entraver le développement des applications industrielles rentables à grande échelle des nanomatériaux.

Des questions se posent également concernant les dangers imprévus (effets toxiques) pour la population et l'environnement. Si la seule taille des particules ne suffit pas à expliquer la toxicité (SCENIHR, 2009), il n'en demeure pas moins qu'il pourrait être nécessaire de réglementer l'emploi des nanomatériaux dans certains environnements (OCDE, 2015e). Par exemple, du fait de leur petite taille, les nanoparticules peuvent traverser les membranes des cellules (absorption cutanée, ingestion, inhalation) et se déplacer jusqu'à des parties du corps que des particules plus grosses ne peuvent pas physiquement atteindre (Suran, 2014). Le même risque doit être envisagé dans le cas de l'utilisation de nanoparticules en agriculture (Das, Sen et Debnath, 2015). L'évaluation des risques pâtit encore d'un manque considérable de données sur les effets de la présence de nanomatériaux dans l'environnement, d'où la nécessité de mener des recherches supplémentaires (CE, 2014 ; OCDE, 2011 ; Fahlman, 2011). Enfin, les incertitudes persistantes qui entourent les exigences réglementaires ont un impact négatif sur la R-D future et la commercialisation de nombreuses applications des nanomatériaux potentiellement avantageuses.

Fabrication additive

L'ajout progressif de matière pour qu'un produit prenne forme constitue une approche sans précédent de la fabrication, qui appelle de nouveaux modèles d'activité et suppose des changements substantiels dans les industries existantes. Toutefois, cette technologie doit surmonter plusieurs défis, à la fois techniques et réglementaires, pour pouvoir imprégner les processus industriels à grande échelle.

Un nouveau paradigme de fabrication voit le jour

Actuellement, la fabrication est essentiellement soustractive (c'est-à-dire que les produits sont fabriqués en partant d'un matériau dont on enlève l'excédent), ou par formage (dans ce cas, on force le matériau à prendre une forme donnée au moyen d'un outil de formage). La fabrication additive, également appelée impression 3D, englobe différentes techniques permettant de fabriquer des produits par empilement de couches successives de matériau, souvent à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (OCDE, 2015c ; VDI Technologiezentrum GmbH, 2015). Parmi les technologies de fabrication additive les plus courantes, on trouve l'impression par dépôt de matière fondue (*fused deposition modeling*), la stéréolithographie, le *digital light processing* et le frittage sélectif par laser.

Les processus d'impression 3D sont utilisés pour fabriquer des modèles, des gabarits ou des pièces d'outillage à partir de plastique, de métal, de céramique ou de verre. On peut opérer une distinction entre trois grandes applications : le prototypage rapide est utilisé dans l'industrie en R-D pour la production de modèles et prototypes ; l'outillage rapide intervient à des étapes ultérieures du développement de produit ; enfin, la fabrication rapide désigne la production de pièces finies, utilisant directement les techniques de fabrication par superposition de strates (Hague et Reeves, 2000 ; Wohlers Associates, 2014).

Grâce à la fabrication additive, les capacités des processus de production vont vraisemblablement augmenter

Par le passé, la fabrication additive, qui trouve son origine dans la recherche pour l'industrie manufacturière dans les années 80, était essentiellement utilisée pour créer des

prototypes de visualisation, ce qui pouvait écourter le stade de conception de produit. Cet usage reste important aujourd'hui, et le prototypage rapide est employé par les ingénieurs, les architectes, les responsables de conception et dans les professions médicales, ainsi que dans l'éducation et la recherche. Plus récemment, les matériaux, la précision et la qualité globale du produit final s'étant tous améliorés, le champ d'application de l'impression 3D s'est élargi. Aujourd'hui, les prototypes réalisés par impression 3D pour vérifier la forme et l'assemblage sont monnaie courante et ils devraient devenir encore moins chers et plus rapides à produire au cours de la prochaine décennie (Gibson, Rosen et Stucker, 2015 ; Bechtold, 2015). Au nombre des récentes avancées technologiques figurent l'amélioration des performances de l'équipement de production et l'élargissement de la palette de matières premières utilisées. Les ingénieurs se servent d'un nombre croissant de matériaux composites (comme du plastique renforcé de fibres) et de matériaux à gradient de propriétés (dû à une variation de la microstructure selon un gradient spécifique).

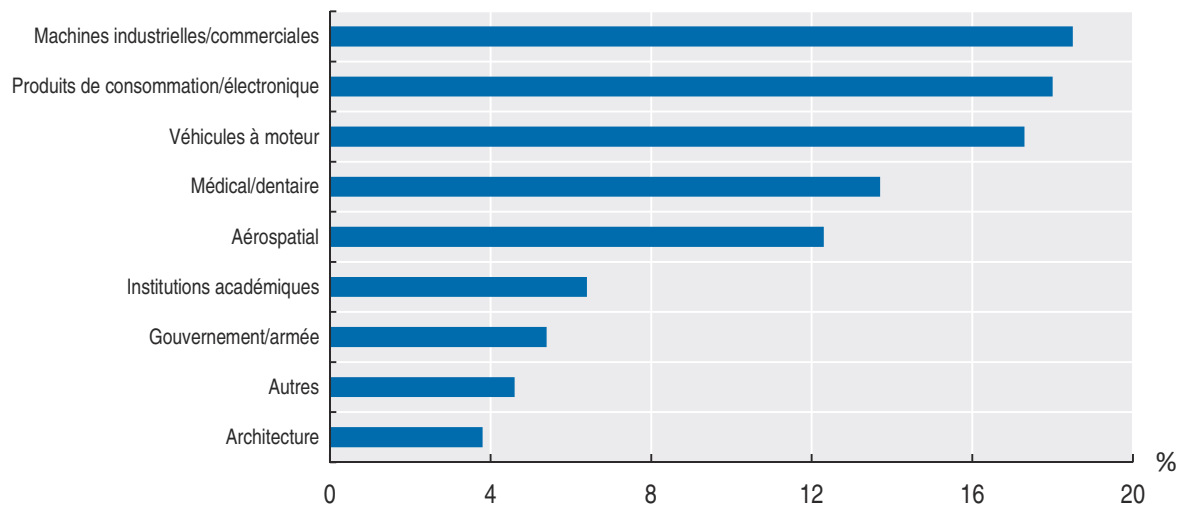
On estime que le marché mondial de la fabrication additive affichera une croissance annuelle cumulée d'environ 20 % entre 2014 et 2020 (MarketsandMarkets, 2014). Selon Wohlers Associates (2014), les ventes de systèmes et services de fabrication additive se chiffreront à 21 milliards USD en 2020. À mesure que les processus d'impression 3D continuent de gagner en maturité et de croître, ils sont susceptibles de répondre à beaucoup de besoins importants sur les marchés industriel, médical et de consommation. En règle générale, les technologies de fabrication additive sont rentables lorsque l'on a besoin de petites quantités de produits hautement complexes et de plus en plus personnalisés (Wohlers Associates, 2014). Elles permettent beaucoup plus de flexibilité dans la conception et laissent une certaine latitude pour la personnalisation d'échantillons et de composants très complexes.

Wohlers Associates mène une enquête annuelle auprès des fabricants de systèmes de fabrication additive et des prestataires de services. Pour l'édition de 2014, 29 fabricants de systèmes de fabrication additive industrielle et 82 prestataires de services à travers le monde ont répondu à l'enquête, représentant plus de 100 000 utilisateurs et clients. Dans cette enquête, il était demandé à chaque entreprise d'indiquer quels secteurs elle desservait et la proportion approximative de chiffre d'affaires attribuable à chacun ; le graphique 2.7 en présente les résultats. Les entreprises interrogées devaient également indiquer pour quel usage les clients se servaient de leur matériel d'impression. Les résultats montrent que les entreprises utilisent la technologie de fabrication additive pour produire des pièces fonctionnelles plus que pour quoi que ce soit d'autre (graphique 2.8).


La fabrication additive tirera l'innovation dans les domaines de la santé, des médicaments et de la biotechnologie

Les technologies d'impression 3D devraient donner le jour à de nouveaux produits dans les domaines de la santé, des médicaments et de la biotechnologie. Dans le domaine médical, elles serviront majoritairement à des applications dentaires. Les prothèses dentaires, prothèses de hanche et prothèses de mains imprimées (bio-impression ou bio-ingénierie) ainsi que les prototypes d'exosquelette sont d'ores et déjà utilisés. Les imprimantes à ADN et l'impression de parties du corps et d'organes à partir des cellules du patient lui-même sont en cours de développement. Non seulement les systèmes biologiques bio-imprimés ressemblent aux systèmes humains d'un point de vue génétique, mais ils réagissent également au stress extérieur comme s'il s'agissait d'organes vivants (Kuusi et Vasamo, 2014). Les experts en bio-ingénierie estiment que les tests sur les animaux pourraient être remplacés par l'utilisation de cellules humaines réalisées par impression 3D

Graphique 2.7. **Chiffre d'affaires de la fabrication additive dans l'industrie mondiale par secteur**
En pourcentage du chiffre d'affaires total

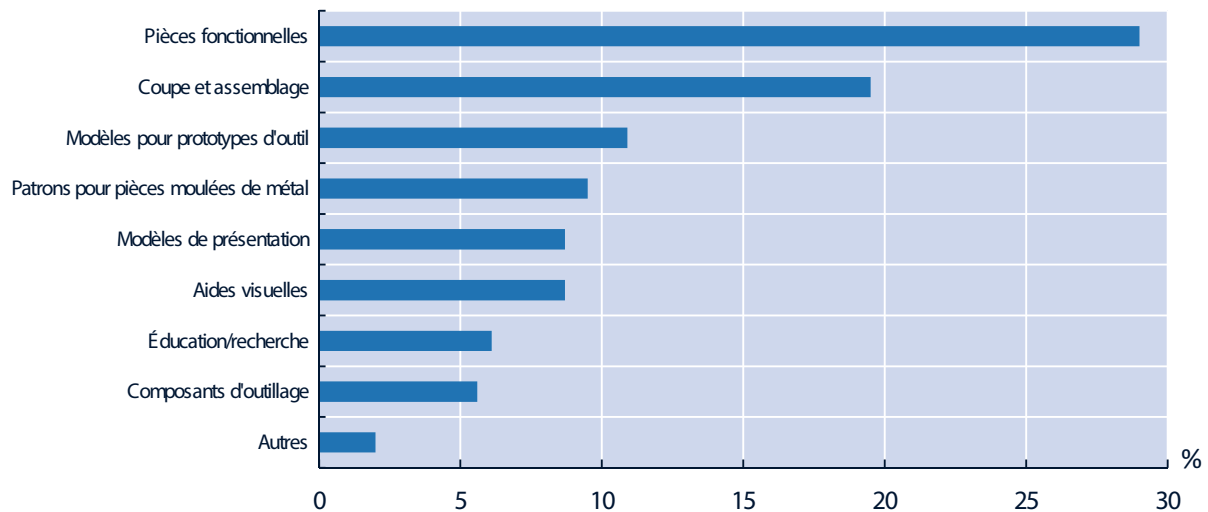


Source : Wohlers Associates (2014), *Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*.


StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433301>

Graphique 2.8. **À quoi sert la fabrication additive pour les entreprises ?**

En pourcentage du total des utilisations



Source : Wohlers Associates (2014), *Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433317>

d'ici 2018 (Faulkner-Jones, 2014). À l'avenir, les personnes suivant un régime spécifique pourraient imprimer leurs propres aliments fortifiés ou fonctionnels. La viande bio-imprimée réalisée à partir de cellules vivantes pourrait également constituer un futur champ d'application (VDI Technologiezentrum GmbH, 2015).

La fabrication additive sera également bénéfique pour un éventail d'industries

Le travail du métal à partir de processus d'impression 3D, tels que la fusion sélective par laser ou la fusion par faisceau d'électrons, est courant dans l'automobile, la défense et

l'aérospatial. De nombreux composants ont déjà été produits pour des applications spatiales ; et leur nombre ne cessera de croître, simultanément à leur complexité. De nouvelles recherches sur les alliages métalliques peuvent avoir des répercussions à long terme sur l'exploration spatiale, puisque les futures générations de spationautes pourraient être à même d'imprimer l'équipement dont ils ont besoin à partir de matériaux permettant une masse embarquée moins importante (OCDE, 2014b). S'agissant des technologies relatives à l'énergie, la fabrication additive est de plus en plus utilisée pour l'entretien et la maintenance de pièces de rechange très complexes (VDI Technologiezentrum GmbH, 2015).

L'accélération du passage au numérique et les préoccupations environnementales influenceront la demande de technologies de fabrication additive

Le perfectionnement des technologies numériques au service de l'impression 3D permettra une plus grande intégration et une efficacité accrue des processus de conception, de fabrication et d'acheminement du produit. Étant donné que l'impression 3D va favoriser le transport au format numérique, ainsi que le stockage, la création et la réplique de produits, elle a le potentiel pour changer les modalités de travail et déclencher une révolution de la production. Les entreprises vont vendre des études techniques, et non plus des produits physiques. Lorsque l'on passera une commande, il suffira de télécharger le fichier résultant qui déclenchera les processus automatisés de fabrication et d'acheminement, associant éventuellement plusieurs entreprises qui pourront se coordonner facilement (OCDE, 2015c).

L'impression 3D pourrait également avoir une empreinte écologique moins grande que les processus de fabrication et les chaînes d'approvisionnement traditionnels, grâce à une production de déchets moins importante. La fabrication directe de produits à partir des technologies d'impression peut diminuer le nombre d'étapes nécessaires à la production, au transport, à l'assemblage et à la distribution du produit, réduisant la quantité de déchets de matériaux par rapport aux méthodes de fabrication soustractives (OCDE, 2015c). Cependant, les imprimantes qui utilisent des polymères en poudre ou fondus laissent certaines quantités de matière première sur le plateau d'impression, lesquelles ne sont généralement pas réutilisées (Olson, 2013). Le plastique le plus couramment employé pour l'impression à domicile, l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), est recyclable. D'autres plastiques, les bioplastiques (comme l'acide polylactique [PLA]), sont biodégradables sans que cela ne nuise à leurs propriétés thermiques, mécaniques et de traitement (OCDE, 2013b). Toutefois, une étude récente a montré que les taux d'émission de nanoparticules par les imprimantes utilisant l'ABS et le PLA sont particulièrement élevés et pourraient induire des risques pour la santé (Stephens et al., 2013). Les informations relatives aux effets que les nouveaux matériaux, comme les fines poudres métalliques, utilisées pour le frittage sélectif par laser, ont sur la santé et l'environnement sont encore rares. De même, il faudra s'intéresser davantage aux recherches sur le contenu énergétique des matériaux, leur empreinte carbone et la tendance à imprimer un trop grand nombre d'objets en raison de la simplicité de la technologie et de son omniprésence (Olson, 2013).

Plusieurs risques et obstacles empêchent la fabrication additive de se répandre

L'éventail de matériaux employés en impression 3D reste limité, et ils ne sont compatibles qu'avec certaines méthodes et certains appareils d'impression. Souvent, la qualité et le détail de la surface ne sont pas suffisants pour une utilisation finale et requièrent un post-traitement onéreux. Les outils d'impression classiques travaillent

lentement, et il est difficile de surveiller la qualité pendant le processus d'impression (bien qu'aient été développées les premières têtes d'impression dotées de capteurs intégrés).

À mesure que l'impression 3D devient plus accessible, les questions juridiques et réglementaires, portant sur la protection des données, la responsabilité du fait des produits défectueux et la propriété intellectuelle vont passer au premier plan. Les industries, les inventeurs et les propriétaires de marque sont déjà confrontés à des violations substantielles de la propriété intellectuelle dans les secteurs de l'impression par les particuliers et *open source* (Vogel, 2013). L'impression 3D pourrait ouvrir la porte à du piratage décentralisé, généralisé, analogue à celui qui a accompagné le passage de la musique, des livres et des films au numérique. Le contrôle de l'application des droits de propriété est coûteux (frais de procédure, tensions sociales), opaque et souvent arbitraire. Les instances de réglementation pourraient imposer certaines restrictions au niveau de la conception technique des imprimantes afin d'empêcher toute violation, mais un tel choix pourrait ralentir l'innovation. L'application de taxes aux appareils et matières premières nuirait aux usages légitimes des imprimantes 3D (Depoorter, 2013). Actuellement, des recherches portent sur les techniques de tatouage numérique visant à empêcher le piratage.

Le prix des appareils d'impression constitue un autre obstacle à surmonter. Ces dernières années, les imprimantes 3D pour particuliers apparaissent sur le marché des produits électroniques grand public à des prix très abordables (moins de 1 000 USD), quand, dans le même temps, des imprimantes 3D plus sophistiquées (permettant, par exemple, le travail du métal) se vendent souvent plus de 1 million USD (CE, 2014 ; MGI, 2013). Dans les prochaines années, les coûts devraient baisser rapidement du fait de la croissance des volumes de production (MGI, 2013). Il reste difficile de prévoir précisément à quel rythme cette technologie sera déployée, mais in fine, elle se diffusera à grande échelle dans les processus de production d'un nombre croissant de produits différents (OCDE, 2015c).

Technologies avancées de stockage de l'énergie

Une technologie de stockage de l'énergie peut être définie comme un système à même d'absorber de l'énergie et de la stocker pendant un certain temps avant de la restituer à la demande pour fournir de l'énergie ou pour alimenter des services. Des innovations radicales sont nécessaires dans ce domaine pour optimiser les performances des systèmes énergétiques et faciliter l'intégration des sources d'énergie renouvelables.

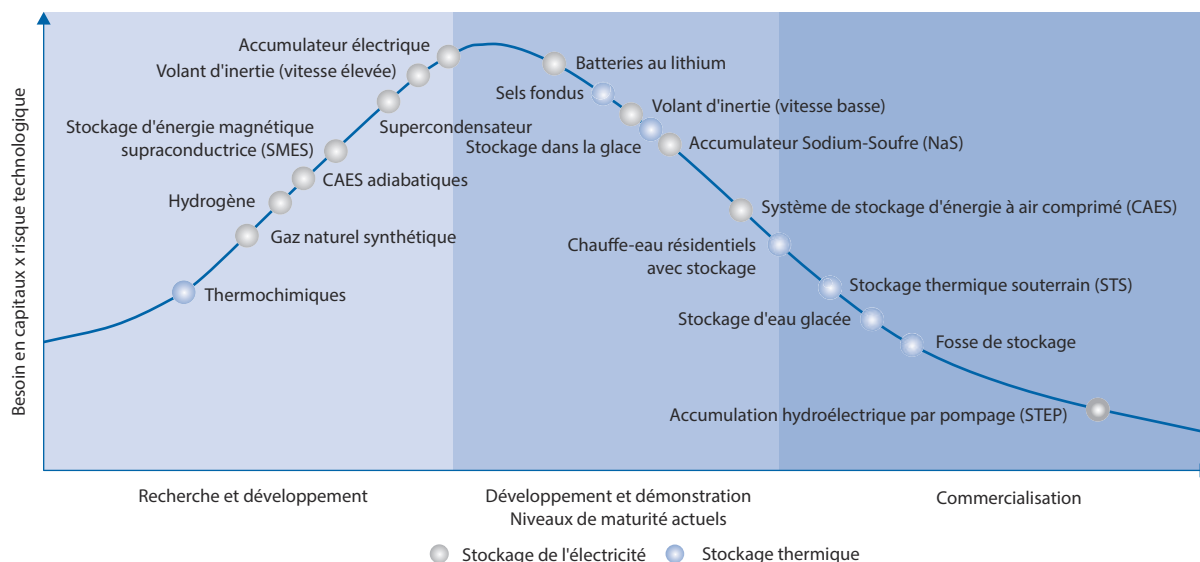
Les technologies de stockage de l'énergie sont indispensables pour compenser le décalage temporel et géographique entre l'offre et la demande

Les formes d'énergie renouvelables, notamment la lumière du soleil, le vent et les vagues, sont intermittentes et pas toujours prévisibles (Carrington, 2016). Comme elles sont la source d'une part croissante de l'électricité injectée sur le réseau, il importe de plus en plus d'investir dans des technologies de stockage permettant d'ajuster l'offre à la demande. Ces technologies de stockage peuvent être électriques, (électro)chimiques, thermiques ou mécaniques. Elles peuvent être déployées à grande ou à petite échelle, de manière centralisée ou décentralisée, en tout point du système énergétique. Les dispositifs de stockage à grande échelle destinés au réseau électrique sont généralement utilisés pour compenser les fluctuations de l'onde de tension, tandis que les systèmes de batterie, du fait de leur capacité de stockage limitée, de leurs longs temps de charge et de leur propension à se décharger, conviennent davantage à un ajustement décentralisé (VDI Technologiezentrum GmbH, 2015 ; MGI, 2013).

Leur potentiel économique est considérable, tout comme la portée des opportunités commerciales

Depuis dix ans, le déploiement de batteries et de stockages thermiques à grande échelle est en forte progression (AIE, 2015). Le secteur des batteries, en particulier, connaît une accélération technologique majeure, comme le montrent les données sur les « rafales » de brevets (OCDE, 2014a ; Dernis, Squicciarini et de Pinho, 2015). Diverses autres technologies de stockage de l'énergie, en revanche, en sont toujours aux premiers stades de développement, et notamment les batteries à cations multivalents, les volants d'inertie à haute vitesse, les batteries lithium-soufre et les systèmes de stockage d'énergie magnétique dans un enroulement supraconducteur (Crabtree, 2015 ; AIE, 2014) (graphique 2.9).

Graphique 2.9. Cycle de maturité des technologies de stockage d'énergie



Source : IEA (2014), « Energy storage », IEA Technology Roadmaps, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264211872-en>.

La viabilité économique du stockage de l'énergie dépendra probablement des progrès futurs des technologies de batterie à petite et moyenne échelle et des technologies à grande échelle centralisées et décentralisées destinées au réseau électrique. Les batteries avancées, notamment, pourraient remplacer le moteur à combustion interne des voitures particulières et soutenir la transition vers les habitations et les bureaux connectés. D'une façon générale, les nouvelles technologies de stockage de l'énergie pourraient modifier les modes d'utilisation – où on l'utilise, quand et comment – de l'énergie.

Les applications à petite échelle – mobilité électrique et électronique portable de consommation – seront des déterminants importants de la demande

Les technologies des batteries reposent toujours principalement sur le principe du stockage électrochimique de l'énergie. Elles recouvrent les batteries plomb-acide, les batteries au nickel, les batteries à flux redox à haute température et les batteries lithium-ion (environ 250 watt-heures par kilogramme). Modulables à différentes échelles et efficaces, elles peuvent servir à des applications de courte ou de moyenne durée (AIE, 2014). La majorité des appareils électroniques portables de consommation et des voitures particulières hybrides ou électriques sont alimentés par des batteries lithium-ion, dont le prix ne cesse de baisser et la

performance d'augmenter depuis quelques années. De fait, ce sont les batteries les plus volumineuses qui montrent la voie : par exemple, le prix du système de batterie lithium-ion d'une voiture électrique a chuté de 40 % entre 2009 et 2013 (MGI, 2013) tandis que les ventes de voitures électriques sont passées de quasiment aucune en circulation en 2009 à 665 000 en 2014 (AIE, 2015). Les cellules lithium-ion solides représentent un progrès supplémentaire par rapport aux batteries lithium-ion traditionnelles : l'électrolyte liquide y étant remplacé par un matériau solide, elles sont plus efficaces, moins dangereuses et devraient être commercialement viables dans quelques années (Motavalli, 2015). Pour rendre ces technologies plus flexibles et plus attractives, les constructeurs automobiles ont commencé à proposer des systèmes V2H (du véhicule à l'habitation) permettant à leurs clients d'alimenter leur habitation en électricité avec leur véhicule ou inversement. À l'avenir, des supercondensateurs (condensateurs électrochimiques de grande capacité), qui récupèrent et restituent l'énergie cinétique de façon cyclique et se rechargent presque instantanément, pourraient aussi permettre de recharger un véhicule pendant les arrêts qu'il effectue normalement au cours d'un trajet, par exemple aux feux rouges (Kuusi et Vasamo, 2014).

Les autres nouveautés dans le domaine des batteries incluent notamment les batteries métal-air, sur lesquelles la recherche commence tout juste à se pencher. En général, ces batteries utilisent du lithium ou du zinc (piles à combustible ou piles zinc-air) pour l'anode et de l'oxygène, prélevé dans l'environnement, pour la cathode. Elles sont donc plus légères avec une cathode durable qui peut se régénérer. Au cours des dix ans à venir, la densité d'énergie pourrait augmenter jusqu'au point où les véhicules à batterie deviendront plus compétitifs que les véhicules à moteur à combustion interne. Pour augmenter cette densité d'énergie, deux axes de recherche sont privilégiés : le développement de matériaux d'électrode de plus grande capacité, et le développement de cellules utilisant la chimie à plus haute tension (Element Energy, 2012). Des produits commercialisables pourraient être disponibles d'ici 2020 (VDI Technologiezentrum GmbH, 2015).

Les applications à grande échelle de stockage d'énergie pour le réseau stimuleront elles aussi la demande

Chaque année dans le monde, les coupures de courant causent des milliards de dollars de dommages. La surproduction reste elle aussi un problème majeur (AIE, 2015). Les systèmes de stockage à grande échelle offrent la possibilité de compenser les fluctuations de l'onde de tension et de décentraliser l'ajustement. Or, les batteries, qui conviennent particulièrement aux applications décentralisées à petite échelle de courte ou moyenne durée, sont moins adaptées au suivi de charge car elles présentent une capacité de stockage limitée et tendent à se décharger toutes seules (VDI Technologiezentrum GmbH, 2015). Pour stocker l'électricité du réseau, on emploie d'autres moyens, notamment le stockage d'énergie sous forme hydraulique, par exemple dans une station de transfert d'énergie par pompage (STEP), le stockage d'énergie par air comprimé (CAES) et les systèmes à l'hydrogène. Les STEP, très largement déployées, totalisent 97 % de la capacité mondiale de stockage d'électricité du réseau (AIE, 2015). Le principe consiste à utiliser une différence de hauteur pour stocker l'électricité aux heures creuses, puis à restituer l'électricité comme le font les centrales hydrauliques conventionnelles. Dispositifs aujourd'hui perfectionnés, les STEP sont dans de nombreux pays la seule technologie de stockage déployée à grande échelle. Des installations de stockage utilisant l'air comprimé ou l'hydrogène, qui conviennent à des applications énergétiques de longue durée, sont utilisées aux États-Unis et en Allemagne depuis plusieurs décennies. Cependant, elles sont coûteuses, ont des

rendements globaux faibles et posent des problèmes de sécurité. Les stockages magnétiques supraconducteurs (SMES) et les supercondensateurs, qui utilisent respectivement un champ magnétique et l'énergie électrostatique, permettent de stocker l'électricité pendant de courtes durées, de l'ordre de la seconde ou de la minute. Les volants d'inertie stockent l'électricité sous forme d'énergie de rotation via l'application d'un couple. Les SMES, les supercondensateurs et les volants d'inertie ont généralement de grandes densités de puissance mais de faibles densités d'énergie, c'est pourquoi ils sont surtout destinés à compenser les fluctuations de puissance sur de courtes durées (AIE, 2014).

Les technologies avancées de stockage de l'énergie devraient contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre

En apportant de la flexibilité au système électrique et en réduisant les pertes d'énergie thermique, les technologies de stockage de l'énergie devraient contribuer à la réalisation des objectifs du scénario à 2°C (AIE, 2015). On pourrait davantage faire appel à des sources renouvelables si l'on pouvait contrôler la production d'électricité grâce à des solutions de stockage (Elsässer, 2013). Parallèlement, plus on déploie des moyens de production renouvelables, plus la demande de technologies de stockage de l'énergie devrait croître (AIE, 2015). Les systèmes de stockage intelligents et les réseaux intelligents pourraient aussi encourager l'émergence de structures coopératives locales de production d'électricité d'origine renouvelable (ESPAS, 2015). Les technologies solaires, éoliennes et de batterie rentables sont des composantes fondamentales des filières énergétiques décentralisées (Horizons de politiques Canada, 2013). Dans les économies en développement, les systèmes de stockage pourraient avoir pour avantage de constituer des sources fiables d'électricité dans des zones reculées auparavant inaccessibles (US Department of Energy, 2014).

Il est impératif de conduire davantage de R-D pour améliorer la rentabilité des systèmes de stockage

Des ruptures technologiques sont nécessaires dans les domaines du stockage thermique à haute température et des batteries modulables, ainsi que pour les systèmes de stockage qui optimisent les performances des systèmes énergétiques et facilitent l'intégration des énergies renouvelables (AIE, 2015). La R-D consacrée au stockage cherche également à réduire les coûts de ces technologies (AIE, 2014). En effet, leurs coûts d'investissement élevés restent un obstacle à leur déploiement généralisé (AIE, 2015).

À mesure qu'apparaissent de nouveaux matériaux, de nouvelles technologies et de nouvelles applications permettant le déploiement de systèmes de stockage de l'énergie, il est nécessaire d'élaborer des techniques et protocoles pour valider leur sûreté et s'assurer que le risque de panne ou de perte est aussi faible que possible (US Department of Energy, 2014). Par exemple, les avantages des batteries au lithium doivent être évalués au regard de l'impact environnemental et sanitaire global des opérations d'extraction et de manipulation du lithium.

Biologie de synthèse

La biologie de synthèse est un nouveau champ de recherche au sein de la biotechnologie qui s'appuie sur des principes d'ingénierie pour manipuler l'ADN des organismes. Elle permet la conception et la construction de nouveaux éléments biologiques et la réingénierie de systèmes biologiques naturels à des fins utiles. On anticipe pour cette filière une vaste palette d'applications en santé, en agriculture, dans l'industrie et dans l'énergie, mais elle soulève également des questions juridiques et éthiques d'importance.

La biologie synthétique tente de remodeler les organismes vivants sur la base d'un schéma rationnel

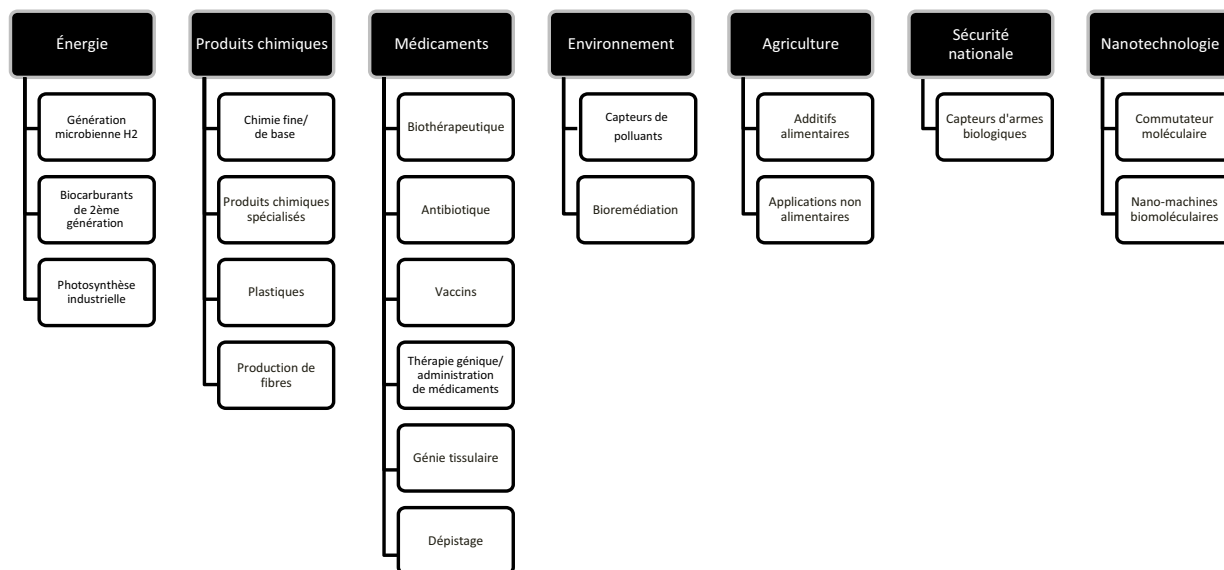
Si les êtres humains font de la manipulation génétique depuis 10 000 ans, à travers la reproduction sélective, ce n'est que dans les années 70 que la manipulation directe d'ADN dans les organismes est devenue possible grâce au génie génétique. La biologie de synthèse est un domaine de recherche récent qui a introduit une méthode d'ingénierie dans la manipulation génétique. Elle se définit comme l'application de la science, de la technologie et de l'ingénierie dans le but de faciliter et d'accélérer la conception, la fabrication et/ou la modification du matériel génétique chez des organismes vivants (CE, 2014). Elle permet la conception et la construction de nouveaux éléments, appareils et systèmes biologiques, et la réingénierie de systèmes biologiques naturels existants à des fins utiles (Royal Academy of Engineering, 2009).

Alors que le génie génétique classique utilise des approches expérimentales pour produire de nouveaux modèles biologiques, la biologie de synthèse s'attache à remodeler des systèmes vivants sur la base d'un schéma rationnel (de Lorenzo et Danchin, 2008). Pour ce faire, elle s'appuie sur les principes de l'ingénierie tels que la normalisation, la modularisation et l'interopérabilité. Ainsi, les biologistes de synthèse créent et cataloguent des composantes fonctionnelles appelées « biobriques » à partir de séquences d'ADN qui peuvent, ou non, se trouver dans la nature. Les biobriques accomplissent certaines fonctions qui peuvent être combinées de façon à produire des innovations dans une vaste palette de secteurs, notamment la santé, l'agriculture, l'industrie et l'énergie.

La biologie de synthèse est porteuse d'innovations radicales dans une vaste palette de secteurs d'activité

En tant que plateforme de technologies, la biologie de synthèse pourra potentiellement offrir des bénéfices socio-économiques substantiels, générer de nouvelles activités et améliorer l'efficacité des activités existantes (graphique 2.10). Elle peut être exploitée par plusieurs secteurs clés, comme l'énergie (par exemple carburant à relativement bas coût pour les transports), les médicaments (par exemple développement de vaccins), l'agriculture (par exemple plantes modifiées) et les produits chimiques. Dans ce dernier secteur, on trouve une vaste palette d'applications à travers la bioproduction de nouveaux matériaux, notamment des bioplastiques ne portant pas atteinte à l'environnement et des cosmétiques (par exemple parfums naturels issus de la biologie de synthèse). Dans le domaine de la biotechnologie marine, de nombreuses applications sont envisagées, mais la majorité des applications possibles n'ont même pas encore été imaginées. On peut citer comme exemple récent dans ce domaine la modification de diatomées, au moyen de l'édition du génome, pour la production de biocarburants (Daboussi et al., 2014). La biologie de synthèse pourrait également contribuer à répondre aux objectifs de la bioéconomie, à savoir la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la concrétisation de la sécurité alimentaire et énergétique. Étant donné que la population mondiale continue de croître et que la qualité de l'eau et des terres est de plus en plus menacée, la biologie de synthèse est à l'origine d'applications agricoles d'envergure promettant d'améliorer la productivité et l'efficacité agricoles. Au nombre des exemples figurent non seulement des cultures aux rendements accrus ou résistantes à la sécheresse et aux maladies, mais également des céréales qui produisent leur propre engrais.

Graphique 2.10. Applications de la biologie de synthèse selon les secteurs



Source : OCDE (2014c), *Emerging Policy Issues in synthetic biology*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264208421-en>, basé sur Collins (2012), « Win-win investments », www.europarl.europa.eu/stoa/cms/home/events/workshops/synthetic_biology.

Deux développements émergents qui pourraient transformer la biologie synthétique

Premièrement, l'édition du génome utilise les défenses immunitaires naturelles chez les bactéries pour créer des « ciseaux moléculaires » qui coupent et remplacent des séquences d'ADN avec une grande précision (Sample, 2015). Cette technique aide les scientifiques à mieux comprendre le rôle des gènes dans la santé et comment plusieurs maladies pourraient être traitées par la modification des tissus et des organes. Les cellules immunitaires des patients pourraient être reprogrammées de sorte qu'elles attaquent les cellules cancéreuses ; des cellules immunitaires pourraient être rendues résistantes, par exemple, à l'infection à VIH ; et l'on pourrait empêcher que les affections génétiques ne soient transmises aux descendants.

Deuxièmement, la DIYbio (la biologie à faire soi-même), encore appelée « biologie participative » (*biohacking*), renvoie aux travaux d'une communauté grandissante d'individus et de petites organisations qui étudient et pratiquent la biologie et les sciences de la vie loin des structures officielles. La baisse du coût des équipements, des instruments et de l'informatique, conjuguée à la montée des pratiques de développement en *open source*, a favorisé ce mouvement, « démocratisant » la science et donnant aux individus accès à leurs propres données biologiques. Depuis 2003, le coût du séquençage génétique a été divisé par plus de 1 million (OCDE, 2014c). La rentabilité de la synthèse de gènes s'est elle aussi améliorée, quoique à un rythme bien moins élevé (Carlson, 2014). La biologie participative pourrait représenter un moteur d'innovations analogue à la Silicon Valley, un grand nombre de personnes faisant des découvertes et trouvant des applications aux biobriques. À l'avenir, l'innovation dans ce domaine pourrait se répandre, avec des utilisateurs capables de bricoler et d'améliorer les produits et services de grandes entreprises, comme cela s'est déjà produit dans le secteur manufacturier (von Hippel, 2005).

Le développement de la biologie synthétique fait face à plusieurs obstacles, notamment des risques biologiques

Le développement de cette technologie comporte un certain nombre de risques au niveau de la biosécurité et de la biosûreté. La biosécurité recouvre les diverses mesures et pratiques conçues pour protéger les travailleurs et l'environnement contre des applications délétères mais mises en œuvre sans intention de nuire ou contre la diffusion accidentelle d'agents ou de produits de laboratoire dangereux. La biosûreté est habituellement associée au contrôle de matériaux et d'informations biologiques critiques, afin d'éviter que quelqu'un qui n'en a pas le droit entre en leur possession, que quelqu'un en fasse un mauvais usage ou les diffuse intentionnellement (OCDE, 2014c).

Les risques que soulève la biologie de synthèse sont difficiles à évaluer compte tenu de la quantité illimitée de propriétés qui se font jour pour les produits et pour les systèmes génétiquement modifiés (CSRSE, CSRSSEN et CSSC, 2015). Cette difficulté est exacerbée par les pratiques en *open source* caractérisant la biologie de synthèse. Par comparaison avec d'autres types de sciences, l'expérimentation dans ce domaine connaît une plus grande incertitude du risque, étant donné les capacités d'autoréplication des organismes et leur transmissibilité (Wolinsky, 2009). S'agissant de la biosûreté, la biologie participative pourrait être dirigée vers des activités illégales, dont certaines pourraient menacer la sécurité publique (armes biologiques, par exemple). En ce qui concerne l'édition du génome, même s'il faudrait beaucoup de connaissances supplémentaires pour parvenir à produire des agents infectieux, les autorités doivent veiller à ce qu'une supervision et un contrôle suffisants soient en place.

La biologie de synthèse soulève des questions éthiques

Si la thérapie génique (modification des tissus ordinaires du corps) constitue une technique médicale acceptée, tel n'est pas le cas des modifications qui altéreraient les cellules reproductrices d'un individu. Ce type d'édition du génome (appelé édition de la lignée germinale) pourrait, en théorie, altérer la nature de l'espèce humaine. Les académies des sciences des États-Unis, du Royaume-Uni et de la République populaire de Chine ont récemment organisé un sommet où il a été convenu d'un moratoire sur les altérations permanentes du génome humain (Wade, 2015). Les participants ont appelé les scientifiques du monde entier à s'abstenir de toute utilisation des résultats de la recherche portant sur l'édition de la lignée germinale jusqu'à ce que les risques en soient mieux compris et qu'un vaste consensus social se dégage quant à l'adéquation de ces techniques.

En outre, les incertitudes techniques et juridiques sont substantielles

L'avenir de la biologie de synthèse dépend de la possibilité de synthétiser de l'ADN de manière fiable, précise et peu onéreuse. Si le coût du séquençage de l'ADN a reculé jusqu'à être désormais négligeable, il faut que le coût de l'écriture d'un code génétique chute dans les mêmes proportions. Les difficultés techniques pour parvenir à ce que l'écriture se trouve à parité avec le séquençage sont considérables et génèrent des risques financiers élevés pour les entreprises de haute technologie qui travaillent à développer la biologie de synthèse, lesquelles sont généralement de petite taille. Des obstacles majeurs doivent également être surmontés dans la bio-informatique et l'infrastructure logicielle, même si les logiciels dont il s'agit seront vraisemblablement accessibles à un large public bien avant la synthèse de l'ADN. Ce point peut être positif pour la biologie de synthèse, mais il accroît la nécessité d'être vigilant pour la biosûreté, car les structures de séquences pourraient facilement être envoyées pour production dans d'autres pays qui ne disposent pas des contrôles appropriés.

Parallèlement, le grand nombre de règlements qui doivent être respectés pour produire légalement des organismes transgéniques (notamment afin d'empêcher tout effet nocif sur l'être humain et d'éviter qu'ils ne sortent des environnements contrôlés) pourrait bien limiter les applications (OCDE, 2014c ; Travis, 2015).

Chaîne de blocs

La chaîne de blocs (*blockchain*) est une base de données qui permet le transfert de valeurs au sein d'un réseau informatique. Cette technologie devrait induire une rupture sur plusieurs marchés en assurant des transactions fiables sans qu'une tierce partie soit nécessaire. Toutefois, son expansion est menacée par des problèmes techniques qui demeurent irrésolus.

Qu'est-ce que la technologie de la chaîne de blocs ?

Les applications internet, telles que les navigateurs internet ou les programmes de messagerie électronique, utilisent des protocoles qui définissent comment les logiciels installés sur des appareils connectés peuvent communiquer entre eux. Alors que l'objectif de la plupart des protocoles classiques est l'échange d'informations, avec la chaîne de blocs, les protocoles servent à l'échange de valeurs. Cette nouvelle technologie facilite une appréciation commune de la valeur attribuée à des données spécifiques, et permet donc la réalisation de transactions. À proprement parler, la chaîne de blocs est une base de données distribuée qui fonctionne comme un registre public ouvert, commun et digne de confiance, que personne ne peut falsifier et que tout le monde peut inspecter. Les protocoles fondés sur une chaîne de blocs (par exemple Bitcoin) précisent comment les participants d'un réseau peuvent gérer et actualiser le registre en utilisant la cryptographie et en s'appuyant sur le consensus général. La combinaison de transparence, de règles strictes et de supervision constante, qui peut potentiellement caractériser un réseau à base de chaîne de blocs, offre des conditions suffisantes pour que ses utilisateurs aient confiance dans les transactions qui y sont conduites, sans qu'il soit besoin d'une institution centrale. En tant que telle, cette technologie a le potentiel d'abaisser les coûts de transaction en supprimant la nécessité de recourir à des intermédiaires de confiance pour réaliser des transferts de valeurs suffisamment sûrs. Elle pourrait ébranler les marchés et institutions publiques qui ont pour modèle d'activité et pour raison d'être l'instauration d'une confiance sur laquelle peuvent s'appuyer les transactions.

La technologie de la chaîne de blocs pourrait perturber de nombreux secteurs

À l'origine, la technologie de la chaîne de blocs a été conçue pour les bitcoins, une monnaie électronique ni réglementée ni cautionnée par aucune banque centrale. Toutefois, la technologie entend être digne de confiance en elle-même (autrement dit, elle est telle qu'il n'est pas nécessaire qu'un tiers de confiance intervienne) du fait qu'elle empêche toute double dépense et garde constamment la trace de qui possède la monnaie ainsi que celle des transactions (OCDE, 2015f). L'offre de bitcoins est limitée et régulée par un algorithme mathématique qui définit le rythme auquel la monnaie est créée. La procédure permettant d'actualiser le registre récompense les utilisateurs qui consacrent des ressources informatiques au chiffrement des transactions (on les appelle des mineurs), récompense qui prend la forme de nouveaux bitcoins entrant dans le circuit monétaire du réseau. Une fois qu'un bloc de transactions a été chiffré, tout le réseau (y compris les non-mineurs) en vérifie la validité par un consensus majoritaire (51 %). Comme dans les échanges de monnaies

classiques, le taux de change du bitcoin vis-à-vis des monnaies classiques est déterminé grâce à un système de double enchère, ce qui encourage un contrôle rigoureux et contribue à sécuriser le réseau : si le bitcoin est de plus en plus largement adopté et que sa valeur augmente face à d'autres monnaies, l'incitation à consacrer des ressources informatiques afin d'en retirer des récompenses sera d'autant plus forte.

Si l'expérience du Bitcoin oblige déjà à repenser les monnaies, les effets attendus de la technologie sous-jacente de la chaîne de blocs vont au-delà de la monnaie électronique. Cette technologie pourrait déstabiliser les acteurs historiques de l'activité de gestion d'actifs, mais également les autorités publiques, et transformer la manière dont beaucoup de services sont fournis. Les applications potentielles peuvent être regroupées en trois catégories :

Transactions financières

Les applications financières de la technologie de la chaîne de blocs dépassent le Bitcoin et la monnaie électronique. Ainsi, cette technologie ouvre des possibilités pour l'envoi de fonds transfrontières, qui induit généralement des frais de transaction élevés en proportion de la somme envoyée. L'investissement participatif en capital constitue une autre possibilité, du fait qu'il implique souvent le déploiement d'efforts administratifs importants au regard de la taille de chaque investissement (Collins et Baeck, 2015). Une chaîne de blocs peut être « publique », comme dans le cas du Bitcoin, c'est-à-dire ouverte à tous, chacun pouvant apporter sa contribution aux données et le registre étant détenu collectivement par tous les participants ; elle peut également être « privée », auquel cas seulement un ou plusieurs utilisateurs du réseau peuvent inscrire de nouvelles transactions et vérifier le contenu du registre (UK GOS, 2016). Les registres privés trouvent un vaste éventail d'applications dans le secteur privé. Des chambres de compensation (par exemple le New York Stock Exchange et le Nasdaq), des banques (telles que Goldman Sachs), des sociétés de cartes de crédit (MasterCard, entre autres) et des sociétés d'assurance (New York Life Insurance Company, par exemple) ont déjà investi environ 1 milliard USD dans des start-ups utilisant des technologies de chaîne de blocs (Pagliery, 2015 ; de Filippi, 2015). En remplaçant les infrastructures bancaires, la technologie des registres distribués pourrait réduire de 20 milliards USD par an à l'échelle mondiale les coûts associés aux paiements transfrontières, aux transactions sur titres et au respect des dispositions réglementaires (Santander Innoventures, Wyman et Anthemis, 2015).

Systèmes d'enregistrement et de vérification

La technologie de la chaîne de blocs peut également être utilisée pour créer et administrer des registres dignes de confiance. Le registre distribué produit un historique robuste, transparent et facilement accessible. Il peut être utilisé pour stocker tout type de données, y compris sur la propriété de l'actif. Diverses utilisations sont possibles, en ce qui concerne par exemple l'enregistrement et la preuve de la propriété foncière ou dans le domaine des pensions, ou encore pour la vérification de l'authenticité et de l'origine d'œuvres d'art, de produits de luxe (des diamants, par exemple) ou de médicaments onéreux (The Economist, 2015 ; Thomson, 2015). Pour cette catégorie d'applications, les chaînes de blocs sont privées, si bien qu'elles s'appuient sur une entité centrale pour l'actualisation et le stockage du registre. Le Honduras prévoit déjà de constituer un système de cadastre reposant sur la chaîne de blocs (Chavez-Dreyfuss, 2015), ce qui pourrait changer radicalement les activités des offices notariaux dans l'immobilier. Un registre partagé

utilisant le protocole de la chaîne de blocs pourrait également induire des améliorations substantielles dans l'allocation des ressources dans le secteur public grâce à la consolidation de la comptabilité, au renforcement de la transparence et à la facilitation des activités d'audit, empêchant la corruption et accroissant l'efficacité. Cette technologie pourrait en outre assurer l'intégrité d'autres enregistrements et services des pouvoirs publics, et en particulier de la perception de l'impôt, le versement de prestations et l'émission de passeports. Un registre partagé au sein des différents niveaux d'administration pourrait garantir que les transactions sont cohérentes et exemptes d'erreur. De plus, étant donné que les grandes institutions publiques et privées dans les pays émergents sont moins développées et que ces derniers bénéficient d'une confiance moindre de la part des marchés financiers pour leur capacité à se développer et à se doter de services publics efficaces, la chaîne de blocs pourrait constituer une « voie rapide » pour le développement de services financiers et la tenue de registres publics.

Les contrats intelligents

La technologie de la chaîne de blocs offre la possibilité d'adjoindre des données additionnelles à des transactions portant sur une valeur. Ces données pourraient préciser que certaines conditions doivent être remplies pour que le transfert puisse avoir lieu. Une transaction fonctionne ici de la même manière qu'une facture qui serait réglée automatiquement dès que certaines conditions sont satisfaites. Avec ces « contrats intelligents » reposant sur la chaîne de blocs, on fait aussi référence à une « monnaie programmable » (Bheemaiah, 2015). Les conditions spécifiées dans le transfert sous forme de code de programmation pourraient être utilisées pour indiquer dans quelle situation se fera la prestation de services tels que le stockage de données dans le nuage (par exemple Dropbox), une transaction sur une place de marché électronique (par exemple eBay) ou sur une plateforme d'économie du partage, notamment Uber et Airbnb (de Filippi, 2015). Microsoft est en train d'établir des partenariats pour des contrats intelligents sur lesquels s'appuieront ses services de location de serveurs informatiques (Pagliery, 2015). Des contrats intelligents pourraient également étayer des plateformes de diffusion média, empêchant le piratage et veillant à ce que les musiciens et les réalisateurs de film touchent des droits lorsque du contenu numérique les concernant est diffusé (Nash, 2016).

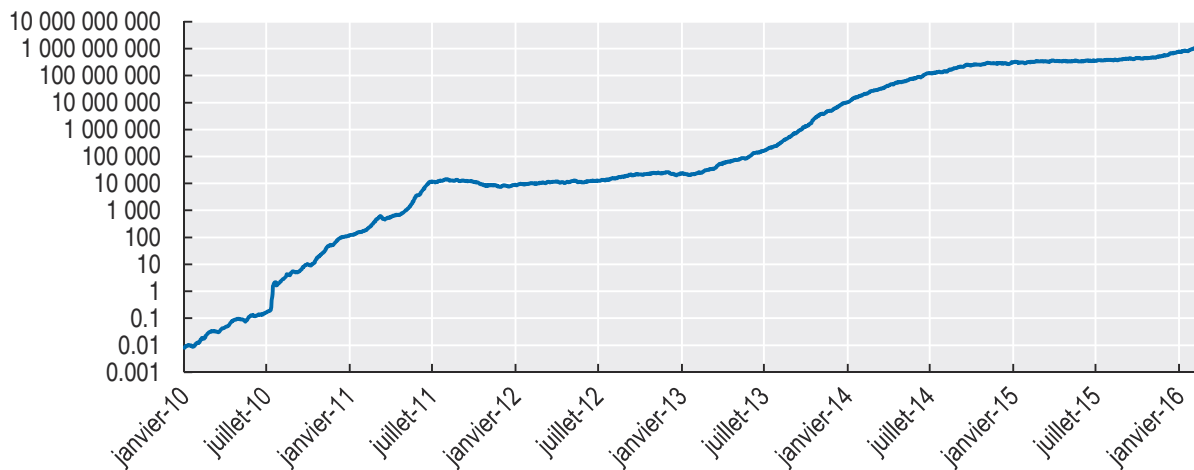
Plusieurs incertitudes technologiques demeurent

Une incertitude cruciale pour les applications « sans institution » (privées) réside dans le fait que leur sécurité dépend largement du nombre d'utilisateurs. En d'autres termes, les applications doivent atteindre une échelle suffisante avant de devenir fiables. En outre, l'algorithme mathématique standard qui garantit que le registre est incorruptible (auquel recourt actuellement Bitcoin) exige des calculs beaucoup plus importants à mesure que le réseau est contrôlé plus rigoureusement. Le graphique 2.11 montre que la puissance de calcul totale du réseau Bitcoin s'accroît à un rythme exponentiel depuis 2010. À mesure qu'augmente le nombre de mineurs qui entrent sur le réseau, l'algorithme mathématique complexifie le chiffrement de façon à ce que le rythme prédéfini de création des bitcoins soit respecté. Certes, le fait de rémunérer le minage avec des bitcoins est incitatif, mais ce système nécessite également une grande quantité d'électricité pour traiter et vérifier les transactions effectuées au sein du réseau, que l'on estime aujourd'hui comparable à la consommation électrique de l'Irlande (UK GOS, 2016). D'autres techniques permettant d'atteindre un consensus fiable moins gourmandes en calculs sont actuellement en cours de

développement ou à l'essai. Une autre incertitude spécifique aux contrats intelligents tient à la mesure dans laquelle des services complexes peuvent être suffisamment codés sous forme de règles. Afin que ces réseaux puissent être complètement autonomes (le service n'étant pas adossé à une entreprise), les instructions inscrites dans les codes associés aux transferts devraient fournir une définition exhaustive du service. Cette méthode devrait être possible pour nombre de services courants (par exemple du calcul), mais on peut se demander si elle est réaliste pour des applications plus compliquées, telles que les places de marché virtuelles ou des applications de l'économie du partage, comme Uber et Airbnb, qui requièrent souvent des mécanismes de règlement des différends difficiles à codifier et à délimiter.


Graphique 2.11. **La puissance de calcul global du réseau Bitcoin**

Hashs calculés par seconde, échelle logarithmique



Note : Les données sont indiquées en « hash ». Un hash est une méthode de calcul qui traduit les données en formes de taille réduite mais cependant représentatives. Si plus d'entités entrent dans le réseau Bitcoin, l'algorithme rend le problème du cryptage plus complexe (il est alors nécessaire de calculer un plus grand nombre de hash) pour maintenir les ajouts à la chaîne de blocs (et le monnayage des récompenses Bitcoin) fixés à environ 10 minutes.

Source : D'après Blockchain Luxembourg S.A. (2016), « Hash Rate », <https://blockchain.info/charts/hash-rate> (consulté le 4 février 2016).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433340>

La résolution des incertitudes technologiques pourrait rendre possibles des activités illégales

Le pseudo-anonymat des transactions soulève diverses inquiétudes quant à la possible exploitation de la technologie aux fins d'activités illégales. Si tous les transferts réalisés au moyen de la chaîne de blocs sont enregistrés de manière permanente et incorruptible, les informations qu'ils contiennent n'ont trait qu'à la cyberidentité des agents, laquelle ne conduit pas nécessairement à leur véritable identité. Certains utilisateurs de monnaie électronique ont déjà participé à des activités indues et illégales, notamment à du blanchiment d'argent et au transfert de valeur pour des produits illégaux. Des méthodes d'identification plus performantes pourraient conduire à une mise en application plus efficace de la loi avec les monnaies numériques qu'avec l'utilisation d'espèces (OCDE, 2015f). Toutefois, les applications de contrats intelligents pourraient également permettre la création et l'exploitation de marchés illégaux opérant sans entreprise ou entité responsable soumise au respect de la réglementation.

Observations finales

Si les technologies clés et émergentes présentées ci-dessus sont très variées dans leur origine comme dans leurs applications potentielles, elles présentent de nombreuses caractéristiques communes qui ont des conséquences directes pour l'action publique :

- Les technologies clés et émergentes analysées dans ce chapitre devraient avoir des répercussions sur de multiples champs d'application, qui, pour beaucoup, ne peuvent tout simplement pas être anticipées. Ces répercussions seront modelées par toute une palette de facteurs non technologiques, dont certains sont examinés dans les mégatendances, au chapitre 1 : vieillissement des sociétés, changement climatique, développements économiques et politiques ou évolutions des préférences sociales. Technologie et société évoluent conjointement, si bien qu'une grande partie des changements technologiques, en particulier de ceux qui induiront le plus de bouleversements, ne sont pas prévisibles. Cette incertitude nous incite à adopter une approche ouverte et flexible de l'action publique, qui soutienne, pour autant que les ressources le permettent, une multitude d'avancées et d'applications technologiques. Cette variété non seulement répartit les risques et les opportunités, mais renforce également les capacités d'absorption, ce qui permet d'exploiter les recherches et technologies venues d'ailleurs. Parallèlement, des cycles réguliers de réunions de veille anticipative (par exemple sur les « signaux faibles »), suivis par des cycles permettant aux décideurs publics et autres acteurs des systèmes d'innovation d'en tirer du sens (« *sense-making* »), peuvent améliorer la capacité des autorités à ajuster l'action publique en fonction des divers développements et favoriser une meilleure agilité des systèmes.
- Le développement et l'exploitation à venir des technologies clés dépendent souvent d'autres technologies « génériques », dont les plus omniprésentes aujourd'hui sont peut-être les technologies de l'information et des communications (TIC). Quatre des technologies clés et émergentes traitées dans ce chapitre – l'internet des objets, l'analytique de données massives, l'IA et la chaîne de blocs – sont ou deviendront vraisemblablement dans un avenir proche des TIC génériques omniprésentes. En outre, les évolutions dans les six autres technologies clés couvertes ici sont, dans une large mesure, étayées par des avancées dans les TIC ainsi que dans d'autres technologies. L'évolution technologique se caractérise pour une part non négligeable par la convergence des technologies et leur combinaison, lesquelles peuvent être favorisées par des espaces institutionnels pluridisciplinaires – par exemple pour mener des activités de R-D et dispenser des formations. Si de nombreux pays de l'OCDE soutiennent de plus en plus ce type d'espace, il convient de déployer davantage d'efforts pour passer outre les dispositifs institutionnels et organisationnels monodisciplinaires en place depuis longtemps pour le financement et l'exécution de la R-D, qui entravent les initiatives pluridisciplinaires.
- La recherche dans le secteur public joue un rôle crucial dans le développement des technologies clés et émergentes. Elle produit des connaissances nouvelles sur les phénomènes qui sous-tendent les technologies émergentes et contribue souvent à l'élaboration de prototypes ou de démonstrateurs. Aspect tout aussi important, la recherche dans le secteur public favorise nombre des compétences nécessaires pour développer plus avant et exploiter les technologies émergentes. Il importe donc d'investir suffisamment dans la recherche publique pour concrétiser les bénéfices de ces technologies au service de la croissance et du bien-être de demain.
- Grâce aux progrès des TIC et aux fortes réductions des coûts des équipements et du personnel de laboratoire, communautés et citoyens endossent un rôle de plus en plus

prépondérant dans le développement et l'exploitation de certaines technologies clés et émergentes, comme la chaîne de blocs, la biologie de synthèse ou la fabrication additive. Une telle ouverture de la recherche, de l'innovation et de l'entrepreneuriat est fort louable, et certains pays de l'OCDE mettent en place des cadres d'action publique visant à la favoriser. Dans le même temps, la participation des citoyens soulève diverses questions au niveau de la réglementation, par exemple concernant la protection de la santé et de la sécurité (cette menace est particulièrement aiguë dans le cas de la biologie de synthèse, car une forte culture de sciences « faites à la maison » s'instaure rapidement) ou les droits de propriété intellectuelle (cette question est cruciale en ce qui concerne la fabrication additive). En réalité, les pouvoirs publics doivent régulièrement adapter les règlements existants ou en élaborer de nouveaux afin de régir le développement et les applications de nombreuses technologies émergentes, indépendamment de la participation des citoyens. Étant donné la rapidité de l'évolution technologique, c'est là un véritable défi, mais de nombreux pays pourraient améliorer leur veille anticipative sur les futures questions de réglementation, ce qui leur permettrait d'être mieux préparés à agir plus rapidement et de manière plus déterminante.

- Les technologies émergentes sont associées à plusieurs risques et incertitudes, et beaucoup d'entre elles soulèvent également d'importantes questions éthiques. Ces caractéristiques appellent une gouvernance inclusive et anticipative du changement technologique, qui inclut l'évaluation des bénéfices et des coûts, ainsi que le modelage actif de l'évolution future et des possibilités d'exploitation. De tels dispositifs de gouvernance restent sous-développés dans la plupart des pays de l'OCDE, mais cette situation pourrait changer dans les prochaines années compte tenu de l'intérêt grandissant pour « la recherche et l'innovation responsables » (RRI). Les dispositifs de gouvernance qui intègrent la RRI devront prendre en compte une multitude de perspectives afin d'évaluer les voies que pourraient emprunter, demain, les technologies émergentes. Des évaluations reposant sur une base plus large auraient vraisemblablement tout intérêt à faire davantage référence aux sciences sociales et humaines que ce n'est le cas dans les dispositifs d'évaluation actuels.
- Les efforts de recherche et d'innovation entourant les technologies clés et émergentes sont de plus en plus distribués sur toute la planète et bénéficient généralement d'une coopération internationale. Il s'ensuit que pour régir les technologies émergentes et leur utilisation, par exemple à travers des règlements et des accords, la coordination internationale est toujours plus indispensable. Des organisations comme l'OCDE peuvent constituer une enceinte utile pour que les pays puissent coopérer et se coordonner à cet égard.
- Parallèlement, comme le montre la cartographie des exercices de prospective (annexe 2.A2), le développement de la technologie se nourrit d'une concurrence intense, les pays investissant des sommes considérables dans la recherche et l'innovation dans des domaines technologiques similaires. La concurrence porte non seulement sur les solutions techniques, mais également sur les modèles d'activité, les plateformes et les normes, surtout au niveau des entreprises, où l'« avantage du précurseur » peut faire la différence entre la réussite et l'échec. Les États souhaitant soutenir les nouveaux secteurs qui entourent les technologies émergentes ne devront pas se cantonner à la fonction de R-D pour apprécier la dynamique plus large au niveau de l'entreprise et du secteur qui contribuera vraisemblablement à leur réussite.

Nombre de ces points apparaissent dans le chapitre 3, où ils sont détaillés plus avant.

Note

1. Bien que cette dernière ne fasse pas partie des technologies émergentes recensées par les exercices de cartographie, elle a été ajoutée ici car elle est apparue en 2015 comme une technologie générique de rupture possible.

Références

- AIE (Agence internationale de l'énergie) (2015), *Energy Technology Perspectives 2015*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/energy_tech-2015-en.
- AIE (2014), « Energy storage », *IEA Technology Roadmaps*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264211872-en>.
- Akyildiz, I.F. et al. (2015), « The Internet of bio-nano things », *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, n° 3, pp. 32-40.
- Alivisatos, A.P. et al. (2015), « A national network of neurotechnology centers for the BRAIN Initiative », *Neuron*, vol. 88, pp. 445-448, <http://dx.doi.org/10.1016/j.neuron.2015.10.015>.
- Anderson, G. et J. Oederkirk (dir. pub.) (2015), *Dementia Research and Care: Can Big Data Help?*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264228429-en>.
- BASF (2015), « Research » (site web), www.nanotechnology.basf.com/group/corporate/nanotechnology/en/microsites/nanotechnology/research/index (consulté le 7 mai 2016).
- Bechtold, S. (2015), « 3D printing and the intellectual property system », *Economic Research Working Paper*, n° 28, Organisation mondiale de la propriété intellectuelle, Division de l'économie et des statistiques.
- Bheemaiah, K. (2015), « Block Chain 2.0: The renaissance of money », *Wired*, 17 février, www.wired.com/insights/2015/01/block-chain-2-0/ (consulté le 7 mai 2016).
- Blockchain Luxembourg S.A. (2016), « Hash Rate », <https://blockchain.info/charts/hash-rate> (consulté le 4 février 2016).
- Brynjolfsson, E. et A. McAfee (2015), « The jobs that AI can't replace », *BBC News*, 13 septembre, www.bbc.com/news/technology-34175290 (consulté le 7 mai 2016).
- 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.
- Carlson, R. (2014), « Time for new DNA synthesis and sequencing cost curves », *SynBioBeta*, <http://synbiobeta.com/time-new-dna-synthesis-sequencing-cost-curves-rob-carlson/> (consulté le 7 mai 2016).
- Carrington, D. (2016), « From liquid air to supercapacitors, energy storage is finally poised for a breakthrough », *The Guardian*, 4 février 2016, www.theguardian.com/environment/2016/feb/04/from-liquid-air-to-supercapacitors-energy-storage-is-finally-poised-for-a-breakthrough (consulté le 7 mai 2016).
- CE (Commission européenne) (2014), « European Commission Foresight Fiches: "Global Trends to 2030" », document de travail, <https://ec.europa.eu/digital-agenda/en/news/european-commission-foresight-fiches-global-trends-2030> (consulté le 7 mai 2016).
- Chavez-Dreyfuss, G. (2015), « Honduras to build land title registry using bitcoin technology », *Reuters*, 15 mai, <http://in.reuters.com/article/2015/05/15/usa-honduras-technology-idINKBN0001V720150515> (consulté le 7 mai 2016).
- Coeckelbergh, M. (2010), « Robot rights? Towards a social-relational justification of moral consideration », *Ethics and Information Technology*, vol. 12, n° 3, pp. 209-221.
- Collins, F. (2012), « Win-win investments: Synthetic biology for growth and innovation », exposé sur la « biologie de synthèse » présenté lors de l'atelier sur l'évaluation des choix scientifiques et techniques (STOA), Parlement européen, Bruxelles, 6 juin 2012, www.europarl.europa.eu/stoa/cms/home/events/workshops/synthetic_biology (consulté le 7 mai 2016).
- Collins, L. et P. Baeck (2015), « Crowdfunding and cryptocurrencies », *Nesta*, 13 juillet, www.nesta.org.uk/blog/crowdfunding-and-cryptocurrencies (consulté le 7 mai 2016).
- Crabtree, G. (2015), « Perspective: The energy-storage revolution », *Nature*, vol. 526, n° 7575, p. 92, <http://dx.doi.org/10.1038/526S92a>.
- CSRSE, CSRSEN et CSSC (Comité scientifique des risques sanitaires et environnementaux, Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux et Comité scientifique pour la sécurité

- des consommateurs de la Commission européenne) (2015), *Opinion on Synthetic Biology II: Risk Assessment Methodologies and Safety Aspects*, Union européenne, Luxembourg, http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenih_r_o_048.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- CSRSSEN (Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux de la Commission européenne) (2009), *Risk Assessment of Products of Nanotechnologies*, Direction générale de la santé et des consommateurs, Bruxelles.
- Daboussi, F. et al. (2014), « Genome engineering empowers the diatom *Phaeodactylum tricoratum* for biotechnology », *Nature Communications*, vol. 5, n° 3831, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms4831>.
- Darling, K. (2012), « Extending legal rights to social robots », exposé présenté lors de la Conférence « We Robot », Miami, 23 avril, http://robots.law.miami.edu/wp-content/uploads/2012/04/Darling_Extending-Legal-Rights-to-Social-Robots-v2.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- Das, S., B. Sen et N. Debnath (2015), « Recent trends in nanomaterials applications in environmental monitoring and remediation », *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, n° 23, pp. 18333-18344, <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-015-5491-6>.
- de Filippi, P. (2015), « Digital Europe: Peer-to-peer technology for social good », Nesta, 12 novembre, www.nesta.org.uk/blog/digital-europe-peer-peer-technology-social-good (consulté le 7 mai 2016).
- de Lorenzo, V. et A. Danchin (2008), « Synthetic biology: Discovering new worlds and new words », *EMBO Reports*, vol. 9, n° 9, pp. 822-827, <http://dx.doi.org/10.1038/embor.2008.159>.
- Depoorter, B. (2013), « Intellectual property infringements & 3D printing: Decentralized piracy », *Hastings Law Journal*, vol. 65, p. 1483.
- Dernis, H., M. Squicciarini et R. de Pinho (2015), « Detecting the emergence of technologies and the evolution and co-development trajectories in science (DETECTS): A “burst” analysis-based approach », *Journal of Technology Transfer*, 24 octobre, pp. 1-31, <http://dx.doi.org/10.1007/s10961-015-9449-0>.
- Element Energy (2012), *Cost and Performance of EV batteries: Final Report for the Committee on Climate Change*, Element Energy Limited, Cambridge, www.element-energy.co.uk/wordpress/wp-content/uploads/2012/06/CCC-battery-cost_Element-Energy-report_mars2012_Finalbis.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- Elsässer, M. (2013), « As solar costs drop, energy storage solutions take centre stage », *Renewable Energy World.com*, 24 juillet, www.renewableenergyworld.com/articles/2013/07/as-solar-costs-drop-energy-storage-solutions-take-center-stage.html (consulté le 7 mai 2016).
- ESPAS (Système européen d'analyse politique et stratégique) (2015), *Tendances mondiales à l'horizon 2030 : l'Union européenne peut-elle relever les défis à venir ?*, ESPAS, Bruxelles, http://europa.eu/espas/pdf/espas-report-2015_fr.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- Evans, D. (2011), « The Internet of Things: How the next evolution of the Internet is changing everything », *Cisco White Paper*, CISCO IBSG (Internet Business Solutions Group), www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- Fahlman, B.D. (2011), *Materials Chemistry*, 2^e édition, Springer, Pays-Bas.
- Faircap (2014), « \$1 water filter project » (site web), <http://faircap.org/> (consulté le 7 mai 2016).
- Faulkner-Jones, A. (2014), « Biofabrication: 3D stem cell printing », exposé présenté lors du 3D Printshow 2014, Londres, 4-6 septembre.
- FIT (Forum international des transports) (2015), *Automated and Autonomous Driving: Regulation under Uncertainty*, Éditions OCDE, Paris.
- FIT (2014), *Mobility Data: Changes and Opportunities*, Éditions OCDE, Paris.
- Gibson I., D. Rosen et B. Stucker (2015), *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*, 2^e édition, Springer, New York.
- Giordano, J. (dir. pub.) (2012), *Neurotechnology: Premises, Potential and Problems*, CRC Press.
- Glancy, D.J. (2012), « Privacy in autonomous vehicles », *Santa Clara Law Review*, vol. 52, n° 4, pp. 1171-1239.
- Hague, R.J.M. et P.E. Reeves (2000), « Rapid prototyping, tooling and manufacturing », *Rapra Review Reports*, rapport 117, vol. 10, n° 9, Rapra Technology Ltd.
- Helbing, D. (2015), « Societal, economic, ethical and legal challenges of the digital revolution: From big data to deep learning, artificial intelligence, and manipulative technologies », SSRN (Social Science Research Network), disponible à SSRN : <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2594352>.

- Hoffman, L. et al. (2015), « High-density optrode-electrode neural probe using Si(x)N(y) photonics for in vivo optogenetics » (site web de Neuro-Electronics Research Flanders), www.nerf.be/assets/uploads/pages/IEDM-2015_Luis.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- Horizons de politiques Canada (2013), *METASCAN3 – Technologies émergentes : une étude prospective explorant la façon dont les technologies émergentes vont façonner l'économie et la société, et les défis et les occasions que ces technologies vont créer*, Gouvernement du Canada, Ottawa, www.horizons.gc.ca/sites/default/files/Publication-alt-format/version_pdf_0239_7184kb-51pages.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- IERC (European Research Cluster on the Internet of Things) (2015), « Internet of Things: IoT governance, privacy and security issues », *IERC Position Paper*, Commission européenne, www.internet-of-things-research.eu/pdf/IERC_Position_Paper_IoT_Governance_Privacy_Security_Final.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- ISO (Organisation internationale de normalisation) (2012), *Nanomatériaux — Préparation des feuilles de données de sécurité des matériaux (MSDS), Définition 3.20*, www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:13329:ed-1:v1:fr (consulté le 7 mai 2016).
- Koch, C. et G. Marcus (2015), « Neuroscience in 2064 », in G. Marcus et J. Freeman (dir. pub.), *The Future of the Brain*, Princeton University Press, Princeton et Oxford.
- Kravitz, A. et A. Bonci (2013), « Optogenetics, physiology, and emotions », *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, vol. 7, n° 169, pp. 1-4, <http://dx.doi.org/10.3389/fnbeh.2013.00169>.
- Kuusi, O. et A.L. Vasamo (2014), *100 Opportunities for Finland and the World: Radical Technology Inquirer (RTI) for Anticipation/Evaluation of Technological Breakthroughs*, Committee for the Future, Helsinki, www.eduskunta.fi/FI/tietoeduskunnasta/julkaisut/Documents/tuvj_11+2014.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- López Peláez, A. et D. Kyriakou (2008), « Robots, genes and bytes: Technology development and social changes towards the year 2020 », *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 75, pp. 1176-1201, <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2008.01.002>.
- Maharbiz, M.M. (2015), « Neural dust: An untethered approach to chronic brain machine interfaces », in G. Marcus et J. Freeman (éd.), *The Future of the Brain*, Princeton University Press, Princeton et Oxford.
- Mak, J.N. et J.R. Wolpaw (2009), « Clinical applications of brain-computer interfaces: Current state and future prospects », *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 2, pp. 187-199, <http://dx.doi.org/10.1109/RBME.2009.2035356>.
- MarketsandMarkets (2014), *Additive Manufacturing & Material Market by Technology, by Material (Plastics, Metals, and Ceramics), by Application, and by Geography – Analysis & Forecast to 2014-2020*, MarketsandMarkets, Dallas.
- Mavroidis, C. et A. Ferreira (2013), *Nanorobotics: Current Approaches and Techniques*, Springer, New York.
- MGI (McKinsey Global Institute) (2011), *Big Data: The Next Frontier for Innovation, Competition and Productivity*, McKinsey & Company, www.mckinsey.com/business-functions/business-technology/our-insights/big-data-the-next-frontier-for-innovation (consulté le 7 mai 2016).
- MGI (2013), *Disruptive Technologies: Advances That Will Transform Life, Business and the Global Economy*, McKinsey & Company, www.mckinsey.com/business-functions/business-technology/our-insights/disruptive-technologies (consulté le 7 mai 2016).
- Motavalli, J. (2015), « Technology: A solid future », *Nature*, vol. 526, n° 7575, pp. 96-97, <http://dx.doi.org/10.1038/526S96a>.
- Nanowerk (2015), *Nanotechnology in cosmetics*, www.nanowerk.com/nanotechnology-in-cosmetics.php (consulté le 7 mai 2016).
- Nanowerk (2014), *Nanotechnology start-up develops a first-of-its-kind multifunction water filtration membrane*, www.nanowerk.com/nanotechnology-news/newsid=37320.php (consulté le 7 mai 2016).
- Nash, K.S. (2016), « Blockchain: Catalyst for massive change across industries », *The Wall Street Journal*, 2 février, <http://blogs.wsj.com/cio/2016/02/02/blockchain-catalyst-for-massive-change-across-industries/> (consulté le 7 mai 2016).
- Nijboer, F. et al. (2013), « The Asilomar survey: Stakeholders' opinions on ethical issues related to brain-computer interfacing », *Neuroethics*, vol. 6, pp. 541-578, <http://dx.doi.org/10.1007/s12152-011-9132-6>.
- Nuffield Council on Bioethics (2013), *Novel Neurotechnologies: Intervening in the Brain*, Nuffield Council on Bioethics, Londres, http://nuffieldbioethics.org/wp-content/uploads/2013/06/Novel_neurotechnologies_report_PDF_web_0.pdf (consulté le 7 mai 2016).

- OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) (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), *STI Micro-data Lab: Intellectual Property Database* (base de données sur la propriété intellectuelle, en anglais), <http://oe.cd/ipstats>.
- OCDE (2015a), *Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE 2015*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264243767-fr>.
- OCDE (2015b), *L'innovation fondée sur les données : Les données massives au service de la croissance et du bien-être*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264229358-en>.
- OCDE (2015c), « Enabling the Next Production Revolution », document de réflexion, OCDE, Paris, [www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DSTI/IND\(2015\)2&docLanguage=En](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DSTI/IND(2015)2&docLanguage=En).
- OCDE (2015d), *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 (2015e), *Testing Programme of Manufactured Nanomaterials* (page web), www.oecd.org/chemicalsafety/nanosafety/testing-programme-manufactured-nanomaterials.htm (consulté le 7 mai 2016).
- OCDE (2015f), « Affiner la réglementation pour favoriser des innovations majeures au sein des marchés financiers », document de réflexion de la Division de la concurrence de l'OCDE, OCDE, Paris, [www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DAF/COMP/WP2\(2015\)9&docLanguage=fr](http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=DAF/COMP/WP2(2015)9&docLanguage=fr) (consulté le 7 mai 2016).
- OCDE (2014a), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2014*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2014-fr.
- OCDE (2014b), *The Space Economy at a Glance 2014*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264217294-en>.
- OCDE (2014c), *Emerging Policy Issues in Synthetic Biology*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264208421-en>.
- OCDE (2013a), « Protection of privacy in the collection and use of personal health data », in *Strengthening Health Information Infrastructure for Health Care Quality Governance: Good Practices, New Opportunities and Data Privacy Protection Challenges*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264193505-9-en>.
- OCDE (2013b), « 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 (2011), *Nanosafety at the OECD: The First Five Years 2006-2010*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/env/ehs/nanosafety/47104296.pdf.
- Olson, R. (2013), « 3-D printing: A boon or a bane? », *The Environmental Forum*, vol. 30, n° 6, p. 34.
- Pagliery, J. (2015), « Record \$1 billion invested in Bitcoin firms so far », *CNN Money*, 3 novembre, <http://money.cnn.com/2015/11/02/technology/bitcoin-1-billion-invested/> (consulté le 7 mai 2016).
- Perera, C. et al. (2015), « Big Data Privacy in the Internet of Things Era », *IT Professional*, vol. 17, n° 3, <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/MITP.2015.34> (consulté le 7 mai 2016).
- Piniewski, B., C. Codagnone et D. Osimo (2011), *Nudging Lifestyles for Better Health Outcomes, Crowdsourced Data and Persuasive Technologies for Behavioural Change*, Union européenne, Luxembourg.
- Potomac Institute (2015), *Trends in Neurotechnology*, Potomac Institute for Policy Studies, Arlington, Virginie.
- Roland Berger (2014), « Les classes moyennes face à la transformation digitale : Comment anticiper ? Comment accompagner ? », *Think Act*, octobre, www.rolandberger.fr/media/pdf/Roland_Berger_TAB_Transformation_Digitale-20141030.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- Royal Academy of Engineering (2009), *Synthetic Biology: Scope, Applications and Implications*, Royal Academy of Engineering, Londres, www.raeng.org.uk/publications/reports/synthetic-biology-report (accessed 7 May 2016).
- Sample, I. (2015), « Genome editing: How to modify genetic faults – and the human germline », *The Guardian*, 2 septembre, www.theguardian.com/science/2015/sep/02/genome-editing-how-to-modify-genetic-faults-and-the-human-germline (consulté le 7 mai 2016).
- Santander Innoventures, Oliver Wyman et the Anthemis Group (2015), « The Fintech 2.0 paper: rebooting financial services » (site web), <http://santanderinnoventures.com/wp-content/uploads/2015/06/The-Fintech-2-0-Paper.pdf> (consulté le 7 mai 2016).

- Schermer, M. (2009), « The mind and the machine. On the conceptual and moral implications of brain-machine interaction », *Nanoethics*, vol. 3, n° 3, pp. 217-230, <http://dx.doi.org/10.1007/s11569-009-0076-9>.
- Shih, J.J., D.J. Krusienski et J.R. Wolpaw (2012), « Brain-computer interfaces in medicine », *Mayo Clinic Proceedings*, vol. 87, n° 3, pp. 268-279, <http://doi.org/10.1016/j.mayocp.2011.12.008>.
- SpaceWorks (2015), *2015 Small Satellite Market Observations*, SpaceWorks Enterprises Inc. (SEI), Atlanta (GA), www.spaceworksforecast.com/docs/SpaceWorks_Small_Satellite_Market_Observations_2015.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- SpaceWorks (2014), *2014 Nano/Microsatellite Market Assessment*, SpaceWorks Enterprises Inc. (SEI), Atlanta (GA), www.sei.aero/eng/papers/uploads/archive/SpaceWorks_Nano_Microsatellite_Market_Assessment_janvier_2014.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- Sriraman, N. et A. Fernandez (2015), *Good News: Pervasive Neurotechnology – The Digital Revolution Meets the Human Brain*, <http://sharpbrains.com/blog/2015/06/09/good-news-the-digital-revolution-meets-the-human-brain-as-evidence-by-the-explosion-of-neurotech-patent-filings/> (consulté le 7 mai 2016).
- Stephens, B. et al. (2013), « Ultrafine particle emissions from desktop 3D printers », *Atmospheric Environment*, vol. 79, pp. 334-339, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.050>.
- Suran, M. (2014), « A little hard to swallow? », *EMBO Reports*, vol. 15, n° 6, pp. 638-641, <http://dx.doi.org/10.15252/embr.201438925>.
- The Economist* (2015), « The great chain of being sure about things », *The Economist*, 31 octobre, www.economist.com/news/briefing/21677228-technology-behind-bitcoin-lets-people-who-do-not-know-or-trust-each-other-build-dependable (consulté le 7 mai 2016).
- Thomson, A. (2015), « Using the blockchain to fight crime and save lives », *TechCrunch*, 27 septembre, <http://techcrunch.com/2015/09/27/using-the-blockchain-to-the-fight-crime-and-save-lives/> (consulté le 7 mai 2016).
- Travis, J. (2015), « Germline editing dominates DNA summit », *Science Magazine*, vol. 350, n° 6266, pp. 1299-1300, <http://dx.doi.org/10.1126/science.350.6266.1299>.
- Tsuzuki, T. (2009), « Commercial scale production of inorganic nanoparticles », *International Journal of Nanotechnology*, vol. 6, n° 5, pp. 567-578, <http://dx.doi.org/10.1504/IJNT.2009.024647>.
- Ubaldi, B. (2013), « Open government data: Towards empirical analysis of open government data initiatives », *Documents de travail de l'OCDE sur la gouvernance publique*, n° 22, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5k46bj4f03s7-en>.
- UK GOS (Office gouvernemental de la science du Royaume-Uni) (2016), « Distributed Ledger Technology: beyond block chain », UK GOS, 19 janvier, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/492972/gos-16-1-distributed-ledger-technology.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- UK GOS (2012), *Technology and Innovation Futures: UK Growth Opportunities for the 2020s – 2012 Refresh*, Department for Business, Innovation and Skills, Londres, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/288562/12-1157-technology-innovation-futures-uk-growth-opportunities-2012-refresh.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- UK IPO (Office de la propriété intellectuelle du Royaume-Uni) (2014), *Eight Great Technologies: A summary of the series of patent landscape reports*, Royaume-Uni, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/360986/Eight_Great_Technologies.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- University of Massachusetts à Amherst (2014), « Promising new method found for rapidly screening cancer drugs » (communiqué de presse), www.umass.edu/newsoffice/article/promising-new-method-found-rapidly (consulté le 7 mai 2016).
- US Department of Energy (ministère de l'Énergie des États-Unis) (2014), *Energy Storage Safety Strategic Plan*, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Washington, DC, <http://energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/OE%20Safety%20Strategic%20Plan%20December%202014.pdf> (consulté le 7 mai 2016).
- US FAA (Agence fédérale de l'aviation des États-Unis) (2015), *2015 Commercial Space Transportation Forecasts*, FAA, Commercial Space Transportation (AST) et Commercial Space Transportation Advisory Committee (COMSTAC), Washington, DC, www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/Commercial_Space_Transportation_Forecasts_2015.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- US NASA (Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace) (2014), *Small Spacecraft Technology: State of the Art*, NASA/TP-2014-216648, NASA's Ames Research Center, Moffett Field, Californie, http://cmappublic3.ihmc.us/rid=1NG0S479X-29HLYMF-18L7/Small_Spacecraft_Technology_State_of_the_Art_2014.pdf (consulté le 7 mai 2016).

- Vance, M.E. et al. (2015), « Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory », *Beilstein Journal of Nanotechnology*, vol. 6, Beilstein-Institut, Francfort-sur-le-Main, pp. 1769-1780, <http://dx.doi.org/10.3762/bjnano.6.181>.
- VDI (Verein Deutscher Ingenieure) Technologiezentrum GmbH, Innovationsbegleitung und Innovationsberatung (2015), *Forschungs- und Technologieperspektiven 2030, Ergebnisband 2 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II*, Düsseldorf, www.bmbf.de/files/VDI_Band_101_C1.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- Vogel, J.B. (2013), « IP: 3D printing and potential patent infringement », *InsideCounsel*, 29 octobre, www.insidecounsel.com/2013/10/29/ip-3d-printing-and-potential-patent-infringement (consulté le 7 mai 2016).
- von Hippel, E. (2005), *Democratizing Innovation*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Wade, N. (2015), « Scientists seek moratorium on edits to human genome that could be inherited », *The New York Times*, www.nytimes.com/2015/12/04/science/crispr-cas9-human-genome-editing-moratorium.html (consulté le 7 mai 2016).
- Wohlers Associates (2014), *Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report*, Fort Collins, Colorado.
- Wolinsky, H. (2009), « Kitchen biology. The rise of do-it-yourself biology democratizes science, but is it dangerous to public health and the environment? », *EMBO Reports*, vol. 10, n° 7, pp. 683-685, www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2727445/ (consulté le 7 mai 2016).
- Wolpaw, J.R. (2010), « Brain-computer interface research comes of age: traditional assumptions meet emerging realities », *Journal of Motor Behaviour*, vol. 42, n° 6, pp. 351-353, <http://dx.doi.org/10.1080/00222895.2010.526471>.

Pour en savoir plus

- Autor, D.H. (2015), « Why are there still so many jobs? The history and future of workplace automation », *Journal of Economic Perspectives*, vol. 29/3, pp. 3-30, <http://dx.doi.org/10.1257/jep.29.3.3>.
- Donoghue, J. (2015), « Neurotechnology », in G. Marcus and J. Freeman (éd.), *The Future of the Brain: Essays by the World's Leading Neuroscientists*, Princeton University Press, Princeton et Oxford.
- Gokhberg, L. (éd.) (2016), *Russia 2030: Science and Technology Foresight*, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, National Research University Higher School of Economics, Moscou.
- Goldin, I. et A. Pitt (2014), « Future opportunities, future shocks: Key trends shaping the global economy and society », *Citi GPS: Global Perspectives & Solutions*, Oxford Martin School, www.oxfordmartin.ox.ac.uk/downloads/reports/Opportunities_Shocks_Citi_GPS.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- IEA-ETSAP et IRENA (International Renewable Energy Agency) (2012), « Electricity storage », *Technology Policy Brief E18*, Bonn, Germany, www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Electricity%20Storage%20-%20Technology%20Brief.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- IFR (International Federation of Robotics) (2015), *World Robotics 2015 Industrial Robots*, www.ifr.org/industrial-robots/statistics/ (consulté le 7 mai 2016).
- Mervis, J. (2016), *Updated: Budget Agreement Boosts U.S. Science*, American Association for the Advancement of Science, www.sciencemag.org/news/2015/12/updated-budget-agreement-boosts-us-science?_ga=1.94259668.816241758.1454942844#table (consulté le 7 mai 2016).
- NIC (National Intelligence Council) (2012), *Global Trends 2030: Alternative Worlds*, US NIC, Washington, DC, <https://globaltrends2030.files.wordpress.com/2012/11/global-trends-2030-november2012.pdf> (consulté le 7 mai 2016).
- OCDE (2008), *Inventory of National Science, Technology and Innovation Policies for Nanotechnology 2008*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/sti/nano/43348394.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- SCHER, SCENIHR et SCCS (2014), *Opinion on Synthetic Biology I: Definition*, Commission européenne, Luxembourg, http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_044.pdf (consulté le 7 mai 2016).
- Wolpaw, J.R. et E.W. Wolpaw (2012), « Brain-Computer Interfaces: Something New under the Sun », in *Brain-Computer Interfaces: Principles and Practice*, Oxford University Press, New York, <http://dx.doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195388855.001.0001>.

ANNEXE 2.A1

Exercices de prospective cartographiés dans ce chapitre

Canada – MetaScan3 : Technologies émergentes : Une étude prospective explorant la façon dont les technologies émergentes vont façonner l'économie et la société, et les défis et les occasions que ces technologies vont créer (2013)

Cette étude prospective canadienne a été menée par Horizons de politiques Canada pour le compte du gouvernement canadien. Le rapport a été publié en 2013 et s'appuie sur les exercices MetaScan de 2011 (Explorer quatre forces mondiales qui façonnent notre avenir) et 2012 (Renforcer la résilience en vue de la transition vers une économie numérique et une société en réseau). Il est le fruit de la collaboration d'experts issus des pouvoirs publics, du secteur privé, de la société civile et des milieux universitaires. L'étude a pour but d'aider à anticiper les défis et les possibilités de politique émergents, à explorer de nouvelles idées et à expérimenter des méthodes et technologies, dans l'optique d'éclairer les décideurs publics. Elle examine la façon dont diverses technologies émergentes, dans quatre domaines (technologies numériques, biotechnologies, nanotechnologies et neurosciences), pourraient provoquer des changements sociaux et économiques perturbateurs au Canada au cours des 10 à 15 prochaines années. Ses principales conclusions mettent en évidence plusieurs défis socio-économiques pour le Canada, notamment : les technologies émergentes permettront d'accroître la productivité, mais au détriment de l'emploi ; tous les secteurs de l'économie devront s'adapter aux nouvelles technologies ; les avantages compétitifs pourraient changer, ce qui générerait de nouvelles inégalités ; et il faudra bâtir une culture nationale d'innovation.

Union européenne – *Preparing the Commission for future opportunities: Foresight network fiches 2030 (2014)* [Préparer la Commission aux opportunités de demain : réseau pour la prospective, fiches 2030]

Cette étude, conduite par le réseau d'experts de la prospective de la Commission européenne, a été lancée en 2013 par le conseiller scientifique principal et le directeur général du Bureau des conseillers de politique européenne. Son objectif premier était d'engager une réflexion sur les sujets scientifiques et technologiques de demain, qui aide les services et directions de la Commission européenne à améliorer leurs processus de planification de l'action publique. Cet exercice, mené avec le soutien de divers experts internes et externes, se fonde sur les résultats de six ateliers couvrant des sujets tels que l'avenir de la société, l'accès aux ressources, la production et la consommation, ou la communication et la santé. L'horizon temporel était fixé à 15 ans. L'exercice met en lumière plusieurs défis et opportunités qui se profilent, en particulier la troisième révolution

industrielle, les frontières de plus en plus floues entre soins de santé et augmentation de l'être humain, ou le couplage entre politiques énergétiques et environnementales.

Finlande – 100 Opportunities for Finland and the World: Radical Technology Inquirer (RTI) for anticipation/evaluation of technological breakthroughs (2014) [Cent opportunités pour la Finlande et pour le monde : enquête sur les technologies de rupture pour l'anticipation/l'évaluation des percées technologiques]

Cette étude a été commandée par le Comité pour l'avenir, sous la houlette du Parlement finlandais. Elle examine 100 technologies émergentes s'inscrivant dans 20 réseaux de production de valeur différents, définis comme des pôles de demande et des domaines de changement créés par des mégatendances mondiales. En outre, un modèle de priorités à quatre niveaux reposant sur 25 indicateurs a été établi afin de noter les technologies de rupture au regard de leurs promesses et de leur potentiel pour répondre aux besoins des citoyens. Cet exercice s'est appuyé sur une étude systématique des sources en données ouvertes sur l'internet, sur des évaluations d'experts et sur la sollicitation d'opinions ouverte. Aucun horizon temporel global n'était fixé, mais la plupart des technologies dont il est question sont projetées à l'horizon 2020 ou 2030.

Allemagne – Forschungs- und Technologieperspektiven 2030: Ergebnisband 2 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II (2015) [Perspectives 2030 pour la recherche et les technologies : deuxième rapport de présentation des résultats de la phase de recherche du deuxième cycle d'étude prospective du ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche]

Cette étude, la dernière en date d'une longue série d'exercices de prospective nationale réalisés en Allemagne, a été menée par VDI (Verband Deutscher Ingenieure, association des ingénieurs allemands) Technologiezentrum GmbH et FhG-ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung), sous la houlette du ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (BMBF). Elle a retenu une approche en trois étapes : tout d'abord, cerner les défis et tendances sociétaux qui se dégageront d'ici 2030 (Ergebnisband 1). Ensuite, mettre en évidence les perspectives pour la recherche et les technologies présentant un potentiel élevé d'applications (Ergebnisband 2). Enfin, identifier les nouveaux défis à l'interface entre la société et la technologie (Ergebnisband 3). La cartographie présentée ici s'appuie sur les résultats de la deuxième étape (Ergebnisband 2). Cet exercice a été mené dans l'intention générale d'établir des lignes directrices pour faire face aux défis sociétaux et technologiques de demain et de faciliter l'élaboration de politiques publiques propices à la résilience, les résultats devant servir de base à des discussions au sein du BMBF ainsi que pour le secteur privé, avec un horizon temporel fixé à 2030.

Royaume-Uni – Technology and Innovation Futures: UK Growth Opportunities for the 2020s – 2012 Refresh (2012) [Avenirs de la technologie et de l'innovation : opportunités de croissance pour le Royaume-Uni pour les années 2020, actualisation 2012]

Cette étude a été menée par le Cabinet gouvernemental pour la science dans le but d'examiner le potentiel de rupture sur le plan économique des évolutions technologiques à venir et des nouvelles tendances émergentes à un horizon de 20 ans. Cet exercice, actualisation d'une étude antérieure réalisée en 2010, identifie 53 technologies susceptibles

d'être importantes pour renforcer l'avantage concurrentiel britannique de demain. Plusieurs entretiens et ateliers ont été conduits avec des représentants de l'industrie, du monde de la recherche et d'entreprises sociales, et une enquête a été menée en vue de recueillir les opinions sur les technologies émergentes. Les nouvelles opportunités potentielles ont été regroupées par domaine comme suit : biotechnologie et pharmacie ; matériaux et nanotechnologie ; numérique et réseaux ; énergie et technologies bas carbone. C'est sur cette étude que s'est appuyé le gouvernement britannique pour donner la priorité à certaines technologies émergentes.

Fédération de Russie – *Russia 2030: Science and Technology Foresight (2016)* [Russie 2030 : prospective pour la science et la technologie]

Cette étude a été menée par le ministère de l'Éducation et de la Science en coopération avec l'Université nationale de recherche « École des hautes études en sciences économiques » (EHESI). Elle avait pour objectif de cerner les domaines de la science et de la technologie les plus prometteurs, à même de jouer un rôle décisif dans la résolution des problèmes sociaux et économiques, tout en permettant au pays de concrétiser ses atouts. Elle a bénéficié de l'expertise de divers organismes russes, notamment des universités, des entreprises, des plateformes technologiques et des centres de recherche de pointe. Cette étude examine, à un horizon de 15 ans, les défis mondiaux ainsi que les opportunités et les menaces qui y sont associées, les marchés de l'innovation de demain, les technologies, produits et recherches émergents, regroupés en sept domaines prioritaires : TIC ; biotechnologie ; médecine et soins de santé ; nouveaux matériaux et nanotechnologies ; gestion de l'environnement ; transports et systèmes spatiaux ; maîtrise de l'énergie et économies d'énergie.

ANNEXE 2.A2

Cartographie des études prospectives par filière technologique

Tableau A2.1. **Cartographie des études prospectives – Biotechnologies**

CAN	DEU	EU	FIN	GBR	RUS
	Épigénétique, épigénomique, protéomique		Cellule artificielle	Génomique, protéomique et épigénétique	Techniques de génomique et de protéomique comparatives, création de bases de données du génome humain
Séquençage de l'ADN des patients et médecine personnalisée	Séquençage systématique et complet de l'ADN, technologies ARN, métabolomique	Empreinte génétique et génomes individuels	Séquençage systématique et complet de l'ADN	Acides nucléiques	Séquençage de l'ADN de la totalité du génome, analyse du protéome humain, profils transcriptionnels et épigénétiques
Biologie synthétique	Biologie de synthèse, systèmes de bioproduction acellulaire, génie métabolique appliqué en ingénierie directe	Biologie de synthèse	Organismes génétiquement modifiés, supports de mémoire artificiels (stockage sur ADN)	Biologie de synthèse	Biologie de synthèse, génie métabolique, génie biologique, processus de biosynthèse visant à produire des composés biologiquement actifs
Biologie computationnelle	Ordinateurs biomoléculaires				
	Biosynthèse de protéines membranaires, diagnostics compagnons	Médecine personnalisée		Médecine stratifiée et personnalisée	Diagnostic moléculaire, candidats médicaments prometteurs
			Culture de cellules (souches)	Cellules souches	Technologies cellulaires biomédicales, culture de cellules humaines
	Ralentissement des processus de vieillissement		Allongement de la durée de vie et ralentissement des processus cellulaires		
Ingénierie tissulaire		Médecine régénérative et ingénierie tissulaire, prothèses et organes artificiels	Médecine régénérative et ingénierie tissulaire	Médecine régénérative et ingénierie tissulaire	Techniques de régénération de tissus et organes humains, équivalents tissulaires et organes humains artificiels, techniques immunologiques
	Technologies de laboratoire sur puce		Biopuces et biocapteurs	Laboratoire sur puce	Technologies de systèmes sur puce

Tableau A2.1. **Cartographie des études prospectives – Biotechnologies** (suite)

CAN	DEU	EU	FIN	GBR	RUS
	Combinaison de diagnostic moléculaire et d'applications d'imagerie		IRM portable	Imagerie médicale et biologique	Métamatériaux et logiciels pour traiter et transférer des images haute résolution
		Augmentation de l'être humain		Médicaments renforçant les performances	
Contrôle de la santé en dehors des conditions cliniques	E-santé, applications mobiles de diagnostic, quantification de soi		Suivi continu de la santé des individus, autogestion de la santé s'appuyant sur la médecine personnalisée	E-santé	
Technologies dans le domaine de la neuroscience, neurostimulation				Modélisation du comportement humain	Interfaces pour la photostimulation neuronale
	Bionique, électronique organique, prothèses high-tech, chirurgie assistée par ordinateur, connexion entre des parties du corps artificielles et des cellules nerveuses		Biorobots, jambes robotiques, exosquelette, chirurgie robotique, doigts et mains robotiques sensibles		
Interface cerveau-ordinateur	Interface cerveau-machine, cartographie du cerveau	Émulation du cerveau	Implants cérébraux	Interface cerveau-machine	
					Systèmes de vie artificielle, dont éléments de cellules artificielles et cellules chimériques
				Technologies de capteurs	Capteurs haute sensibilité pour paramètres physiques et physiologiques
	Nutrigénomique, aliments fonctionnels, enrichissement des aliments, nutraceutique et alicaments	Aliments innovants	Aliments fonctionnels, viande <i>in vitro</i> , protéines végétales ressemblant à des protéines animales		Aliments fonctionnels thérapeutiques, additifs biologiquement actifs, technologies des protéines alimentaires
Centres de bioproduction agricoles, récoltes génétiquement modifiées		Agriculture de précision		Technologies agricoles	Centre de bioproduction, centres de ressources biologiques et recueil d'échantillons biologiques, biotechnologies forestières
Gestion et récolte des ressources durables (ressources halieutiques et forestières)		Pêche/ aquaculture			Aquabioculture
Bioproduction de matières premières	Nouveaux biocatalyseurs		Médicaments issus d'organismes génétiquement modifiés, médicaments pour la prévention de la démence	Biotechnologie industrielle	Enzymes industrielles et biocatalyseurs

Tableau A2.2. **Cartographie des études prospectives – Matériaux avancés**

CAN	DEU	EU	FIN	GBR	RUS
Nanodispositifs et nanocapteurs, nanotechnologie pour l'énergie	Nanotechnologies	Nanoélectronique	Nanorobots (nanobots) au service de la santé, nanoradio	Nanotechnologies	
Nanomatériaux		Nanomatériaux	Nanomatériaux	Nanomatériaux	Matériaux nanostructurés à mémoire de forme et matériaux « autoréparables », nanomatériaux biocompatibles
	Le graphène pourrait remplacer l'indium	Graphène et nouvelles technologies connexes	Fibres ou fils de nanotubes de carbone	Nanotubes de carbone et graphène	Composants électroniques fondés sur le graphène, le fullerène, les nanotubes de carbone, les boîtes quantiques
				Polymères intelligents (plastronique)	Polymères de nouvelle génération (par exemple, optoélectronique), monomères pour polymères biodégradables, matériaux supraconducteurs
			Matériaux fonctionnels	Matériaux intelligents (multifonctionnels) et matériaux biométriques	Matériaux hybrides, matériaux biomimétiques et matériaux médicaux
	Matériaux céramiques résistant à la chaleur pour augmenter l'efficacité énergétique				Matériaux et revêtements composites et céramiques nanostructurés présentant des propriétés thermiques spéciales
	Construction légère, fibres composites		Nouveaux matériaux de construction	Bâtiment et matériaux de construction	Construction, matériaux et revêtements fonctionnels, nouveaux types de matériaux légers très résistants
Construction de maisons imprimées en 3D	Prototypage rapide et fabrication rapide (impression 3D), bio-impression	Impression 3D	Impression 3D et bio-impression	Impression 3D et fabrication par des particuliers	Technologies additives
	Écrans tactiles flexibles		Réalité augmentée, écrans haptiques		

Tableau A2.3. **Cartographie des études prospectives – Technologies numériques**

CAN	DEU	EU	FIN	GBR	RUS
	Technologie de l'information quantique, processeurs multi-cœurs, bases de données en mémoire	Informatique de haute performance	Processeurs tenant compte des phénomènes quantiques, nouvelles technologies de stockage de données	Calcul intensif	Systèmes de modélisation prédictive utilisant des superordinateurs
	Informatique en nuage, calcul distribué	Informatique en nuage	Informatique en nuage, calcul distribué	Informatique en nuage	Informatique en nuage, logiciels et algorithmes de calcul distribué pour solutions distribuées
	Cyberapprentissage	Enseignement et apprentissage de demain	École en nuage		
				Réseaux de la prochaine génération	Émergence d'environnements de gestion unifiée, transfert de données à haute vitesse

Tableau A2.3. **Cartographie des études prospectives – Technologies numériques (suite)**

CAN	DEU	EU	FIN	GBR	RUS
Internet des objets « ambulants »	Réseaux intelligents, systèmes de capteurs ubiquitaires, internet des objets (industrie 4.0) Vêtements avec dispositifs et capteurs électroniques intégrés (« vêtements connectés »)	Internet des objets	Internet pour les robots Textiles à vaporiser, robot tailleur	Réseaux de capteurs intelligents et informatique ubiquitaire Habillement connecté, textiles connectés	Internet des objets, technologies de communication entre machines (M2M)
			Microfinance et financement participatif, banques de temps, monnaie électronique		
	Jeux sérieux sur le thème de la santé		Ludification		
	Données massives	Données massives	Données ouvertes et données massives		Traitement et analyse de données
		Modèles et données pour la prise de décision		Recherche et prise de décision	
	Analytique visuelle, analytique prédictive, simulation des propriétés des matériaux		Simulation et cartographie du cerveau, analytique prédictive fondée sur les données auto-organisatrices	Simulation et modélisation	Modélisation prédictive, modélisation informatique de matériaux et procédés
	Photonique, systèmes lithographiques, systèmes optiques de mesure, optique quantique, micro- et nanomatériaux photoniques	Photonique et technologies légères	Lidar à bas coût, lasers haute performance	Photonique	Matériaux nanostructurés avec propriétés optiques spéciales, lasers et diodes électroluminescentes organiques fondées sur des hétérostructures à la nano-échelle
Fin de la confidentialité	Nouvelles méthodes cryptographiques et biométriques, technologies de renforcement de la protection de la vie privée, médecine légale numérique	Cybersécurité	Captage et sondage de contenus de la vie personnelle	Communication sécurisée, surveillance	Sécurité de l'information
			Services de reconnaissance de formes et de recherche de formes	Biométrie	
Intelligence artificielle			Intelligence artificielle		Algorithmes et logiciels pour l'apprentissage automatique, appareils numériques avec propriétés de répliation et/ou d'autoréparation
Robots pour l'acquisition de ressources traditionnelles et sous-marines, robots à la ferme	Ingénierie des services			Robotique de service et robotique en essai	Assistants robots se déplaçant librement et interagissant avec les personnes, systèmes de nano- et de microrobotique

Tableau A2.4. Cartographie des études prospectives – Énergie et environnement

CAN	DEU	EU	FIN	GBR	RUS
	Réseaux intelligents, réseaux superposés, super-réseaux	Villes intelligentes du futur		Réseaux intelligents	Réseaux intelligents, technologies de transport longue distance de l'énergie (électricité ou combustible), électronique de puissance de nouvelle génération
Filières énergétiques décentralisées	Microénergie			Microproduction d'électricité	Microprocesseurs de nouvelle génération pour l'électronique de puissance
	Technologies de stockage et de conversion électrochimique		Batteries légères à charge rapide, supercondensateurs	Batteries avancées	Stockage de l'énergie électrique et thermique
			Transfert d'électricité sans fil		
Véhicules électriques et hybrides	Mobilité électrique, technologies <i>power-to-liquid</i> pour le secteur de la mobilité	Société post-carbone, réutilisation du dioxyde de carbone	Voitures sans conducteur	Véhicules routiers intelligents bas carbone	
Véhicules autonomes et semi-autonomes	Mobilité connectée, communication voiture-voiture, communication voiture-infrastructure, mobilité intelligente	Systèmes autonomes avancés, mobilité du futur	Automatisation de la circulation des voitures particulières, vactrains (transport sous vide), sustentation magnétique ou utilisant la supraconductivité		Transport intelligent et nouveaux systèmes de contrôle, systèmes visant à augmenter l'efficacité énergétique des véhicules et à réduire leur impact sur l'environnement
	Concepts non conventionnels d'aéronefs	Drones	Minisatellites, quadcoptères, drones, transport aérien individuel à la demande		Micro-, nano- et pico-satellites
	Piles à combustible			Piles à combustible	Piles à combustible
		« Société de l'hydrogène »	Stockage à bas coût de l'hydrogène dans des nanostructures	Hydrogène	Production et stockage sûr de l'hydrogène, hydrogène pour la production d'électricité
		Technologies de recyclage		Technologies de recyclage	Technologies de recyclage
	Mesures en faveur de l'efficacité énergétique				Bâtiments à faible consommation énergétique, nouvelles sources lumineuses et systèmes d'éclairage intelligents
		Captage et stockage du carbone		Captage et stockage du carbone, réseaux organométalliques	
			Petits réacteurs nucléaires	Fission nucléaire	Cycle du combustible fermé, réacteurs de petite et moyenne puissance
				Fusion nucléaire	
Bioénergie	Biocarburants, bioraffineries, biocatalyseurs, biomasse, biogaz, bioéthanol et biohydrogène		Production de biocarburants avec des enzymes, des bactéries ou des algues	Bioénergie et « émissions négatives »	Technologies de production de biomasse-énergie et de traitement de la biomasse
Photopiles de haute performance	Production solaire thermique et photovoltaïque		Panneaux solaires efficaces et légers, feuilles artificielles et carburants de synthèse, chaleur solaire	Technologies solaires	Technologies solaires

Tableau A2.4. **Cartographie des études prospectives – Énergie et environnement** (suite)

CAN	DEU	EU	FIN	GBR	RUS
				Énergie marine et marémotrice	Nouvelles technologies de production hydroélectrique
Technologies éoliennes	Technologies éoliennes		Éoliennes volantes et autres nouvelles façons d'exploiter l'énergie éolienne	Technologies éoliennes	Technologies éoliennes
			Sources d'énergie piezoélectrique, récupération de l'énergie cinétique		
			Stockage de longue durée de la chaleur		Centrales de cogénération de haute performance au gaz naturel
					Traitement poussé des condensats de gaz et de pétrole, gaz de pétrole associé
					Surveillance de l'état de l'environnement, prévisions météorologiques à long terme, systèmes de télésurveillance

Chapitre 3

L'avenir des systèmes scientifiques

Le présent chapitre est consacré aux systèmes publics de recherche et aux transformations qu'ils vont connaître, selon toute vraisemblance, au cours des 10 à 15 prochaines années. Animés par des dynamiques qui leur sont propres – par exemple en ce qui concerne le financement de la recherche, les lieux et modalités de son exécution et de la divulgation de ses résultats, le parcours professionnel des chercheurs –, ces systèmes n'en sont pas moins sensibles à certains changements affectant plus généralement les économies et les sociétés. On verra ici quelles seraient les implications potentielles de ces changements pour la recherche publique, en sondant l'avenir de celle-ci au moyen des huit grandes questions suivantes : Quelles seront les ressources consacrées à la recherche publique ? Qui pourvoira à son financement ? Quels travaux de recherche publique mènera-t-on, dans quel but ? Qui se chargera de ces travaux ? Comment s'organiseront-ils ? À quoi ressemblera la carrière d'un chercheur du public ? Quels seront les résultats et impacts attendus de la recherche publique ? À quoi ressembleront la politique et la gouvernance de la recherche publique ?

Introduction

La recherche publique joue, dans les systèmes d'innovation, un rôle clé consistant à apporter de nouvelles connaissances et de nouveaux savoir-faire, à même de favoriser l'éclosion de technologies inédites et bénéfiques pour l'économie ou la société, auxquels les entreprises ne sont pas nécessairement prêtes à consacrer des investissements, soit qu'elles n'en aient pas les moyens, soit que les incitations en ce sens ne soient pas suffisantes (voir le profil « Missions et orientation de la recherche publique »). Nombre des innovations que nous connaissons aujourd'hui n'auraient jamais vu le jour si la recherche publique n'avait permis certaines avancées de la science et de la technologie. Parmi les exemples les plus connus, citons les techniques de recombinaison génétique, le système de géolocalisation par satellite (GPS), le format MP3 de stockage de données et la reconnaissance vocale, utilisée entre autres par l'application Siri d'Apple.

Les universités et les établissements publics de recherche (EPR) entreprennent souvent des travaux de plus longue haleine dont le niveau de risque est relativement élevé. Quoiqu'ils ne représentent pas 30 % du total des dépenses de recherche-développement (R-D) de l'OCDE, ils assurent plus des trois quarts des activités de recherche fondamentale. Ils mènent également quantité de travaux de recherche appliquée et d'expérimentation susceptibles d'apporter, à brève échéance cette fois-ci, des bienfaits tangibles pour la société. De par le rôle prépondérant qui est le leur dans le financement et la structuration de la recherche publique, les gouvernements sont à même d'influer sur les systèmes scientifiques nationaux et mondiaux bien au-delà des frontières administratives et institutionnelles du secteur public.

Les systèmes publics de recherche sont sous l'influence de bon nombre des mégatendances et des courants technologiques dont il a déjà été question dans les chapitres qui précèdent. Ainsi, les enjeux liés à l'environnement et à la santé marqueront profondément les programmes de recherche futurs tandis que les progrès de la technologie, en particulier ceux du numérique, auront une incidence sur les modalités d'exécution de la recherche. À côté de cela, ces systèmes sont animés par des tendances qui leur sont propres, par exemple en ce qui concerne le financement de la recherche, les lieux et modalités de son exécution et de divulgation de ses résultats, le parcours professionnel des chercheurs. Ces tendances spécifiques, qui procèdent bien entendu de mégatendances et d'évolutions technologiques de plus grande ampleur, obéissent aussi à des dynamiques qui dépendent des cadres institutionnels et organisationnels caractérisant de longue date les systèmes publics de recherche. Elles sont également déterminées par les ressources accumulées au fil du temps, ressources parmi lesquelles on trouve les actifs matériels et immatériels et le capital humain. Ces cadres et ressources nous donnent un filtre à travers lequel il est possible d'observer les tendances suivies par la recherche publique.

Si certaines des problématiques traitées dans le présent chapitre sont encore en train d'émerger, la plupart se rapportent à des tendances amorcées depuis bien longtemps déjà et qui pourraient évoluer en termes quantitatifs et/ou qualitatifs au cours des 10 à

15 prochaines années. C'est le cas de la phase d'expansion dans laquelle la recherche publique est entrée au niveau mondial ; de la diversification de la palette des acteurs publics et privés qui participent au financement de cette recherche ; des progrès du numérique et de l'internationalisation dans le champ scientifique, appelés à favoriser la science ouverte et à faire croître les attentes quant à la contribution de la recherche publique dans les économies et les sociétés. Toutes ces problématiques sont intimement liées : les tendances peuvent parfois être concordantes, mais elles sont plus souvent antagoniques, ce qui donne lieu à des conflits et des controverses susceptibles de mener à leur rupture ou de les perturber. Aussi l'avenir des systèmes publics de recherche est-il, à plus d'un égard, nimbé d'incertitude.

Le présent chapitre donne à voir, en un aperçu soigné, les principales tendances et problématiques susceptibles d'agir sur les systèmes publics de recherche dans les 10 à 15 années qui viennent. Il s'appuie sur certaines analyses de tendances réalisées pour l'édition 2014 des *Perspectives STI* (OCDE, 2014a), et extrapole sur le futur en s'appuyant en partie sur les mégatendances abordées au chapitre 1 ainsi que sur les tendances technologiques présentées au chapitre 2. Il a été établi sur la base de recherches

Graphique 3.1. **Vue d'ensemble et points principaux abordés dans le chapitre 3**



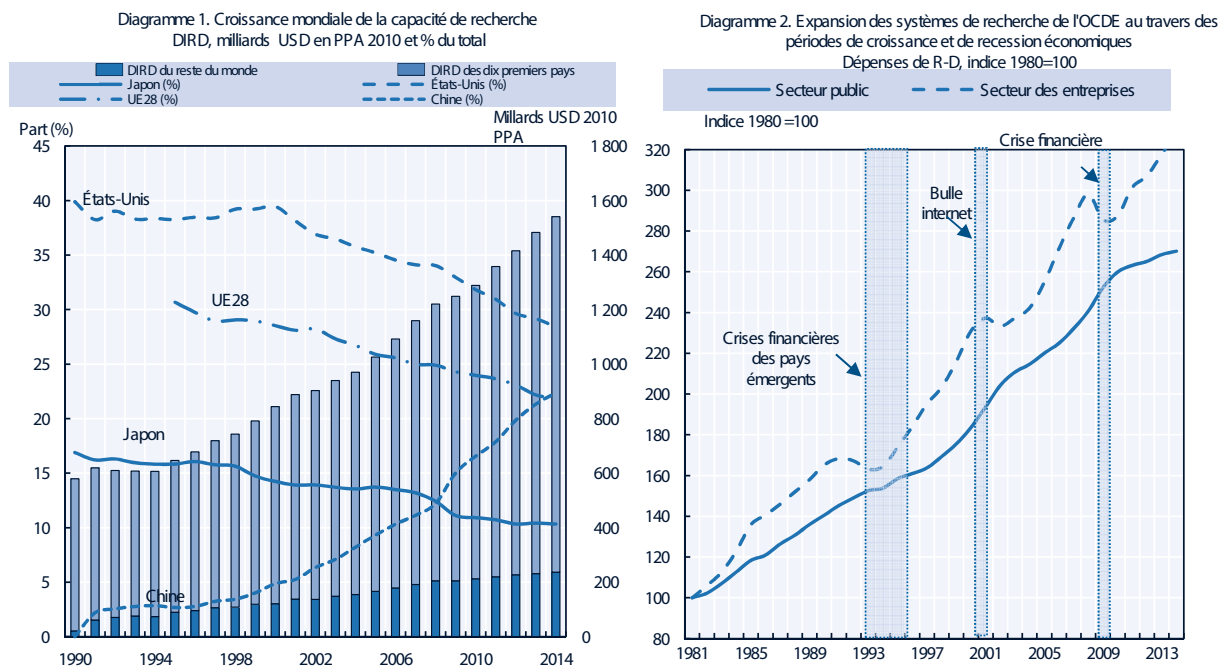
documentaires, d'une série d'ateliers d'experts internes et externes ainsi que d'entrevues avec des experts internationaux et des universitaires sur l'avenir des systèmes scientifiques. Ce chapitre s'articule autour de huit grandes questions touchant les ressources et bailleurs de fonds de la recherche publique, son exécution et ses répercussions, les parcours professionnels des chercheurs ainsi que sa politique et sa gouvernance, comme représenté sur le graphique 3.1.

3.1. Quelles seront les ressources consacrées à la recherche publique ?


Les capacités mondiales de R-D ont doublé ces 15 dernières années¹ (graphique 3.2, diagramme 1) et cette expansion remarquable est portée par deux facteurs importants. En premier lieu, les entreprises occupent une place grandissante dans la R-D mondiale, les dépenses qu'elles lui consacrent ayant davantage progressé que celles du secteur public en période de croissance économique (graphique 3.2, diagramme 2). Même si les entreprises vont continuer de miser sur l'investissement incorporel et l'innovation pour être compétitives sur les marchés mondiaux, il n'est pas exclu que la progression de leurs dépenses de R-D marque le pas, si elle ne connaît pas un coup d'arrêt. La faiblesse des derniers résultats économiques, conjuguée aux stratégies d'investissement favorisant la création de valeur actionnariale à court terme, est de nature à rendre les entreprises à la fois moins aptes et plus réticentes à se lancer dans des projets qui comportent une certaine part de risque et à investir dans des activités de recherche (voir le chapitre 4). Un ralentissement

Graphique 3.2. Les investissements publics et des entreprises ont augmenté la capacité de recherche mondiale

Changements à long terme des dépenses intérieures brutes de R-D (DIRD)



Sources : D'après OCDE (2016a), *Principaux indicateurs de la science et de la technologie* (base de données PIST), www.oecd.org/fr/sti/pist.htm ; Eurostat (2016), Bases de données sur les indicateurs de la R-D, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/science-technology-innovation/data/main-tables> ; Institut de Statistique de l'UNESCO (ISU) (2016), Indicateurs concernant la science et la technologie, www.uis.unesco.org/ScienceTechnology/Pages/defaultFR.aspx. Les données ont été extraites depuis la plateforme des politiques d'innovation IPP.stats le 22 juillet 2016, www.innovationpolicyplatform.org/content/statistics-ipp.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433354>

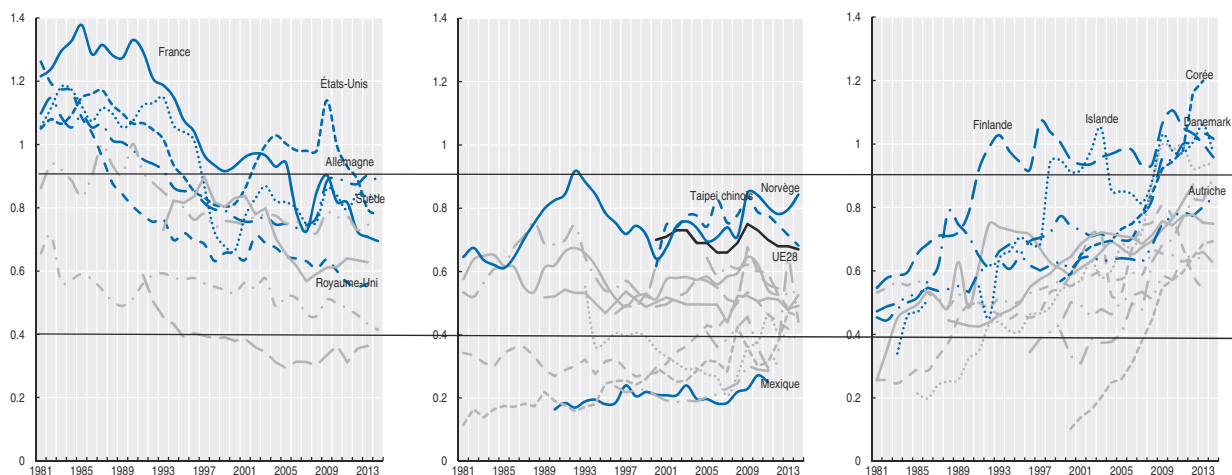
de leurs investissements consacrés aux actifs immatériels s'est d'ailleurs fait sentir dans de nombreux pays de l'OCDE, ralentissement qui est susceptible à la longue de perturber l'accumulation de savoir et de compromettre les capacités futures de R-D des entreprises.

En second lieu, plusieurs économies émergentes, dont la République populaire de Chine, ont augmenté leurs dépenses de R-D depuis quelques décennies. Les pays de l'OCDE n'ont apporté qu'une contribution limitée à l'accroissement des capacités de R-D relevé au niveau mondial, où leur part dans les dépenses intérieures brutes de R-D (DIRD) accuse un recul (graphique 3.2, diagramme 1) qui semble appelé à se poursuivre compte tenu du poids grandissant des puissances émergentes dans l'économie mondiale. Cependant, plusieurs d'entre elles présentent déjà les signes d'un ralentissement économique qui les rendra sans doute moins à même de grossir leurs dépenses de R-D autant qu'elles ont pu le faire ces dernières années.


Le vieillissement démographique et la croissance économique moins soutenue viendront tous deux peser lourdement sur les dépenses publiques de nombreux pays de l'OCDE au cours des 10 à 15 années qui viennent : il est même possible que la concurrence d'autres postes de dépense, comme la santé et les retraites, pour l'affectation des ressources disponibles donne lieu à une érosion de l'investissement public en R-D. De fait, les dernières données dont on dispose révèlent que les budgets publics de R-D, exprimés en pourcentage du PIB, s'affichent en régression en bien des endroits de la zone OCDE sous l'effet des mesures d'austérité que les États ont mises en place avec le sortir de la crise (graphique 3.3). Mais l'investissement en R-D pourrait aussi se concevoir comme un moyen de maîtriser les dépenses dans d'autres domaines de l'action publique, par exemple en stimulant l'apparition d'innovations à même de répondre à des problématiques telles que le vieillissement en bonne santé, ce qui permettrait de réaliser des économies.

Graphique 3.3. Les budgets publics de R-D sont susceptibles de se stabiliser autour des ratios actuels

Crédits budgétaires du gouvernement et dépenses pour la R-D, en % du PIB



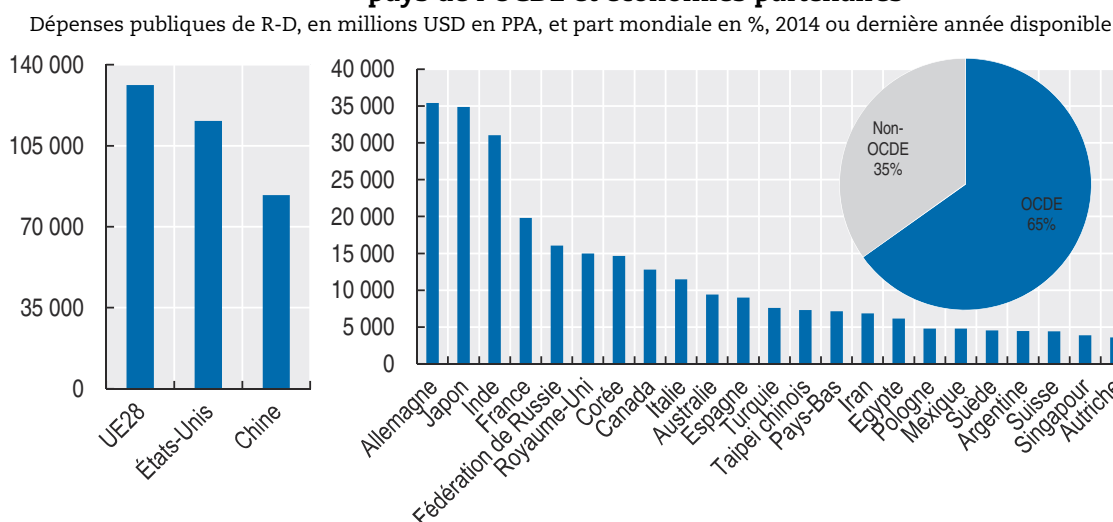
Note : Le diagramme 1 (budgets décroissants) inclut l'Allemagne, l'Australie, la France, Israël, les Pays-Bas, la Pologne, le Royaume-Uni, la Suède et les États-Unis ; le diagramme 2 (budgets stables ou augmentant légèrement) inclut l'Argentine, le Canada, la Grèce, la Hongrie, l'Irlande, l'Italie, le Mexique, la Norvège, la Nouvelle-Zélande, la République slovaque, la Slovénie, le Taïpei Chinois et l'UE28 ; le diagramme 3 (budgets augmentant rapidement) inclut l'Autriche, la Belgique, la Corée, le Danemark, l'Espagne, l'Estonie, la Finlande, l'Islande, le Japon, le Luxembourg, le Portugal et la République tchèque.

Source : D'après OCDE (2016b), *Statistiques de la recherche et développement (SRD)* (base de données), www.oecd.org/fr/innovation/inno/srd.htm.
StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433363>

Les tendances à long terme dénotent une convergence entre les pays pour ce qui est de l'intensité des crédits budgétaires publics de R-D (CBPRD) exprimée en pourcentage du PIB (graphique 3.3). Sans doute ces crédits ont-ils atteint le maximum de leur intensité. Aux deux extrémités de la fourchette on trouve, d'une part, divers pays à faible revenu d'Europe centrale et d'Amérique latine, pour la partie basse, et, d'autre part, la Corée, plusieurs pays nordiques (Danemark, Islande et Finlande) et l'Allemagne, pour la partie haute. Il faut en conclure que les hausses des crédits publics de R-D que l'on observera dans l'avenir seront vraisemblablement dictées par la croissance du PIB, laquelle doit en principe fléchir au niveau mondial (voir le chapitre 1).

Il est dès lors possible que les économies émergentes accèdent à un rôle plus important pour autant qu'elles conservent une croissance soutenue, ce qui est loin d'être assuré. Déjà la recherche scientifique n'est plus l'apanage des économies à revenu élevé puisque plus du tiers de ses activités financées par le secteur public le sont dans des pays qui n'appartiennent pas à l'OCDE (graphique 3.4). Ainsi, la Chine, deuxième puissance scientifique mondiale, a dépensé pour la R-D publique environ deux fois plus que le Japon en 2014. De même, l'Inde, la Fédération de Russie, le Taipei chinois, la République islamique d'Iran et l'Argentine entretiennent quelques-uns des plus vastes systèmes scientifiques publics au monde. La recherche mondiale pourrait dès lors acquérir un caractère multipolaire plus marqué, l'Asie étant destinée en particulier à prendre une place toujours plus importante dans le nouveau paysage qui se dessine. Quoi qu'il en soit, une poignée d'économies sera sans doute en position d'hégémonie : 5 (les États-Unis, la Chine, le Japon, l'Allemagne et l'Inde) représentaient à elles seules 59 % de la R-D publique en 2014, et 25 (membres de l'OCDE ou non), 90 % du total. Si un petit nombre d'économies ont ainsi la prépondérance, c'est en partie en raison de leur grande taille. À plus long terme, celles dont la population et le PIB devraient progresser de façon notable, en Afrique par exemple, ont de bonnes chances de devenir des acteurs qui comptent sur la scène mondiale de la R-D.

Graphique 3.4. **La recherche publique mondiale s'effectue dans quelques pays de l'OCDE et économies partenaires**



Notes : Les dépenses publiques de R-D comprennent les dépenses de R-D de l'enseignement supérieur (DIRDES) et celles du secteur de l'État (DIRDET). Le total mondial a été estimé pour les pays pour lesquels des données étaient disponibles. Le Brésil n'est pas inclus.

Source : D'après OCDE (2016b), *Statistiques de la recherche et développement (SRD)* (base de données), avril, www.oecd.org/fr/innovation/inno/srd.htm. Les données ont été extraites depuis la plateforme des politiques d'innovation IPP.stats le 26 juillet 2016, www.innovationpolicyplatform.org/content/statistics-ipp.

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433376>

3.2. Qui pourvoira au financement de la recherche publique ?

La recherche publique se trouverait aux prises avec de nombreux problèmes si les gouvernements des pays de l'OCDE devaient décider de donner un tour de vis budgétaire, ceux-ci finançant les dépenses de R-D de l'enseignement supérieur et de l'État à hauteur de 90 % de leur total (graphique 3.5). Cette prédominance des fonds publics dans son financement est particulièrement flagrante dans les pays qui sont les principaux exécutants de la R-D publique, le Japon (98 %) et les États-Unis (96 %), et tend à tirer la moyenne OCDE vers le haut. Il en va de même pour quelques économies émergentes, par exemple, en Argentine (99 %), au Mexique (98 %) et au Chili (95 %). La recherche publique est légèrement moins dépendante des fonds nationaux dans l'Union européenne (83 %), dont la moyenne est lestée par les Pays-Bas (72 %), la Belgique (71 %) et le Royaume-Uni (70 %). Les fonds de la Commission européenne sont également importants. Cela est particulièrement vrai dans les pays du Sud et de l'Est du continent qui reçoivent un appui substantiel à la R-D par le truchement de fonds structurels et de fonds de cohésion, au titre d'un programme régional européen destiné à corriger les inégalités de revenu, de richesse et de chances au sein de l'Union (CE/OCDE, à paraître).

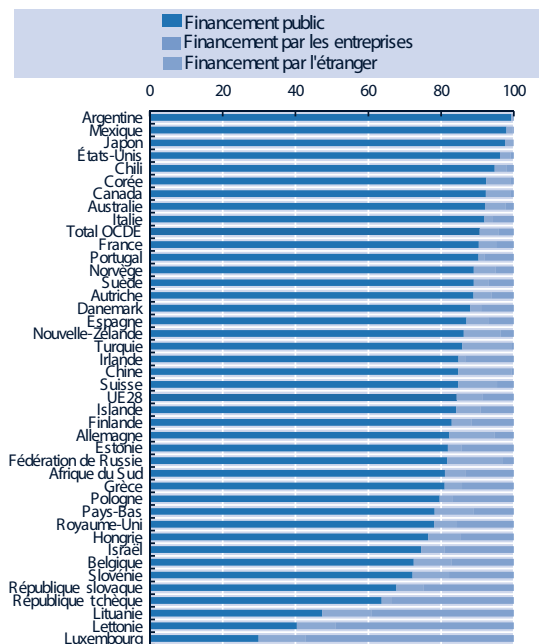
Nonobstant les contraintes financières, les pays resteront pour autant que l'on puisse prévoir les principaux bailleurs de fonds de la recherche publique, même si les entreprises vont probablement accroître leur participation financière, compte tenu, d'une part, de la contraction des crédits publics et, d'autre part, de l'intérêt que présentent, pour l'industrie, l'accès à des connaissances complémentaires et le partage des risques. Les universités sont plus susceptibles de capter le financement des entreprises, si l'on se réfère aux tendances que suit de longue date le financement par l'industrie de leurs activités de recherche et de celles des laboratoires publics (graphique 3.6). Les partenariats public-privé resteront un instrument privilégié et aideront à mobiliser de nouvelles sources de financement. Ils ont notamment pour avantage de favoriser les retombées socio-économiques immédiates et la circulation des personnes et des idées entre les secteurs public et privé. Tandis qu'un engagement plus actif de la part des entreprises est de nature à accentuer une dimension de marché tout à fait souhaitable pour la recherche universitaire, il peut également amener cette dernière à s'ancrer dans le court terme et à privilégier les découvertes marginales au détriment des percées fondamentales (voir le profil « Partenariats stratégiques public-privé en science, technologie et innovation »). Il est probable également qu'il ait une incidence sur d'autres pratiques, par exemple qu'il entraîne des restrictions au partage de données ouvertes (voir plus loin).

Organismes de bienfaisance, fondations et philanthropes apportent une contribution toujours plus importante au financement de la recherche universitaire depuis quelques années, une tendance vraisemblablement appelée à perdurer. Ils sont particulièrement actifs dans le domaine de la santé – ainsi, le Welcome Trust, au Royaume-Uni, finance un large éventail de recherches médicales, l'Association française contre les myopathies soutient la lutte contre certaines maladies rares, et la Gates Foundation fournit une part considérable des fonds destinés à la recherche sur les maladies tropicales (voir le profil « Missions et orientation de la recherche publique »).

Phénomène relativement récent s'il en est, la philanthropie scientifique – qui consiste en règle générale, pour des personnes fortunées, à faire don de sommes importantes – ne constitue pas moins, pour la recherche publique, une source de financement qui prend rapidement de l'importance (OCDE, 2014a). Elle bénéficie d'ordinaire à des domaines bien

Graphique 3.5. Le financement de la recherche publique se concentre dans les mains du gouvernement

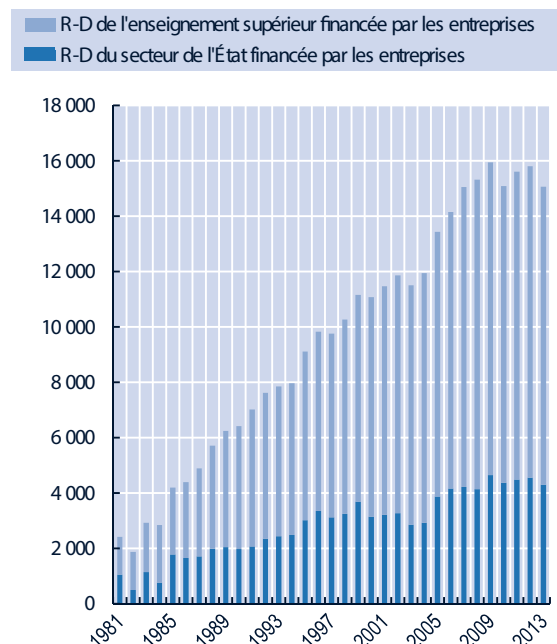
Dépenses publiques de R-D, principaux financements, part du total, 2014 ou dernière année disponible



StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433387>

Graphique 3.6. Recherche publique financée par l'industrie : les universités prennent la part du lion

Déplacement du financement de R-D, total OCDE, en millions USD en PPA à prix constant



StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433392>

Notes : Les dépenses publiques de R-D comprennent les dépenses de R-D de l'enseignement supérieur (DIRDES) et celles du secteur de l'État (DIRDET). Le total mondial a été estimé pour les pays pour lesquels des données étaient disponibles.

Source : D'après OCDE (2016b), *Statistiques de la recherche et développement (SRD)* (base de données), www.oecd.org/fr/innovation/inno/srd.htm. Les données ont été extraites depuis la plateforme des politiques d'innovation IPP.stats le 25 juillet 2016, www.innovationpolicyplatform.org/content/statistics-ipp.

spécifiques relevant de la recherche fondamentale et translationnelle, ainsi qu'aux institutions en position de pointe dans les secteurs pionniers de la recherche scientifique ; on estime d'ailleurs qu'elle représente aux États-Unis près de 30 % des fonds annuels de recherche reçus par les principales universités du pays (Murray, 2012). Cela ne manque pas de poser question au sujet de l'avenir de la recherche d'intérêt public : s'ils sont généralement bienvenus, les dons privés peuvent être motivés par des intérêts personnels, dissociés des objectifs publics, le risque étant alors de distraire l'effort de recherche vers des domaines périphériques (Broad, 2014). Mais la philanthropie agit souvent aussi comme un catalyseur permettant d'attirer d'autres bailleurs de fonds, y compris du secteur public, pour financer des projets et des centres de grande envergure qui ne pourraient sans doute pas l'être autrement compte tenu de leur coût élevé.

3.3. Quels travaux de recherche publique mènera-t-on et dans quel but ?

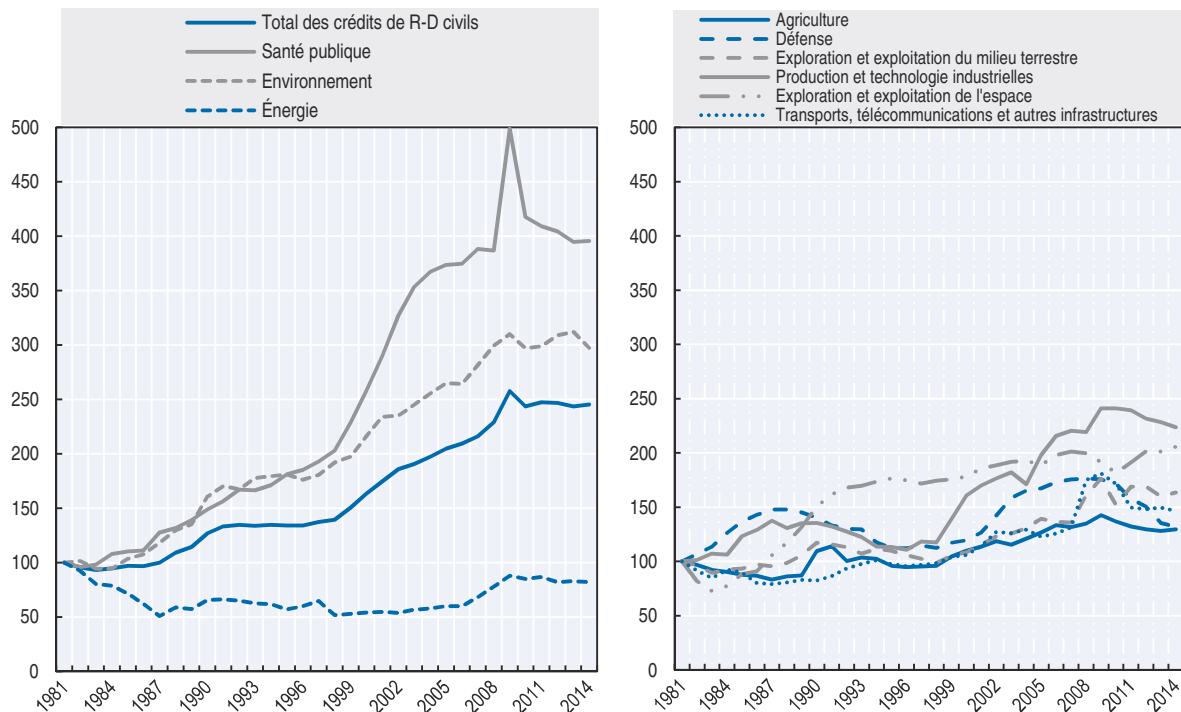
Les différentes mégatendances dont il a été question au chapitre 1 dicteront dans une large mesure les programmes de recherche et d'innovation de demain. Nombre d'enjeux pressants appellent des percées technologiques ainsi que des changements de grande ampleur aux plans institutionnel et organisationnel et ceux-ci dépendront en partie de nouveaux travaux de recherche. Ainsi en est-il, entre maints autres exemples, de l'inscription de la croissance sur une trajectoire plus durable ; des besoins des sociétés

vieillissantes ; des pressions environnementales, avec au premier chef le changement climatique ; de l'épuisement des ressources naturelles ; des menaces sur la sécurité énergétique, hydrique et alimentaire ; et de différents enjeux sanitaires.

Il y a d'ores et déjà eu une réorientation générale des programmes de recherche en direction des défis environnementaux et sociétaux, et « l'écologisation » des politiques nationales de recherche n'est pas passée inaperçue dans de nombreux pays de l'OCDE depuis la fin des années 2000 (OCDE, 2010 ; OCDE, 2012a). Les réponses reçues à la dernière enquête sur les politiques de science, technologie et innovation (STI) montrent que la croissance durable et les enjeux de société ont rang de priorités majeures pour un nombre toujours plus grand de pays membres de l'OCDE et d'économies émergentes (voir le chapitre 4). Cette réorientation transparaît dans les budgets publics de R-D, dont le centre de gravité s'est déplacé au cours des dernières décennies vers les objectifs environnementaux et sanitaires (quoiqu'il n'en ait rien été pour l'énergie). Les CBPRD nationaux ont davantage augmenté vis-à-vis de ces deux thématiques qu'à l'égard de n'importe quel autre objectif civil (graphique 3.7).

Graphique 3.7. **L'accroissement des préoccupations sociales change les équilibres des budgets publics de R-D**


CBPRD, OCDE, Indice 1981 = 100, 1981-2014



Notes : Les budgets de R-D pour le contrôle et la protection de l'environnement comprennent la recherche sur le contrôle de la pollution et le développement des installations de surveillance pour mesurer, éliminer et prévenir la pollution. Les budgets de R-D pour l'énergie comprennent la R-D sur la production, le stockage, le transport, la distribution et l'utilisation rationnelle de toutes les formes d'énergie, mais excluent la R-D sur la prospection et la propulsion. Les budgets de R-D dédiée à la santé peuvent sous-estimer le montant total du financement du secteur de l'État dans ce domaine. Les efforts visant à estimer le financement des sciences médicales via la recherche non orientée et les fonds généraux des universités aident à fournir une image plus complète.

Les données 2009 de santé publique comprennent le financement exceptionnel des États-Unis légiféré dans le Recovery and Reinvestment Act de 2009.

Source : D'après OCDE (2016b), *Statistiques de la recherche et développement (SRD)* (base de données), avril, www.oecd.org/fr/innovation/inno/srd.htm. Les données ont été extraites depuis la plateforme des politiques d'innovation IPP.stats le 26 juillet 2016, www.innovationpolicyplatform.org/content/statistics-ipp.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433401>

Au niveau international, le programme Horizon 2020 de l'Union européenne met également l'accent sur une série de défis sociétaux, y compris la santé, les changements démographiques, la sécurité alimentaire, la durabilité, l'énergie propre, les transports écologiques, l'action relative au climat et les sociétés inclusives et sûres, tandis que les objectifs de développement durable initiés par l'ONU et le programme climatique de la COP21 articulent tous deux les rôles de la science et de l'innovation pour atteindre leurs objectifs (voir encadré 3.1). Cependant, de nombreux défis sont des « vilains problèmes » mal structurés, qui impliquent beaucoup d'incertitude et ne peuvent être résolus uniquement par la science et la technologie. Il sera important, pour l'élaboration future des politiques, de formuler les rôles de la science de manière adéquate dans les transitions socio-techniques nécessaires pour faire face à ces défis et d'ajuster les attentes politiques en conséquence.

Encadré 3.1. **Les Objectifs de développement durable et les activités STI**

En septembre 2015, les Nations Unies ont adopté le Programme de développement durable à l'horizon 2030, dans lequel sont arrêtés 17 Objectifs de développement durable, afin de stimuler l'action au cours des 15 prochaines années dans tous les domaines économiques, sociaux et environnementaux dont l'importance est primordiale pour le développement durable. Le programme porte notamment sur la recherche scientifique et préconise le recrutement de 1 million de travailleurs pour la R-D en même temps qu'un accroissement substantiel des activités de cette dernière, tant publique que privée. Il assigne des priorités à la recherche en ce qui concerne l'agriculture, la santé (par exemple les vaccins et les traitements contre certaines maladies, transmissibles ou non), les énergies propres (par exemple les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique, les nouvelles technologies relatives aux combustibles fossiles plus propres) et la préservation des milieux marins (santé des océans et biodiversité marine, par exemple).

La répartition des crédits publics de R-D par objectif socio-économique révèle certains schémas de spécialisation (graphique 3.8, diagramme 1). Les États-Unis, par exemple, affichent une très nette prédilection pour la R-D en santé (en particulier la science médicale), laquelle absorbe 24 % des fonds alloués à la R-D publique en 2016. Le Royaume-Uni, le Luxembourg et le Canada, de leur côté, consacrent environ un cinquième de leurs crédits de R-D à la santé (avec respectivement 22 %, 18 % et 17 % du total)². Le Mexique (19 %), le Japon (11 %) et la Corée (9 %) accordent pour leur part la priorité à l'énergie. Si ces schémas de spécialisation vont certainement évoluer au cours des 15 années à venir, tout changement de grande ampleur demande du temps en l'absence de choc majeur, les coûts irrécupérables associés aux infrastructures de recherche et aux effectifs de chercheurs spécialisés entraînant une nette cristallisation de la recherche autour de ses domaines actuels.

Il y a peu de chances que les enjeux de société prennent le pas sur les contributions à la compétitivité économique nationale attendues de la science publique, qui depuis longtemps déjà donnent à cette dernière son centre de gravité. Les préoccupations dans ce domaine vont continuer de dicter aux pays leurs programmes de recherche, lesquels tendront plus que jamais à faire mieux coïncider la recherche publique avec les besoins des entreprises et à attirer durablement sur le sol national des actifs intellectuels, des talents et des investissements scientifiques et technologiques.

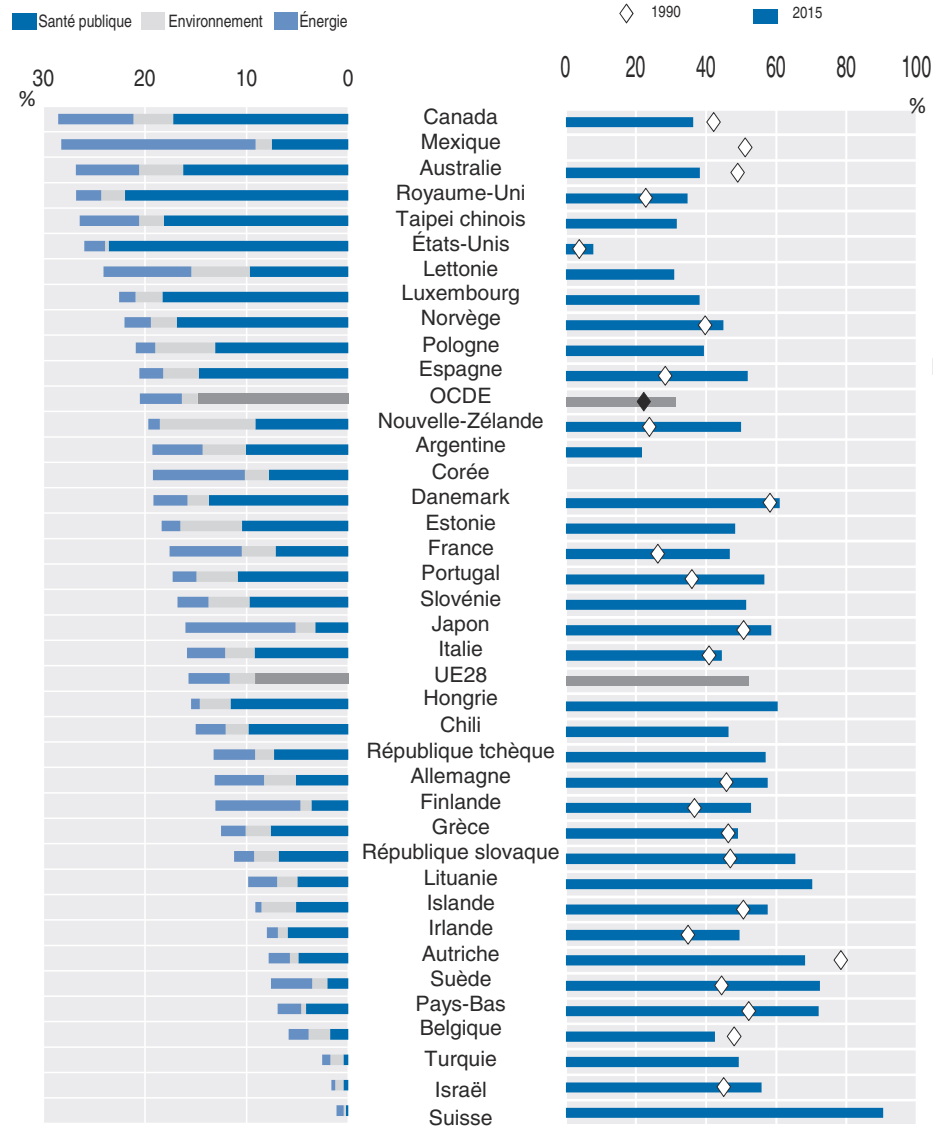
La défense et la sécurité elles aussi pourraient redevenir des priorités majeures des programmes nationaux de recherche au cours des 10 à 15 prochaines années si le terrorisme

Graphique 3.8. Les économies établissent leurs priorités budgétaires de R-D afin de mieux répondre aux grands défis

Part dans le total des CBPRD (%), 2016 ou dernière année disponible

Diagramme 1. Les budgets de R-D sont consacrés aux défis sociétaux

Diagramme 2. La recherche non-thématique est encouragée



Notes : Dans le diagramme 1, les budgets de R-D pour le contrôle et la protection de l'environnement comprennent la recherche sur le contrôle de la pollution et le développement des installations de surveillance pour mesurer, éliminer et prévenir la pollution. Les budgets de R-D pour l'énergie comprennent la R-D sur la production, le stockage, le transport, la distribution et l'utilisation rationnelle de toutes les formes d'énergie, mais excluent la R-D sur la prospection et la propulsion. Les budgets de R-D dédiés à la santé peuvent sous-estimer le montant total du financement du secteur de l'État. Les efforts visant à estimer le financement des sciences médicales via la recherche non orientée et les fonds généraux des universités (FGU) aident à fournir une image plus complète.

Dans le diagramme 2, la part de recherches non thématiques est une mesure de remplacement qui inclut tous les CBPRD alloués pour l'avancement général des connaissances, y compris les FGU. Les subventions institutionnelles (FGU) peuvent cependant être distribuées en fonction des priorités nationales de recherche fixées à un niveau national. Les États-Unis ne sont pas inclus dans le tableau, puisque les données américaines sur les FGU ne sont pas disponibles. Source : OCDE (2016b), *Statistiques de la recherche et développement (SRD)* (base de données), www.oecd.org/fr/innovation/ino/srd.htm. Les données ont été extraites depuis la plateforme des politiques d'innovation IPP.stats le 25 juillet 2016, www.innovationpolicyplatform.org/content/statistics-ipp.

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433417>

et les risques de conflit armé – ou les menaces perçues – devaient connaître une recrudescence. Alors que les forces armées ont compté de nombreuses années durant parmi les principaux investisseurs en recherche scientifique, la part des dépenses de R-D de l'État consacrées à la défense dans la plupart des pays de l'OCDE s'est nettement contractée depuis la fin de la Guerre froide, au point d'avoir atteint aujourd'hui un plus bas historique. Les choses pourraient bien changer si le contexte international est gagné par l'instabilité, comme certaines mégatendances le laissent penser (voir le chapitre 1). Dans le même temps, certaines puissances émergentes ont considérablement augmenté les crédits de R-D qu'elles allouent à la défense, telle la République populaire de Chine qui passe pour occuper à cet égard le deuxième rang mondial, derrière les États-Unis.

Malgré l'accent mis sur les enjeux sociétaux, économiques et sécuritaires, une part substantielle des budgets publics de R-D restera dévolue à la recherche non thématique (c'est-à-dire visant à servir au progrès général des connaissances). En 2015, celle-ci a reçu plus des deux tiers des fonds publics alloués à la recherche en Autriche, en Australie, aux Pays-Bas, en Suède, en Lituanie et en Suisse (2015 ou dernière année pour laquelle des données sont disponibles) – et ce ratio va croissant depuis le début des années 1990 dans la plupart des pays pour lesquels on dispose de données (graphique 3.8, diagramme 2). Aux États-Unis, les données nationales confirment elles aussi une érosion de la recherche finalisée (Sarewitz, 2012). Sur les 15 dernières années en effet, le budget des organismes de recherche finalisée, qui s'attachent davantage à servir des objectifs d'intérêt public qu'à faire progresser la science, n'a connu qu'une croissance marginale, parfois inférieure à l'inflation, tandis que l'enveloppe gouvernementale accordée à la recherche doublait pratiquement de volume et que les National Institutes of Health (NIH)³ et la National Science Foundation (NSF) captaient les trois quarts des crédits supplémentaires alloués à la science au niveau fédéral.

Ce changement d'orientation de la recherche publique obéit à des motifs complexes et qui diffèrent selon les pays. Parmi ses grands ressorts, on retrouve cependant fréquemment le fait que des universités jouissant d'une relative autonomie deviennent les principaux exécutants de la recherche publique et la priorité donnée à l'excellence (telle qu'on la définit actuellement de façon étroite, c'est-à-dire essentiellement en termes de citations d'articles publiés dans des revues réputées). Des conceptions plus larges de l'excellence en recherche, mettant en avant la pertinence des travaux au regard des enjeux de société, pourraient s'imposer au cours des 15 années à venir avec pour conséquence qu'une part plus importante des crédits de recherche aille au financement de travaux thématiques, menés dans un but précis. Il semble probable également que les universités joueront un rôle plus important dans la recherche finalisée de par les relations de plus en plus étroites qu'elles entretiennent avec les EPR et les entreprises (voir plus loin).

À cela s'ajoute que les progrès de la science et de la technologie seront à l'origine de nouvelles possibilités et de nouveaux enjeux qui ne manqueront pas d'influer fortement sur les programmes de recherche au cours de la prochaine décennie. Ainsi, le potentiel offert par les données massives, les neurotechnologies, l'intelligence artificielle et la biologie de synthèse et l'impact de ceux-ci sur les politiques de recherche font l'objet d'un examen détaillé au chapitre 2. Les exécutants de la recherche, et les bailleurs de fonds avec eux, devront par ailleurs procéder à des choix stratégiques difficiles lorsqu'il s'agira de définir les priorités de l'avenir parmi un éventail de domaines extrêmement diversifié. De nouveaux champs de recherche s'ouvriront sous l'effet de la convergence des technologies (à savoir, des technologies de l'information et des communications [TIC], des nanotechnologies, des biotechnologies et des sciences cognitives).

Les plus grandes percées de la science et de la technologie se sont produites, pour beaucoup d'entre elles, à l'interface de disciplines différentes. Ainsi de la biologie de synthèse, qui consiste fondamentalement à appliquer aux systèmes biologiques des méthodes reprises de l'ingénierie, autrement dit à les considérer comme des mécanismes vivants et à créer des objets à partir de composants biologiques normalisés (Boyle et Silver, 2009). Reposant sur des principes, méthodes et pratiques issus des mathématiques, des sciences de l'ingénieur et de l'informatique, elle pourrait trouver des applications dans l'industrie, l'environnement, l'agriculture et la médecine (OCDE, 2014b). Citons encore l'exemple des neurosciences, où se superposent diverses disciplines scientifiques, depuis la médecine, la chimie et la génétique jusqu'à la linguistique, les sciences cognitives et la psychologie en passant par l'informatique, les sciences de l'ingénieur et les mathématiques. Leurs applications concernent la médecine proprement dite (avec, par exemple, les implants électroniques à même de rétablir ou remplacer des fonctions défailtantes du cerveau), mais aussi la stimulation cérébrale, les communications homme-machine et les technologies d'interface (comme les neuroprothèses).

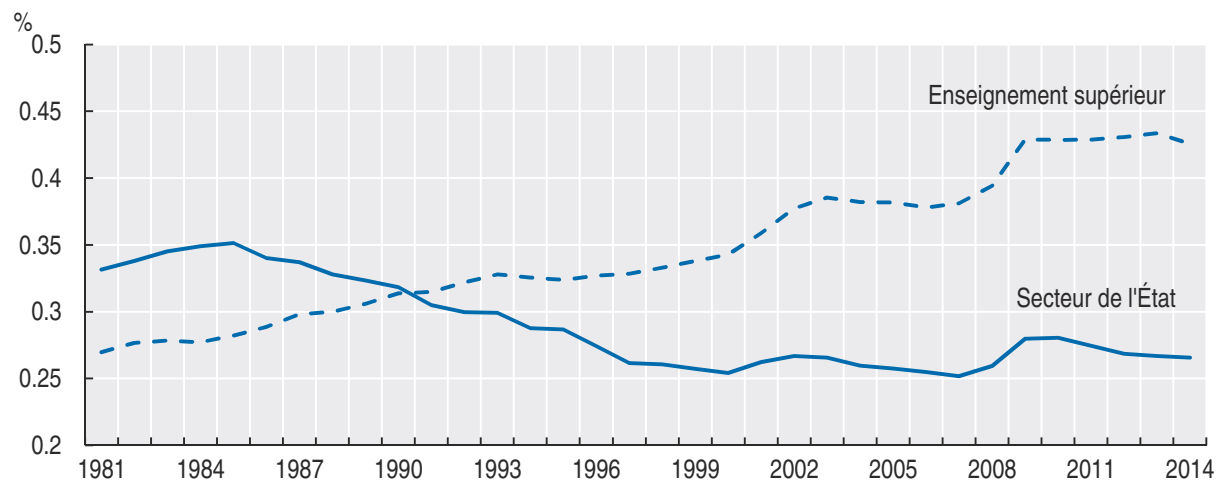
De par leur complexité, les enjeux de société d'envergure mondiale imposent de mener des recherches combinées dans des disciplines traditionnellement éloignées, comme peuvent l'être les sciences physiques et les sciences sociales et humaines. Or les universités, les groupes d'examen par les pairs, les organismes de financement et les revues scientifiques conservent dans leur écrasante majorité une organisation cloisonnée qui n'est pas adaptée aux activités interdisciplinaires. Les mécènes de la recherche s'attachent depuis quelques années à mettre fin à cette compartimentation, et ne relâcheront sans doute pas leurs efforts de sitôt, non seulement pour que l'on puisse se montrer à la hauteur des grands enjeux de société mais aussi pour promouvoir le développement de technologies de rupture. Cette aspiration à davantage d'interdisciplinarité et de transdisciplinarité pourrait dans l'avenir se matérialiser à la fois dans le choix des priorités stratégiques de la recherche et par une restructuration ou un regroupement des différents organismes et acteurs qui prennent part à celle-ci.

3.4. Qui se chargera des travaux de recherche publique ?


Partout dans le monde, les systèmes nationaux de recherche publique tendent désormais à donner la primauté à l'excellence et à canaliser les ressources vers des organismes de stature internationale, pour la plupart des universités. Le modèle universitaire, dans lequel enseignement et recherche sont étroitement liés et où les étudiants apportent leur concours à cette dernière, s'est largement répandu et les universités ont supplanté les EPR en tant que premiers exécutants de la recherche publique. La part des dépenses intérieures de R-D de l'enseignement supérieur (DIRDES) dans le total des dépenses de recherche publique a été en progression constante ces dernières décennies dans la zone OCDE tandis que celle des dépenses intérieures de R-D de l'État (DIRDET) suivait une évolution inverse (graphique 3.9). Cependant, les universités et les EPR accusent une forte hétérogénéité. Ainsi, dans la plupart des pays, la majorité des travaux de recherche réalisés doivent être mis à l'actif d'une infime partie des universités, lesquelles jouissent souvent d'une grande latitude dans la manière d'articuler les missions dont elles sont investies et de s'en acquitter, qui dépend de leur taille et de leur richesse relative, facteurs variables s'il en est, même à la seule échelle nationale. Il en résulte que les pouvoirs publics n'exercent en règle générale qu'un contrôle limité sur ces universités alors même qu'elles forment l'un des piliers des systèmes publics de recherche (voir le profil « Missions et orientation de la recherche publique »).

Graphique 3.9. **La recherche publique se tourne vers les universités**

Dépenses de R-D en % du PIB, total OCDE, 1981-2014



Sources : D'après OCDE (2014a), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2014*, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2014-fr, OCDE (2016) ; OCDE (2016a), *Principaux indicateurs de la science et de la technologie (base de données PIST)*, juin, www.oecd.org/fr/sti/pist.htm. Les données ont été extraites depuis la plateforme des politiques d'innovation IPP.stats le 25 juillet 2016, www.innovationpolicyplatform.org/content/statistics-ipp.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433428>

S'agissant du secteur des EPR, celui-ci comprend en règle générale un large éventail d'exécutants, depuis ceux qui se consacrent à la recherche fondamentale à l'aide d'infrastructures importantes et onéreuses, à ceux qui fournissent des services techniques aux petites et moyennes entreprises. Ceux de ces établissements qui se concentrent le plus sur la recherche appliquée et sont les plus proches des besoins du marché final ont subi des coupes budgétaires particulièrement sévères et leur présence dans le giron du secteur public continue d'être contestée. L'une des principales difficultés auxquelles ils ont été confrontés a été de rendre compte de la grande diversité de leurs activités, nombre de celles-ci ne se prêtant pas d'emblée à des audits ou des évaluations reposant sur des indicateurs ordinaires. Beaucoup de ces établissements disposent d'infrastructures de recherche importantes et d'une main-d'œuvre vieillissante qui leur reviennent cher, vestiges d'une époque où les gouvernements et les fleurons de l'industrie nationale comptaient parmi leurs principaux clients. Au cours des 15 années à venir, plus les universités monteront en puissance dans leur « troisième mission » et leurs activités de commercialisation et accentueront leur coopération avec le secteur des entreprises, plus la redondance risque de se faire importante entre leurs missions et tâches et celles assignées aux EPR, ce qui pourrait favoriser aussi bien la concurrence que la coopération entre les deux parties. Dans de nombreux pays de l'OCDE, les liens entre EPR et universités vont se resserrant grâce à des projets communs, des formations doctorales, des publications collectives, des recrutements conjoints, des centres de recherche communs et, dans certains cas, la co-implantation d'activités. Quelques pays, comme le Danemark, ont même fait le choix de fusionner EPR et universités. Ces rapprochements et fusions peuvent se multiplier sous l'effet de la convergence plus poussée des missions dont les uns et les autres sont investis et des contraintes qui pèsent sur les dépenses publiques.

Le mouvement d'ouverture de la science (voir plus loin) et les progrès des technologies numériques sont susceptibles également d'encourager des initiatives de science citoyenne et de faciliter la sensibilisation du public à son sujet (OCDE, 2015a). La proportion d'activités de

R-D exécutées en dehors des secteurs public et privé, c'est-à-dire par des particuliers et des groupes organisés, si elle est encore restreinte et marginale, devrait connaître une nette progression. Traditionnellement, ces activités diffuses sont emmenées par des scientifiques reconnus qui font appel à des volontaires afin de recueillir, organiser et interpréter des données au moindre coût. Ainsi, Galaxy Zoo confie à des bénévoles le soin d'identifier et classer de grandes quantités d'images astronomiques. L'implication des particuliers dans les activités scientifiques peut également contribuer à aiguïser l'intérêt de la population pour tout ce qui touche aux sciences. De fait, les écoles apparaissent de plus en plus à certains pays comme un cadre privilégié pour l'introduction et la promotion de la science citoyenne, et la contribution des enseignants à la mise en place d'expériences et à la transmission des valeurs socio-scientifiques aux jeunes générations est toujours mieux reconnue.

D'apparition plus récente encore, la « science d'amateur » voit des particuliers ou des groupes organisés procéder à leurs propres expériences, voire disposer de leurs propres installations ou utiliser en partage celles ouvertes au public. Si cette pratique reste pour l'instant confidentielle, il n'est pas à exclure qu'elle acquière une importance significative au cours des dix prochaines années. Les « scientifiques amateurs » pourraient interagir avec la R-D publique et privée de multiples manières – en tant que collaborateurs et communautés d'utilisateurs, mais aussi en tant que concurrents, et même en tant qu'opposants dans certains cas. À vrai dire, leurs activités tendent à échapper aux règles régissant les activités scientifiques classiques, si bien que l'on s'interroge quant à la qualité et la sécurité de leurs recherches.

3.5. Quelles seront les modalités d'exécution de la recherche publique ?

La recherche scientifique est elle-même tributaire, dans une large mesure, des progrès technologiques ainsi que d'infrastructures au coût toujours plus élevé. Il en a longtemps été ainsi pour les sciences physiques et il en va désormais de même dans d'autres domaines de recherche, dont les sciences sociales et humaines. Les dépenses engagées servent entre autres à financer des infrastructures internationales de grande envergure mais aussi des plateformes technologiques de moindre ampleur, des bibliothèques et des archives, structures qui nécessitent toutes une actualisation et/ou un renouvellement permanents. Les infrastructures de grande envergure jouent un rôle toujours plus important dans divers domaines scientifiques et permettent de nombreuses découvertes. Ces installations servent non seulement à faire avancer la recherche fondamentale mais aussi à apporter de façon directe un appui scientifique spécifique pour la résolution de problèmes sociétaux et environnementaux de premier ordre. Le renforcement des infrastructures publiques de recherche est au nombre des principales priorités de la politique STI dans la majorité des pays couverts par l'enquête que l'OCDE et la Commission européenne ont menée en 2016. Les États-Unis se proposent par exemple d'accroître de 10 %, en 2016, le budget consacré à ces infrastructures, tandis que l'Europe multiplie les Consortiums pour une infrastructure européenne de recherche, qui bénéficient d'un financement mixte (voir le profil « Financement de la recherche publique »). Des investissements massifs dans les grandes infrastructures sont également attendus en Asie de l'Est au cours des 15 années à venir, signe de l'importance croissante que la région accorde à la recherche.

Dans leur ensemble, ces investissements dans les grandes infrastructures de recherche pourraient augurer l'ouverture d'une nouvelle ère, celle de la « mégascience », déterminée par l'ampleur des défis mondiaux, les progrès de l'internationalisation et l'évolution des besoins dans les domaines scientifiques vers des équipements et des expérimentations de

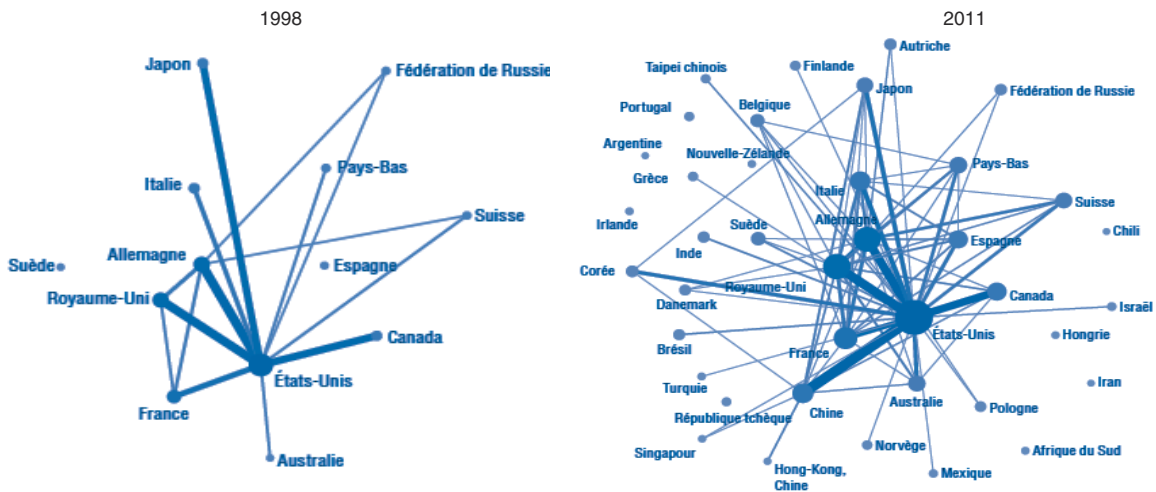
plus grande envergure. Attractifs politiquement parlant mais néanmoins onéreux, ces investissements risquent fort de se faire aux dépens d'activités de R-D publique fructueuses quoique plus discrètes. De terribles dilemmes risquent de surgir à cet égard en raison des contraintes budgétaires attendues. Les administrations vont se trouver face à des alternatives difficiles puisqu'il leur faudra choisir entre financer la « mégascience » ou bien des projets de recherche portés par une seule entité, entre financer des infrastructures coûteuses ou bien le personnel de recherche. De surcroît, une fraction sans cesse plus considérable de l'investissement scientifique va au développement et à l'entretien des infrastructures distribuées et des infrastructures électroniques, notamment pour pourvoir aux coûts d'exploitation et aux frais afférents au personnel qualifié, ce qui ne fera qu'ajouter au problème pour les pouvoirs publics (voir le profil « Financement de la recherche publique »).

Les infrastructures de recherche constituent probablement l'un des domaines ayant le plus bénéficié du renforcement de la coordination internationale de l'action publique à l'œuvre ces dernières années (OCDE, 2014c). La raison en est que la construction et l'exploitation d'infrastructures de grande envergure sollicite une part importante du financement de la recherche publique, ce qui incite fortement à la collaboration et au partage de coûts. Aussi diverses structures politiques ont-elles été instituées pour faciliter la coordination. Les feuilles de route du Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche (ESFRI) jouent un rôle capital dans la détermination des priorités à suivre et des relations de collaboration à établir, au niveau européen et au-delà (pour la dernière feuille de route en date, publiée en mars 2016, voir ESFRI, 2016). Le groupe Carnegie, formé de conseillers scientifiques des pays du G8 + 5, a constitué un groupe consultatif chargé de parvenir à une communauté de vues au sujet, entre autres, de la gouvernance, du financement et de la gestion d'infrastructures de recherche de grande envergure (voir le profil « Dispositifs transfrontières de gouvernance de la science, de la technologie et de l'innovation »). Le rôle des entités internationales de ce genre est appelé à s'affirmer avec l'intensification de la coopération à ce même niveau.

Il va sans dire que l'internationalisation de la recherche n'est pas un phénomène qui se cantonne aux grandes infrastructures multinationales : la coopération dans le domaine de la recherche et la mobilité des universitaires ont elles aussi largement suivi le mouvement au cours des dernières décennies (graphique 3.10). Les cadres politiques nationaux de la recherche tendent de plus en plus à être modelés par le contexte mondial, les réseaux STI débordant les frontières. Pays, entreprises, universités et chercheurs s'organisent toujours davantage en réseaux ouverts et collaboratifs reliant, par-delà les limites nationales, des pôles locaux de recherche et d'innovation. Les idées, les actifs et les ressources se concentrent au niveau de ces poches d'excellence. Grâce aux nouvelles technologies, les communications entre collaborateurs de pays différents sont devenues plus simples et moins coûteuses, et il est plus facile que jamais de se renseigner au sujet des communautés de chercheurs qui existent à l'étranger. Le caractère mondial des grands enjeux contemporains est de nature à amplifier les projets de recherche comme la coordination à l'échelon international, ainsi qu'en témoignent les récentes initiatives du G7 sur la maladie d'Alzheimer, les maladies liées à la pauvreté et la résistance aux antimicrobiens. Les pouvoirs publics se verront par ailleurs poussés à maintenir leurs efforts visant à lever les obstacles inhérents aux régimes nationaux de financement afin de faciliter la collaboration internationale en matière de recherche. La mobilité des chercheurs, d'ores et déjà importante, pourrait s'améliorer encore. Ces deux mouvements risquent toutefois d'être mis


Graphique 3.10. L'expansion et l'intensification des réseaux internationaux de collaboration scientifique

Comptages simples de documents faisant l'objet d'un co-autorat international



Note : La position des économies sélectionnées (nœuds) – celles dépassant un seuil minimal de collaboration de 10 000 documents – est déterminée par le nombre de documents scientifiques publiés en co-autorat en 2011. Un algorithme de visualisation a été appliqué à l'ensemble du réseau international de collaboration afin de représenter les liens par un schéma bidimensionnel dans lequel les distances figurent la force conjuguée des forces collaboratives. La taille des bulles est proportionnelle au nombre de collaborations scientifiques pour une année donnée. L'épaisseur des traits (relations) reliant les pays représente l'intensité de la collaboration (nombre de documents publiés en co-autorat dans chaque paire). Les positions dérivées pour les données relatives aux collaborations de 2011 ont été appliquées aux valeurs de 1998. De nouveaux nœuds et relations apparaissent en 2011 lorsqu'ils dépassent les seuils minimaux.

Source : OCDE (2013), *Science, technologie et industrie : Tableau de bord de l'OCDE 2013*, http://dx.doi.org/10.1787/sti_scoreboard-2013-fr, d'après Scopus Custom Data, Elsevier, version 5.2012, juin 2013.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433434>

en échec si les pressions en faveur du repli national et de la maîtrise des migrations internationales devaient prévaloir au sein des sociétés.

Les technologies numériques sont appelées à transformer radicalement les modalités d'exécution des activités scientifiques et de diffusion des résultats de la recherche. Un nouveau paradigme fait son apparition, celui de la « science ouverte », laquelle se caractérise par 1) le libre accès aux revues scientifiques ; 2) l'ouverture des données de la recherche ; 3) la collaboration ouverte grâce aux TIC (OCDE, 2015a)⁴. Parallèlement, l'accessibilité et la diversité des données à la disposition des scientifiques ou produites par eux ont considérablement progressé, tout comme les moyens offerts de consulter et d'analyser ces données. « Données massives » et recherche fondée sur les données sont aujourd'hui omniprésentes dans les disciplines scientifiques et s'y annoncent particulièrement prometteuses face à certains défis jusque-là hors de portée (voir le profil « Science ouverte »).

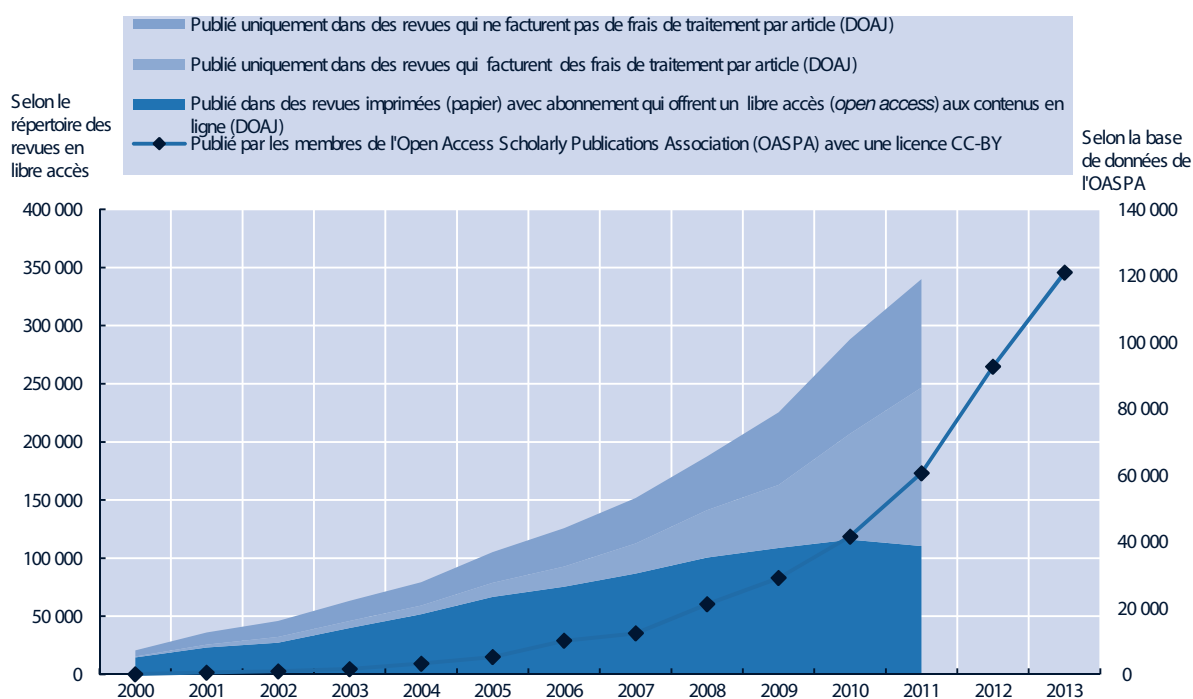
La science ouverte apparaît de plus en plus comme un moyen d'accélérer la recherche, de la rendre plus efficace et de faire grandir la confiance du public. On s'accorde à reconnaître que les résultats scientifiques obtenus avec l'argent du contribuable sont des biens publics et devraient dès lors être accessibles à tous pour avoir de plus larges retombées sur le plan social. De fait, la science ouverte a notamment pour conséquence qu'un même ensemble de données pourrait servir à différents projets et multiplier les possibilités, pour les acteurs nationaux et mondiaux, de prendre part à la recherche (OCDE, 2014a). Au surplus, dans la mesure où les entreprises nationales disposent des moyens humains et financiers pour la transformer en savoir exploitable, elle peut donner aux économies émergentes la possibilité de hâter leur rattrapage technologique, et pourquoi pas de se rapprocher à grands

pas de la frontière de la connaissance. Il est en outre permis de penser, en ce qui concerne le libre accès aux publications, que le partage de données se traduira par une progression du taux de citation des articles scientifiques (Piwowar, Day et Frisma, 2007 ; Piwowar et Vision, 2013) et aura une influence bénéfique sur le comportement scientifique.

Le libre accès, sous toutes ses formes, a le vent en poupe (graphiques 3.11 et 3.12), porté par le coût modique de la diffusion en ligne. Parallèlement à cela, le modèle traditionnel des publications dans les revues scientifiques a été durement critiqué pour restreindre l'accès aux résultats des travaux financés sur les deniers publics à un club fermé d'établissements d'enseignement supérieur et de recherche qui, pour beaucoup d'entre eux, ont protesté de leur côté contre l'augmentation du prix des abonnements (OCDE, 2015a). Deux modèles de libre accès se sont dégagés, la voie dorée et la voie verte (encadré 3.2), chacun avec ses avantages et ses inconvénients, et l'on ignore encore lequel des deux finira par primer sur l'autre.


Graphique 3.11. **Le nombre de publications en libre accès est à la hausse**

Nombre d'articles, 2000-13



Note : Laakso et Björk décrivent les résultats d'une étude qui met l'accent sur la mesure du développement longitudinal des volumes de publications totalement en libre accès pour les années 2000 à 2011. L'étude est fondée sur l'hypothèse que la population totale des journaux en libre accès est listée dans le répertoire des revues en libre accès (DOAJ). Les chiffres de l'association Open Access Scholarly Publications (OASPA) comprennent un total de 399 854 articles publiés par ses membres avec une licence CC-BY entre 2000 et 2013. Parmi ces articles, 30 % (120 972) ont été publiés au cours de la seule année 2013. Les chiffres de l'OASPA ne comprennent que les articles publiés dans des revues dont le contenu intégral est en accès libre ; les articles publiés dans des revues en libre accès hybrides ne sont donc pas inclus.

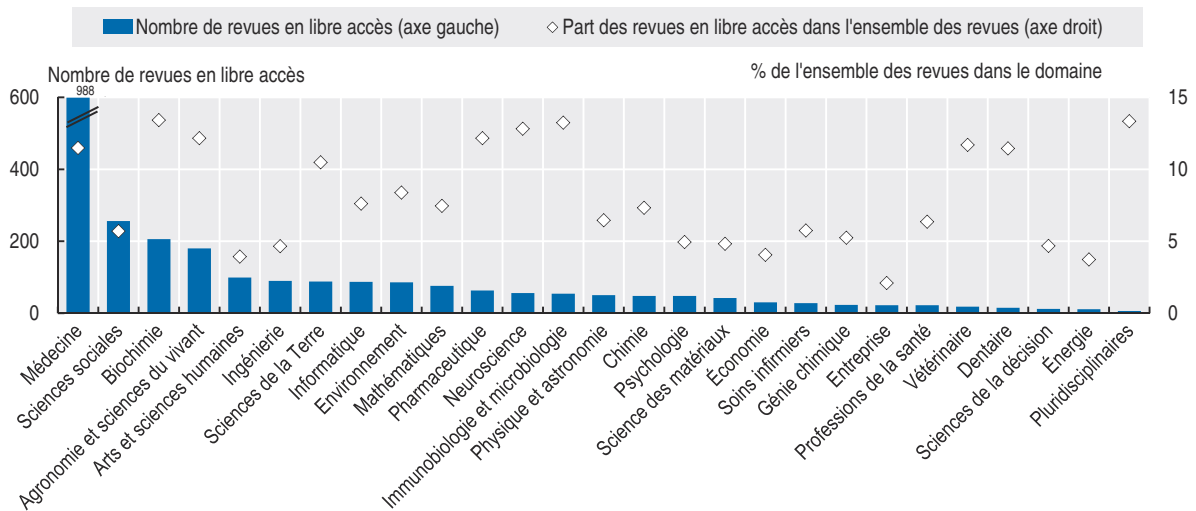
Sources : D'après Laakso, M. et B.-C. Björk (2012), « Anatomy of open access publishing: A study of longitudinal development and internal structure », www.biomedcentral.com/1741-7015/10/124 (cité dans OCDE, 2015a ; document consulté le 11 juin 2015) ; Open Access Scholarly Publications Association (OASPA), <http://oaspa.org/growth-of-fully-oa-journals-using-a-cc-by-license/> (site web consulté le 30 mai 2016).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433448>


Les scientifiques n'hésitent pas non plus à recourir à d'autres voies pour diffuser leurs travaux, utilisant les blogs, les médias sociaux et le multimédia pour en faire connaître les résultats. Ce mouvement est encouragé par les nouvelles technologies numériques, dont la popularité est en plein essor, mais procède également d'une volonté de court-circuiter les

Graphique 3.12. Les pratiques de publication en libre accès varient selon les domaines de la science

Nombre et part de revues actives en libre accès par domaine dans les pays de l'OCDE, 2014



Source : OCDE (2015b), Science, technologie et industrie : Tableau de bord de l'OCDE 2015 : L'innovation au service de la croissance et de la société, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_scoreboard-2015-fr.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433454>

Encadré 3.2. Deux grands modèles de publication se sont fait jour pour promouvoir le libre accès aux articles scientifiques

La voie verte désigne l'auto-archivage, par le chercheur, d'un article publié ou de son manuscrit final revu par des pairs, après publication dans une revue savante ou parallèlement à celle-ci. L'accès à cet article peut être soumis à une période d'embargo, dont la durée est très variable (généralement jusqu'à 24 mois). Les articles mis en libre accès via la voie verte ne sont d'ordinaire pas librement réutilisables au titre d'une licence Creative Commons (CC-BY) ; les versions prépubliées mises en ligne n'ont pas fait l'objet d'un examen par les pairs, et des coûts significatifs sont attachés à la gestion des espaces de stockage. Il reste que les articles peuvent être exportés de multiples manières (depuis des référentiels institutionnels ou disciplinaires vers des sites web personnels) et que les auteurs sont libres de publier leurs articles par le moyen de leur choix. À cela s'ajoute qu'il n'y a aucun surcoût pour eux.

La voie dorée ou « publication selon le modèle auteur-payeur », désigne la mise en ligne immédiate et en libre accès d'une publication par l'éditeur scientifique. Les coûts correspondants sont dans ce cas transférés du lecteur à l'auteur ou à l'établissement de recherche auquel celui-ci est affilié. Les organismes qui participent au financement des travaux de recherche peuvent aussi constituer une provision pour couvrir les coûts de mise en libre accès. Avec ce modèle, les coûts de publication doivent être pris en charge et le choix du mode de publication est restreint. Les articles cependant sont disponibles de manière immédiate, sans période d'embargo, et font généralement l'objet d'une licence Creative Commons (CC-BY) autorisant toute exploitation. De plus, les éditeurs proposent de plus en plus souvent des services innovants, certains d'entre eux allant jusqu'à dispenser de frais les auteurs dépourvus de financement institutionnel.

Source : OCDE (2015a).

procédures traditionnelles de publication, plus longues, conjuguée à celle de donner davantage de retentissement aux travaux scientifiques en allant à la rencontre d'un public plus large que le petit cercle des lecteurs de revues spécialisées.

L'information scientifique étant de plus en plus souvent examinée et diffusée par ces nouveaux biais, les modalités de publication et de reconnaissance des travaux ont amorcé leur mutation. Avec l'ouverture d'autres canaux de diffusion du savoir scientifique, les bases de données sur les citations recouvrent une frange toujours plus mince de la littérature spécialisée, en sorte que leur utilisation aux fins de la mesure des résultats et du retentissement des travaux se trouvera à terme complètement remise en cause. Cependant, aussi longtemps que prédominera une conception étroite de l'excellence, en vertu de laquelle on compte sur ces bases de données pour signaler la qualité de la recherche (critère important pour l'obtention de financement et l'évolution professionnelle des chercheurs), les itinéraires de publication traditionnels demeureront, quoiqu'ils fassent l'objet de certains aménagements censés accélérer le cours des choses, autoriser le libre accès dans certains cas et permettre la prise en charge de certaines fonctionnalités multimédias. Le surcroît d'attention porté aux enjeux sociaux dans les programmes de recherche nationaux et l'utilisation, dans le même temps, de l'intérêt pour le public en tant que critère d'évaluation de l'impact de la recherche vont par ailleurs remettre en question le recours actuel à la bibliométrie. L'emploi de nouveaux indicateurs (dits alternatifs) pourrait, à mesure que s'élargira la gamme des supports numériques et pratiques éditoriales compatibles, se généraliser en parallèle à l'utilisation d'indicateurs bibliométriques plus traditionnels pour apprécier le retentissement des travaux de recherche.

Ni son coût, ni sa lourdeur n'empêcheront l'examen par les pairs de demeurer un outil essentiel pour jauger la qualité de la recherche. Il est vraisemblablement appelé à évoluer un tant soit peu – ainsi des examens participatifs après publication pourraient venir compléter utilement les examens plus classiques – mais continuera de faire l'objet d'un contrôle pointilleux, non seulement en raison de son coût, mais aussi pour des questions de qualité, eu égard en particulier aux problèmes de reproductibilité que présentent bien des études publiées dans les revues scientifiques.

La transformation numérique de la science ouvrira plus largement l'accès à ses données. Les données ouvertes sont à même de rendre le système de recherche plus efficace et plus efficient en limitant le double emploi et en permettant le réemploi des données de recherche (OCDE, 2015a). Elles pourraient également contribuer à répondre aux préoccupations concernant la rigueur et la reproductibilité des résultats scientifiques publiés, grâce à la mise en accès libre, en ligne, des données sur lesquelles on s'est fondé pour les obtenir.

Si le principe du libre accès aux données scientifiques est déjà largement admis dans les pays de l'OCDE, son champ d'application demeure très variable (OCDE, 2015a). La raison en est que les ensembles de données sont plus difficiles à circonscrire et à définir que les articles de recherche. La diversité des données scientifiques et les divergences au niveau des habitudes et des normes relatives à leur traitement nuisent également à l'accessibilité et à l'interopérabilité des systèmes. Ces difficultés d'ordre technique sont cependant vouées à disparaître en l'espace de quelques années, et il est probable qu'une poignée de plateformes vont s'imposer en tant que supports pour le partage des données du système de recherche (encadré 3.3).

Par ailleurs, nombreux sont les obstacles qu'il faudra encore lever au cours de la prochaine décennie. Ainsi, les organismes publics de recherche, qui jusqu'à présent ont pris à leur charge

Encadré 3.3. Science des plateformes : vers un seul et unique « système d'exploitation scientifique » ?

Le numérique occupant une place toujours plus grande dans la gestion de la science et de la recherche, de nouvelles possibilités se font jour de lier des ensembles de données distincts, portant, en termes de couverture et d'impact, sur des domaines aussi différents que le financement de la recherche, les inventaires du matériel, les données de la recherche, les publications et les citations, les profils des chercheurs ou encore la présence sur les médias sociaux. Se pourrait-il que ces ensembles de données soient un jour réunis et intégrés verticalement pour ne former plus qu'un seul et unique « système d'exploitation scientifique » (Heller, 2016) ?

L'infrastructure des données de la recherche, telle qu'elle se dessine, fait intervenir de nombreux acteurs différents, parmi lesquels les chercheurs et les bailleurs de fonds, avec leur propres référentiels et systèmes d'information, les grandes maisons d'édition universitaires mais aussi de nouvelles entreprises proposant des services comparables à ceux de Facebook (en particulier ResearchGate et Academia.edu). Au nombre des initiatives engagées récemment pour développer cette infrastructure de données, le projet ORCID (Open Researcher and Contributor ID), projet international sans but lucratif soutenu par les pouvoirs publics de différents pays, vise à attribuer un identifiant unique aux chercheurs. Ces identifiants permettent une meilleure traçabilité des activités de recherche et d'innovation (demandes de bourse, soumissions d'article, etc.) et généreront de nouvelles données à des fins analytiques. Conscients des avantages qu'offre l'utilisation d'identifiants uniques normalisés, les bailleurs de fonds et les éditeurs sont de plus en plus nombreux, de par le monde, à intégrer le code ORCID dans leurs propres systèmes et à exiger son utilisation.

Si les diverses initiatives prises se recouvrent partiellement, elles exploitent généralement des informations issues de sources différentes et nul fournisseur aujourd'hui ne concentre suffisamment de données pour évincer ses concurrents (Heller, 2015). Les choses pourraient cependant ne pas en rester là, et les grands éditeurs universitaires ont probablement une longueur d'avance sur les autres pour ce qui est du développement, de l'acquisition et de l'intégration de services de données différents. Ainsi :

- Le groupe d'édition Holtzbrinck, qui détient les éditeurs Springer Nature et Digital Science, offre notamment un accès à des référentiels de données en ligne destinés au libre accès, un logiciel de rédaction et d'édition collaboratives, des identifiants uniques pour les organismes de recherche, des systèmes de gestion de l'information pour accompagner ces derniers dans la prise de décision, de nouveaux indicateurs permettant d'apprécier le retentissement des articles au-delà du contexte universitaire, et des systèmes d'aide à la décision destinés aux mécènes de la science.
- Autre acteur de premier plan, Elsevier Research Intelligence propose, parmi toute une gamme de services, une base de données bibliographiques, des systèmes de gestion de l'information aux fins de la prise de décision dans les universités et les EPR, des logiciels analytiques pour les études comparatives et les analyses tendanciennes, un outil d'identification des experts ainsi qu'un système gratuit de gestion des références et un réseau social ouvert librement aux universitaires.

Ces initiatives emmenées par de grands éditeurs universitaires pourraient-elles devenir les « plateformes protégées » de la science, comparables à celles proposées par Google, Apple, Facebook et Amazon ? D'autres solutions collaboratives, inductives et plus ouvertes pourraient-elles voir le jour avec les normes ouvertes et les interfaces de programmation d'application (IPA)⁵ (Heller, 2016) ? La question n'est pas tranchée pour le moment. Les normes ouvertes sont, au plan technologique, en mesure d'assurer l'interopérabilité aussi bien que le partage et la réutilisation des données mais d'autres facteurs (ainsi des effets de réseau, des préférences ou de la propriété des données personnelles) pourraient rendre les utilisateurs captifs d'un petit nombre de plateformes, voire d'une plateforme unique (CE, 2014a).

l'essentiel des coûts de stockage, de conservation et de mise à disposition, vont désormais se voir dans la nécessité de trouver des modèles de financement et d'activité qui soient viables. Les questions juridiques entourant la propriété des ensembles de données de grande

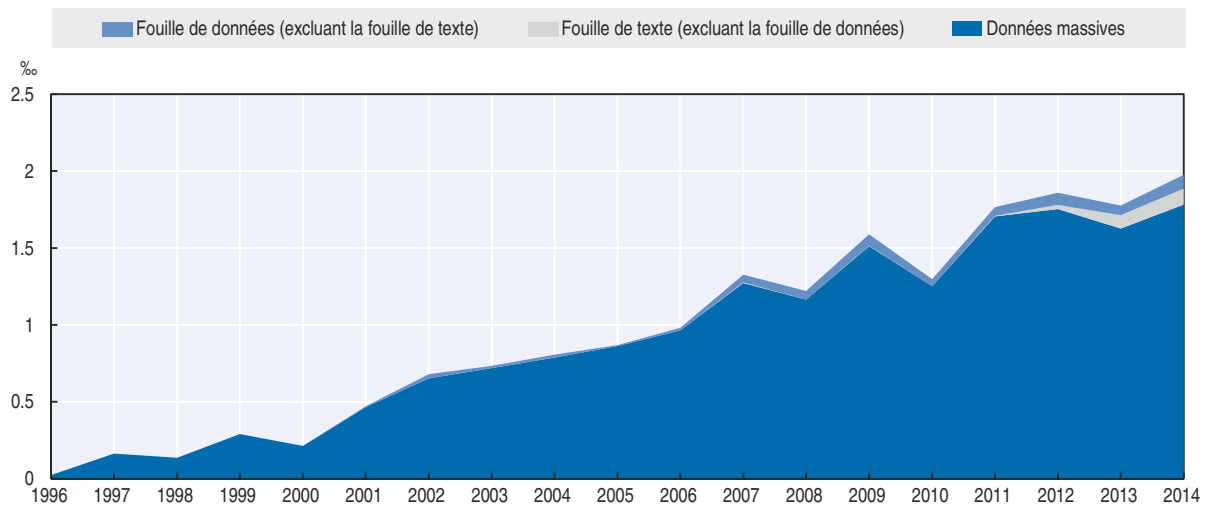
envergure, dont le contenu pourra fort bien avoir été collecté ou généré par des machines ou des fournisseurs de logiciels, tout comme les questions de protection de la vie privée, de confidentialité et de sécurité, s'annoncent épineuses mais ne manqueront pas d'être l'objet d'une attention considérable sachant que toutes les facettes du système public de recherche (qu'elles concernent les chercheurs, les éditeurs, les bailleurs de fonds ou les responsables politiques) ont à voir avec les données ouvertes. La libre communication en ligne des résultats de la recherche et la réutilisation de ces résultats, aussi bien que celle de données produites par des tiers, suppose au préalable un changement radical dans la culture universitaire, changement qui ne se fera pas du jour au lendemain et qu'il sera nécessaire d'encourager. Si la science a un caractère collaboratif, elle est aussi éminemment concurrentielle. Les scientifiques et les établissements auxquels ils appartiennent sont jugés essentiellement à l'aune de leurs publications dans des revues spécialisées et souvent à l'aide de mesures bibliométriques normalisées. Ils sont de ce fait peu portés à partager leurs données et leur matériel expérimental. Des mécanismes permettant de porter au crédit des intéressés les ensembles de données publiés et les activités menées en collaboration seront dès lors indispensables pour promouvoir les données ouvertes (voir le profil « Science ouverte »).

La mégascience crée des mégadonnées. La prolifération des capteurs dans la vie courante (à travers, par exemple, l'internet des objets, l'engouement pour la mesure de soi [*quantified self*] et la science citoyenne) et l'ouverture rapide des données de l'administration viendront renforcer significativement cette tendance. Cet afflux de données élargira, pour la science, l'horizon des possibles en même temps qu'il apportera de nouveaux défis, mais il demandera aussi des infrastructures et des compétences spécifiques, qui font défaut à l'heure actuelle. À cela s'ajoute l'existence de problèmes intrinsèques à la gouvernance des données. Un récent rapport sur les données massives au service de la recherche sur la démence en fait apparaître sept, qui concernent la disponibilité des données, l'interopérabilité, l'accessibilité, la propriété, la traçabilité et la confidentialité et la sécurité (Deetjen et al., 2015). Des champs de recherche totalement neufs s'ouvriront autour de l'exploration des données, leur confidentialité et leur sécurité, l'apprentissage automatique, l'intelligence artificielle, l'interopérabilité des bases de données, et autres domaines connexes. La puissance de traitement meilleur marché, les coûts d'équipement plus abordables et le numérique qui progresse à pas de géant vont concourir à accélérer les processus expérimentaux et à les rendre moins onéreux, le numérique devant quant à lui permettre une réplique plus rapide et fidèle des résultats obtenus (Brynjolfsson et McAfee, 2011). De manière plus générale, la R-D publique va s'automatiser de plus en plus, avec un recours accru à la robotique et au traitement à haut débit. La recherche verra ainsi sa portée et son efficacité démultipliées.


Les technologies de reconnaissance de formes viendront faciliter l'évaluation de la causalité avec des applications directes dans de nombreux domaines scientifiques (graphique 3.13). En effet, la science va s'appuyer dans une large mesure sur la vérification d'hypothèses générées par ordinateur à partir de modèles tirés de bases de données aux multiples dimensions. Les données vont de plus en plus préexister aux idées de recherche et guider les projets à caractère expérimental (CE, 2014b). La démarche scientifique repose à ce jour sur la vérification d'hypothèses. Celle-ci est éclairée par des modèles explicatifs qui, à leur tour, sont révisés à la lumière des découvertes scientifiques. Le processus de définition de modèles et l'utilité de ces modèles sont toutefois susceptibles d'évolution sachant que, dans certains domaines, les données contiendront tous les objets d'intérêt (elles seront exhaustives et non plus représentatives). Les démarches traditionnelles reposant sur la formulation d'hypothèses et de « grandes théories » seront complétées par

Graphique 3.13. La recherche axée sur les données se développe rapidement

Articles scientifiques en lien avec la fouille de données, pour mille articles, 1996-2014



Source : OCDE (2014d), *Measuring the Digital Economy: A New Perspective*, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264221796-en>, basé sur le recueil de données de ScienceDirect, www.sciencedirect.com, juillet.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433466>

la recherche fondée sur les données, laquelle prendra appui sur des volumes d'information colossaux et pourra faire intervenir des méthodologies et des algorithmes hybrides repris de différents domaines de recherche. On constate d'ores et déjà une inflexion en ce sens.

3.6. Quelles carrières offrira la recherche publique ?

En l'espace de deux décennies, le nombre de nouveaux doctorats a fortement augmenté partout dans le monde (graphiques 3.13 et 3.15). Les États-Unis restent le premier pays pourvoyeur de docteurs, suivis par l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Inde et, loin derrière, le Japon. Les grandes économies émergentes ont largement augmenté leurs capacités de formation dans l'enseignement supérieur, y compris aux niveaux universitaires les plus élevés, et les pays non membres de l'OCDE ont compté, en 2014, pour plus du quart des doctorats délivrés dans le monde. Cette même année 2014, le taux d'inscription en doctorat parmi la classe d'âge concernée était supérieur, en Chine, à la moyenne de l'OCDE (OCDE, 2016c) (voir le profil « Renforcer la formation et les compétences au service de l'innovation »). Dans les domaines des sciences naturelles et des sciences de l'ingénieur, en particulier, le pays arrivait en deuxième place, entre les États-Unis et l'Allemagne, au regard du nombre moyen d'étudiants ayant décroché un doctorat entre 2008 et 2012 (OCDE, 2015b).

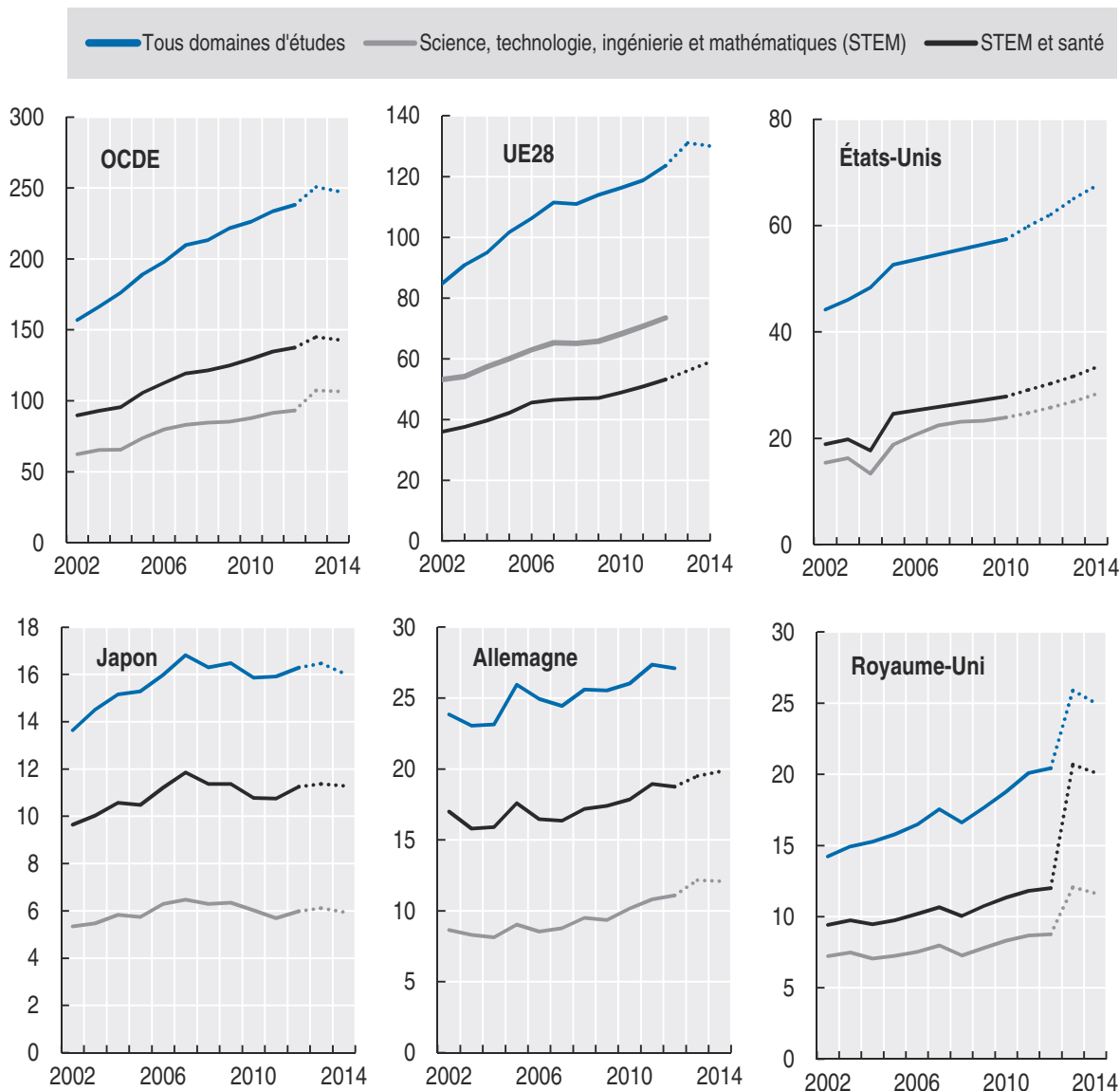
Certaines disciplines scientifiques sont plus populaires que d'autres parmi les doctorants. Près de 40 % de l'ensemble des nouveaux docteurs dans la zone OCDE obtiennent ainsi leur diplôme en sciences, en ingénierie ou en mathématiques (qui font partie des disciplines STEM), une proportion qui passe à 58 % si l'on y ajoute ceux qui décrochent un doctorat en rapport avec la santé (OCDE, 2016c). Les cursus doctoraux font la part belle aux sciences naturelles et aux sciences de l'ingénieur en France (59 %), au Canada (55 %) et en Chine (55 %).

On ignore encore comment l'offre et la demande de scientifiques se comporteront l'une par rapport à l'autre au cours des 15 années qui viennent. Le vieillissement démographique et la crainte d'un désintérêt des jeunes générations pour les sciences amènent les


rapport au nombre de nouveaux diplômés dans d'autres domaines, notamment dans les systèmes qui forment les plus vastes cohortes de docteurs (graphique 3.15) (voir le profil « Bâtir une culture de la science et de l'innovation »).

Graphique 3.15. **Le contingent des doctorats en science et ingénierie montre des signes de ralentissement**

Nombre de titulaires de doctorat, tous domaines d'études, STEM et santé, en milliers, 2000-14



Source : D'après OCDE (2016d), Statistiques et bases de données de l'OCDE sur l'éducation (données extraites le 23 juillet 2016).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433485>

Un « marché du travail duel » a fait son apparition dans les universités et les EPR sous l'effet de ces dynamiques, marché dans lequel on trouve d'un côté des chercheurs confirmés relativement bien rémunérés, souvent fonctionnaires permanents ou agents contractuels au bénéfice d'un contrat à durée indéterminée, et de l'autre un nombre croissant d'agents temporaires coûtant moins cher à rémunérer, recrutés sur des crédits non pérennes, que ce soit au sein de centres d'excellence ou au titre de projets de recherche financés après mise

en concurrence (Kergroach et Cervantes, 2006). Une récente enquête auprès de 38 pays membres ou partenaires de l'Union européenne a révélé un dualisme persistant, où une proportion significative des chercheurs du secteur de l'enseignement supérieur sont employés au titre d'un contrat de durée déterminée ou n'ont aucun statut contractuel, ces cas de figure se rencontrant essentiellement en début de carrière (Deloitte, 2014). En 2012, la proportion de chercheurs n'ayant « aucun contrat » ou ayant un contrat de moins d'un an était dix fois plus élevée chez les étudiants de doctorat et les jeunes diplômés (31%) que dans les dernières étapes de la recherche (3%). Près de 90 % des chercheurs en doctorat étaient en situation de travail précaire avec des horizons contractuels de moins de deux ans, tandis que 90 % des chercheurs de premier rang étaient à des postes permanents. Ce dualisme est source de problèmes pour les chercheurs concernés, qui se retrouvent dépourvus de réelle sécurité professionnelle sur le long terme et voient s'amenuiser leurs chances d'accéder à un emploi permanent ou d'être titularisés. Au-delà des questions de statut contractuel, ces chercheurs ont un régime salarial moins gratifiant, l'accès aux crédits de recherche, aux formations et aux programmes de développement de carrière leur est plus difficile, et, d'une manière générale, leurs perspectives de carrière sont moins assurées. Il n'est pas rare qu'un chercheur occupe deux sinon trois emplois post-doctoraux avant de décrocher un poste permanent à la veille de ses 40 ans – en supposant qu'il ait persévéré aussi longtemps dans la profession. De fait, ils sont de plus en plus nombreux à se trouver évincés des métiers de la recherche, ce qui conduit à s'interroger sur la rentabilité des lourds investissements publics consentis pour leur formation. La durée du cursus doctoral demeure relativement longue dans beaucoup de pays, c'est pourquoi la formation de nouveaux diplômés engendre des coûts élevés pour la société et les individus ; il s'ensuit aussi que le système a besoin de davantage de temps pour s'adapter lorsque la demande évolue.

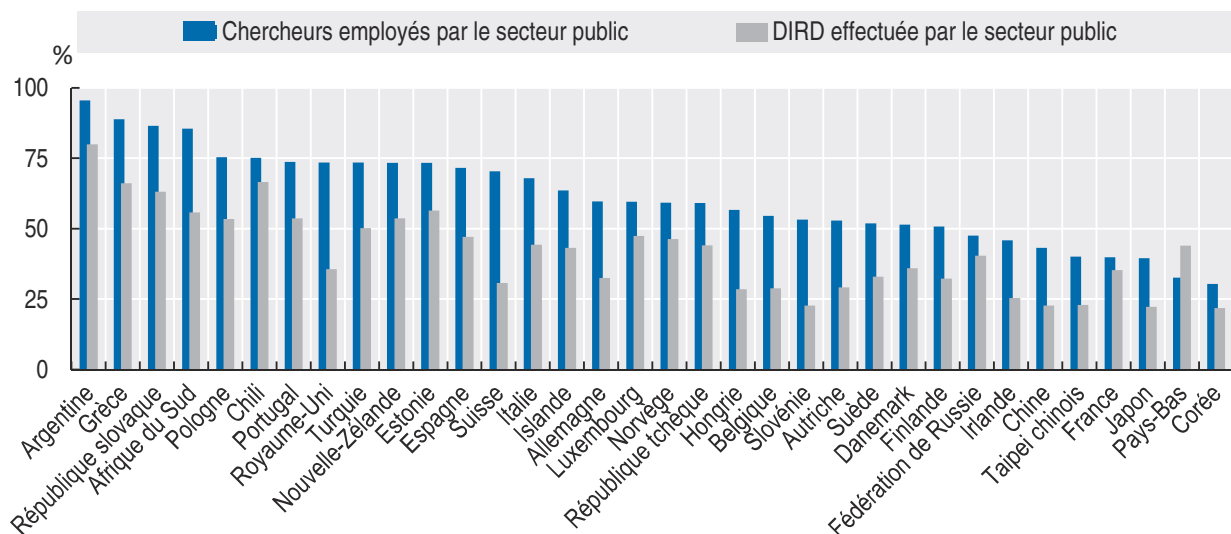
En résumé, alors que le financement par projet avec mise en concurrence demeure le mode privilégié de financement de la recherche, de fortes rigidités perdureront sur le marché du travail pour les chercheurs expérimentés, et les contrats de travail à courte durée resteront majoritaires jusqu'en milieu de carrière. L'augmentation substantielle du nombre de places en doctorat ou post-doctorat observée au cours des dernières décennies est depuis peu sérieusement remise en question devant les difficultés que beaucoup de scientifiques rencontrent pour accéder à la stabilité professionnelle. Néanmoins, un recul du nombre des doctorants et chercheurs post-doctoraux serait problématique pour la recherche publique, laquelle, dans son organisation actuelle, compte sur le flot ininterrompu de ces scientifiques pour mener à bien une bonne part de ses travaux.


De nombreux titulaires de doctorat (et, de plus en plus, de chercheurs post-doctoraux) abandonnant la recherche, l'idée fait son chemin de leur assurer une formation qui les munisse de compétences transférables et les amène à se frotter à l'industrie et à d'autres secteurs d'activité. Néanmoins, de nombreux pays auraient encore à faire pour que leurs formations doctorales épousent davantage les besoins du marché et pour ouvrir de plus larges horizons professionnels par le recours aux stages, mais aussi permettre la portabilité des bourses doctorales vers l'industrie. Cette nécessité de pourvoir à un meilleur appariement retiendra une attention grandissante de la part des pouvoirs publics dans les années à venir. La formation offerte aux nouveaux chercheurs dans le cadre de doctorats et post-doctorats devra par conséquent être élargie du fait que nombre de ces chercheurs abandonnent la R-D publique pour gagner d'autres segments de l'économie. Cependant, un tel changement se heurtera probablement à l'opposition des responsables de laboratoire, qui comptent beaucoup sur des doctorants et post-doctorants corvéables à merci pour l'exécution des

activités courantes de leurs établissements. En l'absence d'encouragements ou d'évolution culturelle de grande ampleur, ces responsables ne seront guère portés à donner à leur personnel l'autorisation de prendre part à des travaux de recherche non essentiels.

En tant que principaux employeurs de personnel de R-D, et par le moyen d'accords de performance conclus avec les universités et les EPR, les pouvoirs publics sont en mesure d'exercer une influence sur la carrière des chercheurs. La part du secteur public dans l'emploi de chercheurs est disproportionnée, même dans les pays où la majorité des activités de R-D sont conduites par le secteur des entreprises (graphique 3.16)⁶. Les pouvoirs publics ont également la possibilité d'intervenir en amont, en redéfinissant les programmes doctoraux qui apparaissent de plus en plus comme la voie royale à emprunter pour qui vise une carrière dans la recherche (Cervantes et al., à paraître). Cependant, leur capacité de rehausser l'attractivité des métiers de la recherche, tout comme les leviers dont ils disposent à cet effet, pourrait bien évoluer au fur et à mesure que les activités de R-D se concentrent dans le secteur des entreprises, que les actions visant à encourager le recrutement de chercheurs dans ce secteur portent leurs fruits et qu'un nombre croissant de ces chercheurs sont employés par des organisations ne relevant pas de la sphère publique.

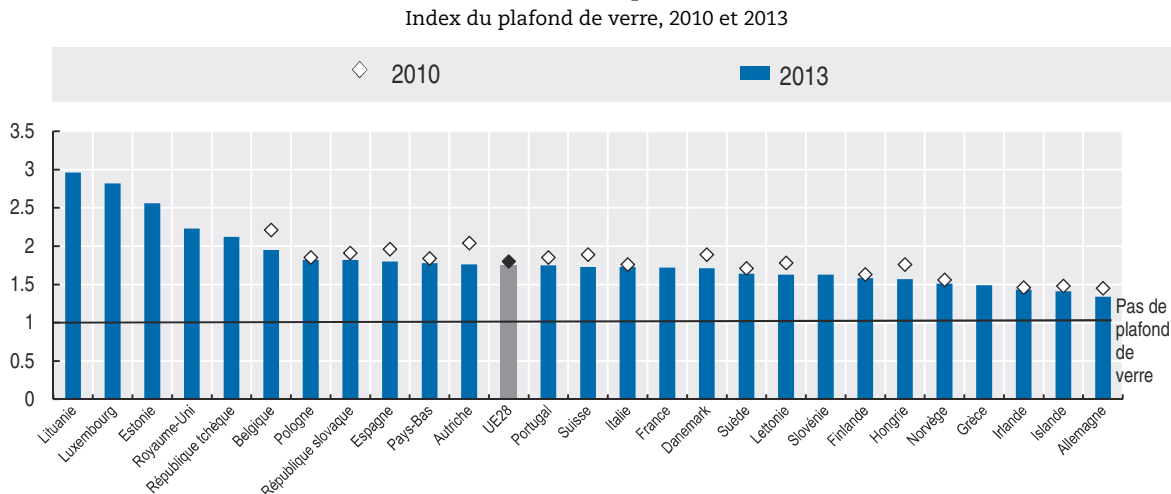
Graphique 3.16. **Le secteur public emploie une part disproportionnée de chercheurs salariés**
Part de DIRD et proportion de chercheurs dans le secteur public, 2014 ou dernière année disponible



Source : D'après OCDE (2016a), *Principaux indicateurs de la science et de la technologie* (base de données PIST), juin, www.oecd.org/fr/sti/pist.htm.
StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433495>

Après les progrès réguliers de ces dernières années (graphique 3.17), la féminisation du personnel de R-D du secteur public va se poursuivre et l'on trouvera davantage de femmes aux postes à responsabilités. Les changements n'en resteront pas moins lents, en dépit de toute l'attention que les dirigeants pourront leur consacrer. Des freins continueront probablement à agir sur la participation des femmes aux activités scientifiques. Les stéréotypes sexistes ont la vie dure : l'organisation du travail demeurera insuffisamment compatible avec la vie de famille et les mécanismes de sélection et de promotion à caractère discriminatoire (par exemple, jurys exclusivement ou essentiellement masculins, non prise en compte des activités où les femmes sont le plus largement représentées, comme l'enseignement, aux fins de certaines procédures) ne changeront pas de sitôt. Dans bien des

Graphique 3.17. Les femmes restent éloignées des positions académiques supérieures en Europe



Note : L'Index du plafond de verre (Glass Ceiling Index[GCI]) est un indice comparant la proportion de femmes dans le milieu universitaire (grades A, B et C) avec la proportion de femmes occupant des postes universitaires supérieurs (postes de grade A, équivalant à des postes de professeur titulaire dans la plupart des pays) pour une année donnée. Le GCI peut aller de 0 à l'infini. Un GCI de 1 indique qu'il n'y a pas de différence entre les femmes et les hommes en termes de leurs chances de promotion. Un score inférieur à 1 signifie que les femmes sont plus représentées au grade A que dans le milieu universitaire en général (grades A, B et C) et un score GCI de plus de 1 indique la présence d'un « plafond de verre », ce qui signifie que les femmes sont moins représentées dans les postes de catégorie A que dans le milieu universitaire en général (grades A, B et C). En d'autres termes, l'interprétation du GCI veut que plus la valeur est élevée, plus l'effet de plafond de verre est fort et plus il est difficile pour les femmes d'accéder à des postes supérieurs.

Source : Commission européenne (2016), SHE Figures 2015, https://ec.europa.eu/research/swafs/pdf/pub_gender_equality/she_figures_2015-final.pdf (données extraites le 22 avril 2016).

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433507>

pays, les femmes se heurteront encore et toujours à un plafond de verre dans les métiers de la recherche. Alors qu'elles sont nettement plus nombreuses que les hommes en licence et en master, elles ont beaucoup moins de chances qu'eux de suivre un programme scientifique de niveau supérieur, d'occuper un poste élevé au sein d'une université et moins encore de diriger une université ou un établissement public de recherche (graphique 3.17).

Avec la transformation numérique et l'ouverture de ses activités, la science devra faire appel à de nouveaux éventails de talents. Le développement des compétences relatives aux données sera indispensable à une utilisation efficace des nouveaux ensembles de données, outils et méthodes que les scientifiques auront à leur disposition. Ces outils étant appelés à être employés dans toutes les disciplines, y compris en sciences humaines, les chercheurs actifs dans les domaines correspondants auront sans doute bien besoin d'une remise à niveau. L'ouverture de la science et les liens étroits qu'elle noue avec l'industrie exigeront d'eux qu'ils renforcent leurs compétences « annexes », notamment en ce qui concerne la gestion de projet, le travail en équipe et la sensibilisation au monde de l'entreprise et aux enjeux de la propriété intellectuelle. De récentes enquêtes sur le comportement des scientifiques nous révèlent par exemple que tous ne sont pas nécessairement au fait des possibilités qu'offre la science ouverte (voir par exemple OCDE, 2015a).

3.7. Quels seront les résultats et impacts attendus de la recherche publique ?

La progression des investissements consacrés à la recherche publique que l'on observe depuis une quinzaine d'années environ s'est aussi traduite par une multiplication des publications scientifiques (graphique 3.18, diagrammes 1 et 2). Cela a été le cas en particulier

Graphique 3.18. La production scientifique a augmenté dans le monde entier, mais les classements d'excellence sont lents à changer

Diagramme 1. Production scientifique

Nombre de publications scientifiques, pour une sélection de pays, 2003-12

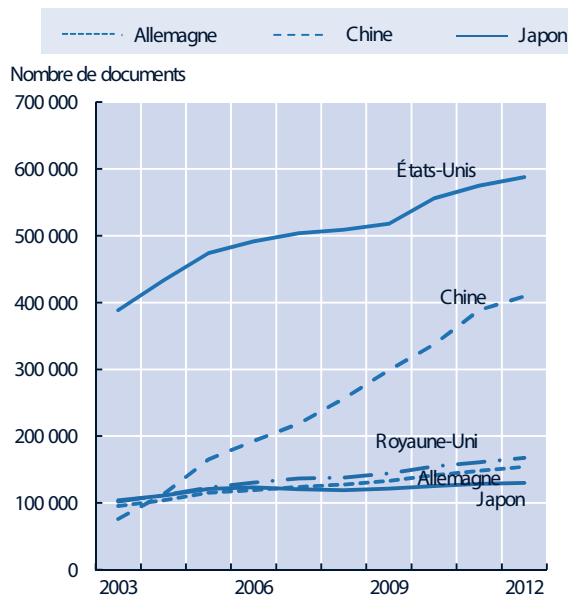
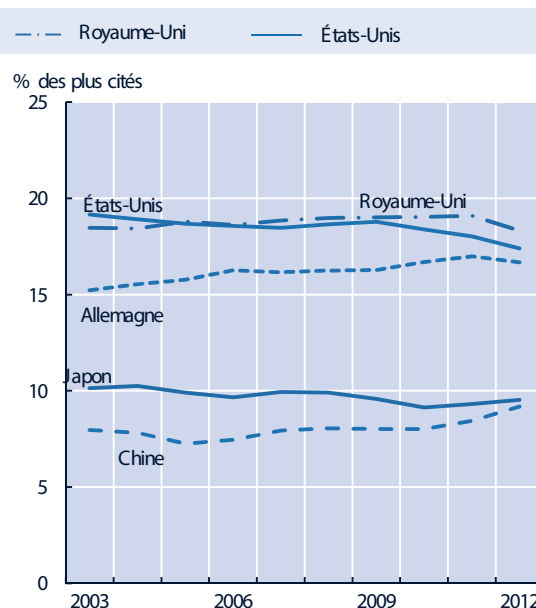


Diagramme 2. Excellence scientifique

Part de chaque pays parmi les 10% les plus cités pour une sélection de pays, 2003-12



Note : La production scientifique correspond au nombre total d'articles publiés dans des revues scientifiques indexées dans la base Scopus (sont inclus tous les types de documents). L'excellence reflète le pourcentage de la production scientifique d'une entité figurant parmi les 10 % des publications les plus citées dans les domaines correspondants. Cet indicateur est utilisé comme mesure de la qualité de la production des établissements de recherche. Bien qu'imparfait, cet indicateur est communément utilisé pour mesurer l'excellence de la recherche.

Source : OCDE (2015b), *Science, technologie et industrie : Tableau de bord de l'OCDE 2015 : L'innovation au service de la croissance et de la société*, http://dx.doi.org/10.1787/sti_scoreboard-2015-fr.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433519>

en Chine, où en l'espace de dix ans, de 2003 à 2012, le nombre de ces publications a plus que quadruplé. La proportion de travaux chinois parmi les 10 % de publications les plus citées n'a que faiblement augmenté dans le même temps et si le pays se trouve *grosso modo* au coude à coude avec le Japon sur ce plan, il demeure en revanche loin derrière les États-Unis, le Royaume-Uni et l'Allemagne. Cultiver l'excellence en recherche restera l'un des grands défis de la Chine à moyen terme, et quant à égaler le taux de citation des puissances scientifiques historiques, il reste vraisemblablement du chemin à parcourir. L'Allemagne a cependant montré qu'il est possible de s'améliorer de ce point de vue, même si le volume des publications scientifiques y a progressé de façon bien plus modeste qu'en Chine au cours de la période considérée⁷.

Parallèlement à l'évolution de la recherche stratégique au service d'enjeux de société majeurs et en synergie avec elle, la tendance mondiale au développement du financement concurrentiel a conduit la plupart des administrations à introduire des critères de performance dans le financement de base des institutions et à faire un recours accru aux dispositifs de type contractuel (OCDE, 2014e). En conséquence, ces administrations font appel à des instruments tels que des accords de performance, de nouveaux mécanismes de financement et des indicateurs de performance pour mettre les activités de recherche publique au diapason des priorités nationales et améliorer les performances scientifiques (OCDE, 2014a). Il est probable que les choses n'en resteront pas là, même si le mouvement se

heurtera sans doute à des difficultés, voire à des résistances. Les limites des indicateurs de performance, qui tiennent notamment au fait que tout ne peut pas être mesuré par ce moyen, au coût induit par la collecte des données nécessaires de même qu'aux possibles triches sur les mesures et distorsions préjudiciables des comportements, font que l'utilisation de ces indicateurs restera contestée (encadré 3.4).

Encadré 3.4. Pour de meilleurs indicateurs et leur utilisation appropriée

Si les dernières années ont vu se généraliser l'utilisation d'indicateurs applicables à la science et à l'innovation, les spécialistes de la scientométrie, les scientifiques et les administrateurs de la recherche sont toujours plus nombreux à s'alarmer de ce que de tels indicateurs soient quasi systématiquement employés mal à propos aux fins de l'évaluation de la recherche (Hicks et al., 2015). Parmi les reproches les plus fréquemment exprimés, citons le caractère biaisé de la répartition des citations entre les revues ou domaines scientifiques et la piètre pertinence de l'impact des revues lorsqu'il s'agit de juger des qualités intrinsèques d'un chercheur ou d'une équipe de scientifiques. Dans le même ordre d'idées, il y a lieu de penser que de plus en plus de citations sont faites par calcul (autocitations, influence des réseaux de relations, etc.).

Promouvant l'idée que la recherche ne devrait être évaluée que sur la base de ses qualités intrinsèques, trois initiatives appelées à faire date ont donné lieu à la formulation de plusieurs recommandations visant à améliorer l'utilisation d'indicateurs aux fins de son évaluation.

La **Déclaration de San Francisco sur l'évaluation de la recherche (2012)** dans laquelle il est recommandé à l'ensemble des acteurs de la recherche de ne plus utiliser d'indicateurs bibliométriques comme mesures de substitution pour juger de la qualité des scientifiques ou de leurs travaux. Les organismes de financement sont invités plus particulièrement à prendre en compte la valeur et l'impact de toutes les productions et à utiliser une large palette de mesures d'impact, notamment des indicateurs qualitatifs. Les personnes physiques et morales sont invitées à s'associer à cette déclaration en inscrivant leur nom au bas de celle-ci (www.ascb.org/dora), qui comptait plus de 12 000 signataires à la fin de l'année 2015.

Le **Manifeste de Leiden (2015)** présente dix principes applicables à l'évaluation de la recherche sur la base d'indicateurs et a pour point de départ l'idée que les évaluations sont de plus en plus souvent réalisées par des structures ignorantes des bonnes pratiques concernant les indicateurs et de la manière dont il convient de les interpréter, et ne bénéficiant d'aucun conseil en la matière. Ces dix principes, exposés dans la prestigieuse revue *Nature* (Hicks et al., 2015), soulignent le caractère complémentaire de la description quantitative et de l'évaluation qualitative réalisée par des experts ; reconnaissent la singularité des conditions d'exécution et la nécessité de procéder à des évaluations adaptées en conséquence ; encouragent la protection des travaux de recherche importants à l'échelle locale (par exemple, les publications non anglophones) ; insistent sur le fait qu'il est souhaitable que les pratiques d'évaluation aient un caractère ouvert et transparent en plus d'être intègres et rigoureuses ; appellent à une meilleure prise en compte des biais notoires en matière de publications et de citations ; suggèrent de diffuser les résultats d'évaluation avec toutes les précisions et tous les éclaircissements nécessaires, de manière à prévenir de possibles effets délétères pour les systèmes de recherche pris dans leur ensemble (triche, falsification de l'objectif visé) ; et rappellent enfin la nécessité de réévaluer régulièrement les indicateurs et de les faire évoluer au gré des changements qui interviennent aux niveaux des missions de la recherche et des buts des évaluations.

La **Metric Tide (2015)** contient des recommandations au sujet de l'évaluation de la recherche formulées sur la base d'un examen, réalisé au Royaume-Uni, des rôles que les indicateurs quantitatifs pourraient jouer à l'avenir dans la gouvernance, l'évaluation et la gestion de la recherche. Il est ressorti de cet examen qu'il fallait des avis d'experts, des indicateurs quantitatifs et des mesures qualitatives à « géométrie variable », tenant compte du caractère divers de la recherche, pour que les évaluations soient réellement fiables. Les recommandations mettent aussi en avant la notion « d'indicateurs responsables », satisfaisant à des critères de fiabilité, de modestie, de transparence, de diversité et de réflexivité. Dernièrement, un examen indépendant a été réalisé dans le cadre du Research Excellence Framework (Royaume-Uni) dont il est ressorti

Encadré 3.4. Pour de meilleurs indicateurs et leur utilisation appropriée (suite)

que, à l'exception d'un petit nombre de disciplines subalternes, les indicateurs ne restituaient jamais que quelques aspects de la qualité des résultats (Département des Affaires, de l'Énergie et des Stratégies industrielles, 2016). Dans ses recommandations, il met notamment en lumière la nécessité d'élargir et approfondir la notion d'impact pour inclure dans son périmètre l'influence sur la participation du public, la culture et l'enseignement ainsi plus généralement que l'action des pouvoirs publics et les applications ; la sous-représentation de la recherche interdisciplinaire ; et les avantages que les institutions et le pays dans son ensemble retireraient d'un emploi plus productif des données et enseignements tirés des évaluations.

Si le monde de la recherche aura sans doute bien du mal à se passer des indicateurs bibliométriques traditionnels, il est probable que ces trois initiatives marqueront un tournant vers l'adoption de mécanismes d'évaluation plus diversifiés et fiables dans les dix années à venir.

Sources : ASCB (2012) ; Hicks et al. (2015) ; Ministère des Entreprises, de l'Énergie et de la Stratégie industrielle du Royaume-Uni (2016) ; Wilsdon et al. (2015).

La commercialisation des résultats de la recherche publique est devenue depuis quelques décennies l'un des objectifs majeurs des politiques scientifiques et technologiques nationales, en même temps que l'une des fonctions principales des universités et des laboratoires publics (OCDE, 2013b). Les mesures visant à encourager la coopération entre industriels et scientifiques et accélérer la diffusion des résultats de la recherche publique parmi la société se multiplient tandis qu'un nombre croissant d'intermédiaires des systèmes de recherche s'emploient à faciliter et favoriser les transferts (bureaux de transfert de technologies, fonds de brevets, courtiers en propriété intellectuelle, etc.). Les efforts déployés n'ont été que partiellement récompensés, ce qui s'explique notamment par leur caractère inopportun dans les nombreux cas de figure où le transfert de connaissances et de technologies s'effectue plus efficacement par d'autres voies. Après leur progression vertigineuse observée au cours des 15 ans écoulés, les dépôts de brevet commencent déjà à refluer car les universités et les laboratoires publics adoptent une démarche plus stratégique et sélective pour constituer leurs portefeuilles de propriété intellectuelle. Le succès mitigé rencontré par les bureaux universitaires de transfert de technologies pendant la dernière quinzaine d'années a par ailleurs suscité de nouveaux mécanismes, parmi lesquels des plateformes qui sont à la fois interinstitutionnelles – à l'image des sociétés d'accélération du transfert de technologies (SATT), en France – et spécialisées dans tel ou tel domaine de recherche ou telle ou telle technologie.

Durant les 15 prochaines années, les politiques vont appréhender les bienfaits socio-économiques de la recherche publique dans une perspective toujours plus large qui sera à la mesure des liens toujours plus étroits et nombreux que les universités et les laboratoires publics établiront avec la société, à l'échelon local et au-delà. Les écosystèmes de la recherche et de l'innovation se faisant plus ouverts et plus complexes – avec davantage d'acteurs et d'interactions – les universités et les EPR entretiendront des rapports plus nourris, dans le cadre de leurs activités, avec les groupes de patients, les communautés de makers, les groupes environnementaux, etc. L'entrepreneuriat étudiant connaîtra sans doute lui aussi un certain essor, à la faveur d'une diversification des cursus menant au doctorat.

3.8. À quoi ressembleront la politique et la gouvernance de la recherche publique ?

Les tendances et problématiques mises en lumière dans le présent chapitre ont toutes une incidence sur la politique STI et les cadres connexes. Le fait est que l'évolution

pressentie dans le système de recherche public au cours de 10 à 15 prochaines années demandera une réaction de la part des pouvoirs publics en même temps qu'elle sera façonnée par les inflexions des politiques suivies. Les accords de financement entre les administrations, d'une part, et les universités et EPR, d'autre part, demeureront le principal instrument d'exécution des politiques de recherche publique en même temps qu'un important facteur de changement dans le paysage de cette dernière. Les mécanismes de réglementation et de gouvernance joueront également un rôle déterminant.

La dernière partie du présent chapitre est consacrée à l'examen de quatre tendances propres aux pratiques futures dans le champ de la politique STI. La première d'entre elles concerne l'influence grandissante de ce que l'on appelle « la recherche et l'innovation responsables », qui font une plus large place à la participation du public dans la formulation de cette politique. La deuxième tient à l'essor de la pensée *design* et de l'expérimentation dans la formulation et l'exécution des politiques, l'idée étant d'aboutir à une politique STI plus facilement adaptable. Arrive en troisième lieu la montée en puissance du numérique dans la politique STI, avec notamment l'analytique des données massives et les possibilités qu'elle offre d'agir avec plus de pragmatisme. Dans le même ordre d'idées, la quatrième tendance a trait à l'évolution de la formulation d'avis scientifiques à l'intention des pouvoirs publics.

La recherche et le changement technologique comportent des risques et ont des implications éthiques qui conduiront très probablement la société au sens large à s'investir plus activement dans le domaine de la science. Les valeurs publiques sont appelées à devenir des critères de premier plan pour l'évaluation de la recherche. L'accent mis depuis peu sur les dimensions éthique et sociétale de cette dernière se traduit d'ores et déjà par la formulation de mesures promouvant la recherche et l'innovation responsables. Ces mesures semblent signer un changement de paradigme, puisqu'il ne s'agit plus de former le public mais de mettre en adéquation les activités STI avec les objectifs poursuivis par la société. L'une des solutions retenues à cet effet par les gouvernements consiste à chercher les moyens d'associer de manière plus précoce et plus fréquente le public au processus de recherche pour l'intégrer à leur politique STI (voir le profil « Participation du public à la politique STI »). Ces dernières années, plusieurs pays ont inscrit la définition des stratégies STI dans une démarche participative et consultative (CE/OCDE, à paraître). Avec la nouvelle approche que constituent la recherche et l'innovation responsables, les administrations entendent prévoir et estimer les implications potentielles de ces activités ainsi que les attentes qu'elles suscitent au sein de la société, dans un souci d'inclusivité et de durabilité. Donner corps à cette ambition par de nouvelles pratiques et modalités de gouvernance n'en sera pas moins un défi de taille. Qui plus est, les craintes des scientifiques et des responsables politiques qui redoutent que la recherche et l'innovation responsables ne soient un obstacle et un frein au progrès des sciences et ne nuisent à la compétitivité des établissements de recherche nationaux continueront également de peser sur les décisions qui seront prises à cet égard dans l'avenir.

Dans le cadre d'un mouvement en faveur de l'innovation dans le secteur public (encadré 3.5), la pensée *design* et l'expérimentation sont appelées à devenir plus courantes dans la formulation et l'exécution des politiques, les gouvernements cherchant à se rendre plus réactifs et innovants. Essais pilotes, prototypage et autres outils expérimentaux appartenant au domaine du *design* vont être de plus en plus utilisés pour mettre en œuvre, sans se hasarder, de nouvelles approches et minimiser les risques que peut comporter l'innovation dans le champ politique. Procéder ainsi favorisera l'apprentissage et permettra

de voir rapidement, avant d'avoir investi des ressources considérables, si un projet est voué à l'échec. S'inspirant de précurseurs tels le Danemark avec son Mindlab et le Royaume-Uni avec son Policy Lab, de nombreux pays mettront en place des « laboratoires de politiques », des unités dans lesquelles les principes du design seront appliqués aux services publics. Amorcer ces changements n'ira pas de soi, des obstacles considérables devront être levés. Il faudra ainsi élargir la palette de compétences des fonctionnaires afin que ceux-ci soient en mesure de suivre les expérimentations, en faire une évaluation et procéder aux ajustements nécessaires, et, alors que les dépenses publiques sont au régime sec, veiller à ce que le secteur public ait à sa disposition les ressources et les moyens dont il a besoin pour innover (Daglio, Gerson et Kitchen, 2014).

Les tendances récentes à la codification et à l'ouverture des données publiques offriront l'occasion de mieux comprendre le fonctionnement de la science et de l'innovation et de retracer l'évolution suivie par les décisions touchant la politique STI et l'impact de celle-ci. Les progrès des technologies numériques rendront possible la création de nouvelles infrastructures de données et ouvriront plus largement encore la diffusion, la mise en relation et la réutilisation de différents types de données. Ces infrastructures auront une influence sur les pratiques et l'organisation des administrations. Elles offriront ainsi de nouvelles possibilités d'évaluation par une meilleure mise en correspondance des moyens et des résultats et promettent, pour prendre un autre exemple, une meilleure coordination de l'action publique ainsi qu'une participation plus active des acteurs non étatiques grâce au partage d'information et de données.

Encadré 3.5. L'innovation dans le secteur public

Depuis quelques années, l'innovation est un impératif qui gagne en importance dans les programmes et initiatives des pouvoirs publics. L'expérimentation tend de plus en plus à faire partie intégrante de la formulation des politiques et des activités de service pour que l'on puisse mieux s'adapter à une complexité qui va croissant et rester en phase avec les attentes des usagers. De nouveaux outils et de nouvelles approches – de l'analytique de données au prototypage en passant par la pensée design – sont employés dans le secteur public pour maîtriser l'incertitude et pour répondre à l'évolution des demandes des utilisateurs qui attendent désormais des services numériques personnalisés et des processus automatisés appropriés, capables de rivaliser en efficacité et en efficacité avec l'industrie. Un peu partout dans le monde, des innovateurs appartenant au secteur public sont mis à l'honneur dans le cadre de manifestations et reçoivent prix et récompenses.

La concrétisation des espoirs fondés dans un secteur public innovant demeurera cependant un parcours semé d'embûches. Certes des progrès ont été accomplis, mais il subsiste des lacunes. Aux quatre coins du monde, des innovateurs sont encore aux prises avec les lourdeurs et l'inertie de l'administration, qui anesthésient l'initiative. Les administrateurs n'ont pas d'accès direct aux techniques et aux outils nécessaires pour innover. Aux cadres incombe la difficile tâche de sélectionner, recruter et engager des fonctionnaires démontrant les compétences et l'esprit qui conviennent. S'ajoute une compréhension insuffisante, dans le secteur public, de la notion de risque et de la gestion de celui-ci, qui a un effet inhibiteur sur les innovateurs.

Source : Abrégé de Daglio, M. (2016), « Public Sector Innovation: the Journey Continues... », contribution au blog de l'Observatoire de l'innovation dans le secteur public, www.oecd.org/governance/observatory-public-sector-innovation/blog/page/publicsectorinnovationthejourneycontinues.htm.

De nombreux pays se dotent d'ores et déjà d'infrastructures de données quantitatives et qualitatives pour servir à la formulation d'une politique STI plus pragmatique. Certaines de ces infrastructures s'inscrivent dans le cadre d'initiatives d'envergure portant sur l'administration ouverte ou les données massives, tandis que d'autres sont plus spécifiques au domaine de la politique STI, ainsi des différents projets de type « la science au service de la politique scientifique » lancés depuis cinq ou dix ans (voir le profil « L'évaluation et l'étude d'impact des politiques STI ».) De nouvelles infrastructures, créées dans un but commercial ou non, se font aussi de plus en plus nombreuses et pourraient exercer une influence décisive sur l'avenir de l'infrastructure de données STI. Le rôle des organismes nationaux de statistique est sans doute appelé à évoluer du fait que les données concernant la science et l'innovation se répartissent entre plusieurs référentiels appartenant à des organismes publics ou à des opérateurs privés.

La matérialisation du potentiel des nouvelles infrastructures de données STI pose cependant différents problèmes. Au nombre de ceux-ci, la définition de normes qui permettront la désambiguïsation et la mise en relation des données non structurées⁸. Pour exploiter les données administratives aux fins des politiques de la science et de l'innovation, il faudra également pouvoir s'appuyer sur de nouvelles compétences et capacités spécialisées (par exemple en analytique des données) au sein de la fonction publique ainsi que sur une culture de l'utilisation des données tout au long du cycle de l'action publique. De nouvelles approches seront en outre nécessaires pour rendre les données plus intelligibles et faciliter leur représentation graphique.

La communauté scientifique continuera d'être sollicitée par les administrations pour fournir aux responsables de la formulation des politiques éléments d'appréciation et conseils à l'égard d'une large palette de questions allant des urgences sanitaires de l'immédiat à des enjeux de plus long terme, comme le vieillissement démographique ou le changement climatique. Néanmoins, les structures consultatives scientifiques feront probablement l'objet d'une réforme si, comme cela semble devoir être le cas, elles sont de plus en plus souvent appelées à se saisir de problèmes d'envergure mondiale qui présentent de multiples facettes, évoluent en permanence et sont intrinsèquement complexes.

Les efforts déployés en vue de rendre les politiques de la recherche plus responsables risquent d'exposer l'université à une surveillance plus étroite aussi bien qu'à la critique (voir le profil « Bâtir une culture de la science et de l'innovation »). Le monde scientifique ne s'en trouvera peut-être que plus vivement incité à apporter des réponses et des solutions claires et dépourvues d'ambiguïté, même s'il est tout aussi probable qu'il n'en soit rien, car il se pourrait bien que les citoyens venant à s'y intéresser finissent par mieux réaliser à quel point les données scientifiques ont, pour une bonne part, un caractère provisoire. Les avis scientifiques pourraient être plus largement débattus et contestés dans certains cas, tout particulièrement lorsqu'ils touchent à des questions aussi sensibles que les aliments génétiquement modifiés, les vaccinations infantiles, l'exploitation de gaz de schiste et l'édition génomique. Lorsque les avis scientifiques, les valeurs et convictions sociales, les considérations économiques et les décisions politiques se superposent et divergent, il faut s'attendre à de fortes tensions (OCDE, 2015c).

Le caractère international des avis scientifiques sera en outre renforcé par des structures nouvelles ou renouvelées à ce même niveau et par une internationalisation accrue des dispositifs nationaux existants. Le rôle des organes consultatifs internationaux, par exemple, continuera de s'étoffer pour être à la mesure du nombre toujours plus grand de

problématiques transnationales (parmi lesquelles, le changement climatique, la sécurité hydrique, énergétique et alimentaire, la lutte contre les épidémies, etc.) où se mêlent intimement science, technologie et société. Parallèlement à cela, les administrations encourageront les structures consultatives scientifiques à nouer des liens plus étroits avec leurs homologues internationaux pour favoriser l'échange de données, d'informations, de compétences spécialisées et de bonnes pratiques (OCDE, 2015c).

Notes

1. Le montant des dépenses brutes de R-D au niveau mondial est estimé à partir de la somme des dépenses intérieures brutes de R-D (DIRD) des pays de l'OCDE, de l'Argentine, de la Chine, de la Colombie, de la Fédération de Russie, de la Lettonie, de la Lituanie, de Malte, de la Roumanie, de Singapour, et du Taipei chinois. En ce qui concerne l'Afrique du Sud, l'Argentine, l'Australie, les États-Unis, la Fédération de Russie, la Nouvelle-Zélande, Singapour et la Suisse, les estimations ont été établies à prix constants de 2014. À prix constants de 2010, le montant des dépenses au niveau mondial est par conséquent estimé à 792 milliards USD en PPA pour l'an 2000 et 1 540 milliards USD en PPA pour l'année 2014.
2. Les crédits budgétaires publics de R-D (CBPRD) correspondent aux montants alloués par les pouvoirs publics à la R-D pour atteindre différents objectifs socio-économiques. Ces objectifs sont définis au regard de la vocation première de la source de financement. Dans certains pays, une partie des ressources destinées à la recherche sans affectation spécifique, fonds généraux des universités inclus, sont dédiés aux sciences médicales. Les budgets de R-D dédiés à la santé peuvent sous-estimer le financement public total de la R-D liée à la santé. Pour que le tableau soit plus complet, la part des crédits de recherche sans affectation spéciale et des fonds généraux des universités consacrés aux sciences médicales pourrait être prise en compte dans la mesure du possible. On s'est essayé à une telle analyse dans la dernière édition du *Tableau de bord STI de l'OCDE* (OCDE, 2015b).
3. Selon Sarewitz (2012), « Bien que le NIH soit, à certains égards, une agence de missions, ses priorités, sa force de travail et l'image qu'elle a cultivée mettent l'accent sur la science fondamentale ».
4. Parmi les autres aspects caractéristiques d'un système scientifique ouvert, citons l'examen par les pairs après publication, les carnets de recherche ouverts, les logiciels libres, la science citoyenne et le financement participatif de la recherche (OCDE, 2015a).
5. Une API (interface de programmation d'applications) facilite le partage de contenu et de données entre les applications, afin que le contenu créé dans un seul endroit puisse être affiché dynamiquement et mis à jour dans plusieurs endroits sur le Web.
6. Les données d'enquête recueillies par l'OCDE en 2009 au sujet de 16 de ses membres nous révèlent que c'est souvent dans l'enseignement supérieur que l'on retrouve la majeure partie des titulaires de doctorat travaillant en tant que chercheurs, ce qui montre bien de la part des intéressés une prédilection pour les carrières universitaires (Auriol et al., 2013).
7. Cette progression n'en demeure pas moins considérable, et des taux de croissance analogues ont été mesurés pour les autres grandes puissances scientifiques également. Si l'on part du principe que la grande majorité des publications scientifiques émanent de la recherche publique, alors leur croissance est plus rapide que celles des ressources humaines et financières dont dispose cette dernière et résulte de changements dans les comportements de publication qui sont manifestes depuis une bonne vingtaine d'années. Les données concernant le Royaume-Uni sont peut-être l'illustration de ce phénomène, qui nous montrent des budgets alloués à la recherche publique quasiment stables quand le nombre de publications scientifiques s'envole. Une culture de la performance valorisant largement les publications scientifiques explique l'obtention de tels résultats, mais il existe certainement une limite au nombre de ces publications.
8. Les données non structurées, comme leur nom l'indique, ne sont pas structurées, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas organisées d'une manière et selon un modèle prédéfinis. Elles ne sont généralement pas stockées dans des bases de données relationnelles, ce qui complique leur exploration, leur mise en relation et leur analyse.

Références

- ASCB (American Society for Cell Biology) (2012), *San Francisco Declaration on Research Assessment*, www.ascb.org/dora (consulté le 17 juillet 2016).
- Auriol, L., M. Misu et R.A. Freeman (2013), « Careers of Doctorate Holders: Analysis of Labour Market and Mobility Indicators », *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*, n° 2013/04, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5k43nxgs289w-en>.
- Boyle, P.M. et P.A. Silver (2009), « Harnessing nature's toolbox: Regulatory elements for synthetic biology », *Journal of The Royal Society Interface*, n° 6, Issue suppl. 4, pp. 535-S546, <http://dx.doi.org/10.1098/rsif.2008.0521.focus>.
- Broad, W. (2014), « Billionaires With Big Ideas Are Privatizing American Science », *The New York Times*, 15 mars, www.nytimes.com/2014/03/16/science/billionaires-with-big-ideas-are-privatizing-american-science.html?_r=0 (consulté le 17 juillet 2016).
- Brynjolfsson, E. et A. McAfee (2011), *Race Against The Machine: How the Digital Revolution Is Accelerating Innovation, Driving Productivity, and Irreversibly Transforming Employment and the Economy*, Digital Frontier Press, Lexington, Massachusetts.
- CE (Commission européenne) (2016), *SHE Figures 2015*, Commission européenne, Luxembourg, https://ec.europa.eu/research/swafs/pdf/pub_gender_equality/she_figures_2015-final.pdf (consulté le 22 avril 2016).
- CE (2014a), *Science 2.0: The deep unbundling*, rapport du European Forum on Forward-Looking Activities (EFFLA), Commission européenne, Bruxelles, <http://espas.eu/orbis/sites/default/files/generated/document/en/15%20EFFLA%20Study%20-%20Osimo%20-%20Science%202.0.pdf> (consulté le 17 juillet 2016).
- CE (2014b), *RIF Research & Innovation Futures 2030: Exploring the Future of Research. Trends and Drivers in Doing and Governing Research*, Commission européenne, Bruxelles.
- CE/OCDE (Organisation for Economic Co-operation and Development), *International Database on Science, Technology and Innovation Policies (STIP)*, édition 2016, www.innovationpolicyplatform.org/ecoecd-stipdatabase.
- Cervantes, M., S. Kergroach et A. Nieto (à paraître), « Research careers: International perspectives from the EC/OECD International Database on STI Policies », *Documents de travail de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris.
- Daglio, M. (2016), « Public Sector Innovation: The Journey Continues... », contribution au blog de l'Observatoire de l'innovation dans le secteur public, www.oecd.org/governance/observatory-public-sector-innovation/blog/page/publicsectorinnovationthejourneycontinues.htm.
- Daglio, M., D. Gerson et H. Kitchen (2014), « Building Organisational Capacity for Public Sector Innovation », document de référence de la conférence de l'OCDE « L'innovation dans le secteur public : de l'idée à l'impact », Paris, 12-13 novembre 2014, www.oecd.org/innovating-the-public-sector/Background-report.pdf.
- Deetjen, U., E.T. Meyer et R. Schroeder (2015), « Big Data for Advancing Dementia Research: An Evaluation of Data Sharing Practices in Research on Age-related Neurodegenerative Diseases », *Documents de travail de l'OCDE sur l'économie numérique*, n° 246, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5js4sbd7jk-en>.
- Deloitte Consulting (2014), *Rapport 2014 sur la situation des chercheurs : Rapport final*, Commission Européenne, Bruxelles, http://ec.europa.eu/euraxess/pdf/research_policies/Researchers%20Report%202014_FINAL%20REPORT_translation_en_FR.pdf (consulté le 20 juillet 2016).
- ESFRI (Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche) (2016), *ESFRI Roadmap 2016 : Strategy Report on Research Infrastructures*, https://ec.europa.eu/research/infrastructures/index_en.cfm?pg=esfri-roadmap (consulté le 17 juillet 2016).
- Eurostat (2016), *Bases de données sur les indicateurs de la R-D*, juin, <http://ec.europa.eu/eurostat/web/science-technology-innovation/data/main-tables> (consulté le 17 juillet 2016).
- Heller, L. (2016), « Five Minutes with Lambert Heller: "Do we need an open operating system of science?" », blog LSE Impact, <http://blogs.lse.ac.uk/impactofsocialsciences/2016/01/14/five-minutes-with-lambert-heller-open-operating-system-of-science/> (consulté le 14 janvier 2016).
- Heller, L. (2015), « What will the scholarly profile page of the future look like? Provision of metadata is enabling experimentation », blog LSE Impact, <http://blogs.lse.ac.uk/impactofsocialsciences/2015/07/16/scholarly-profile-of-the-future/> (consulté le 16 juillet 2016).

- Hicks, D. et al. (2015), « Bibliometrics: The Leiden Manifesto for research metrics », *Nature*, vol. 520, pp. 429-431, www.nature.com/news/bibliometrics-the-leiden-manifesto-for-research-metrics-1.17351 (consulté le 17 juillet 2016).
- IPP.Stat (Plateforme des politiques d'innovation) (2016), Portail statistique des indicateurs de la science, de la technologie et de l'innovation, www.innovationpolicyplatform.org/content/statistics-ipp (consulté le 26 juillet 2016).
- ISU (Institut de statistique de l'UNESCO) (2016), Indicateurs concernant la science et la technologie, juin, www.uis.unesco.org/ScienceTechnology/Pages/defaultFR.aspx?SPSLanguage=FR.
- Kergroach, S. et M. Cervantes (2006), « Complete Results of the SFRI Questionnaire on the Working Conditions of Researchers in the Universities and Public Research Organisations », Direction de la science, de la technologie et de l'innovation, OCDE, document interne.
- Laakso, M. et B.-C. Björk (2012), « Anatomy of open access publishing: A study of longitudinal development and internal structure », *BMC Medicine*, vol. 10, p. 124, www.biomedcentral.com/1741-7015/10/124 (consulté le 11 juin 2015).
- Ministère des Entreprises, de l'Énergie et de la Stratégie industrielle du Royaume-Uni (2016), « Building on Success and Learning from Experience; An Independent Review of the Research Excellence Framework », juillet, www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/541338/ind-16-9-ref-stern-review.pdf.
- Murray, F. (2012), « Evaluating the Role of Science Philanthropy in American Research Universities », NBER Working Paper n° 18146, juin, www.nber.org/papers/w18146.ack (consulté le 17 juillet 2016).
- OCDE (2016a), Principaux indicateurs de la science et de la technologie (base de données PIST), juin, www.oecd.org/sti/msti (consulté le 17 juillet 2016).
- OCDE (2016b), Statistiques de la recherche et développement (SRD) (base de données) avril, www.oecd.org/fr/innovation/inno/srd.htm (consulté le 17 juillet 2016).
- OCDE (2016c), *Regards sur l'éducation 2016 : Les indicateurs de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/fr/edu/Regards-sur-l-education-19991495.htm.
- OCDE (2016d), Statistiques et bases de données de l'OCDE sur l'éducation, juin, www.oecd.org/fr/education/base-de-donnees.htm.
- OCDE (2015a), « Making open science a reality », *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, n° 25, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/5jrs2f963zs1-en>.
- OCDE (2015b), *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 et www.oecd.org/fr/sti/science-technologie-industrie-tableau-de-bord.htm (consulté le 17 juillet 2016).
- OCDE (2015c), « 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/10.1787/5js331jcpwb-en>.
- OCDE (2014a), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2014*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2014-fr.
- OCDE (2014b), *Emerging Policy Issues in Synthetic Biology*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264208421-en>.
- OCDE (2014c), *International Distributed Research Infrastructures: Issues and Options*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/sti/sci-tech/international-distributed-research-infrastructures.pdf.
- OCDE (2014d), *Measuring the Digital Economy: A New Perspective*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264221796-en>.
- OCDE (2014e), *Promoting Research Excellence: New Approaches to Funding*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264207462-en>.
- OCDE (2013a), *Science, technologie et industrie : Tableau de bord de l'OCDE 2013 : L'innovation au service de la croissance*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_scoreboard-2013-fr.
- OCDE (2013b), *Commercialising Public Research: New Trends and Strategies*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264193321-en>.
- OCDE (2012), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2012*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2012-fr.

- OCDE (2010), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2010*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2010-fr.
- Piwowar, H. et T.J. Vision (2013), « Data reuse and the open data citation advantage », *PeerJ*, 1:e175, <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.175>.
- Piwowar, H., R.S. Day et D.B. Frisma (2007), « Sharing detailed research data is associated with increased citation rate », *PLoS one*, vol. 2, n° 3, <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0000308>.
- Sarewitz, D. (2012), « Blue-sky bias should be brought down to Earth », *Nature*, vol. 481, 5 janvier, www.nature.com/polopoly_fs/1.9722!/menu/main/topColumns/topLeftColumn/pdf/481007a.pdf (consulté le 17 juillet 2016).
- Wilsdon, J. et al. (2015), *The Metric Tide: Report of the Independent Review of the Role of Metrics in Research Assessment and Management*, Higher Education Funding Council for England, Londres, <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4929.1363>.

Chapitre 4

Évolutions récentes des politiques nationales de la science et de l'innovation*

De nombreux pays de l'OCDE et au-delà sont aux prises avec des défis économiques et sociétaux sans précédent et pensent trouver dans la science et l'innovation des clés pour les affronter. Les données récentes tirées d'une enquête conjointe de la Commission européenne et de l'OCDE sur les politiques de la science et de l'innovation montrent qu'ils ont consacré, ces dernières années, beaucoup d'attention et d'efforts à la prise en charge des impératifs économiques immédiats et à la mise en place de politiques plus efficaces, influentes et responsables. Dans un contexte de croissance atone et de contraintes budgétaires fortes, nombre de gouvernements ont détourné leur attention et leur soutien de la recherche publique pour se concentrer sur l'innovation des entreprises et l'entrepreneuriat, dans le but de stimuler le potentiel des entreprises en tant que moteur d'une reprise plus dynamique et durable. Des efforts ont également été déployés pour renforcer les capacités d'évaluation des politiques nationales afin de gagner en efficacité et de mieux orienter les politiques en matière de science, technologie et innovation (STI) à l'appui des objectifs sociétaux.

Le présent chapitre fait un tour d'horizon des évolutions récentes des politiques nationales de la science et de l'innovation dans les pays membres de l'OCDE et dans les principales économies émergentes, dont l'Afrique du Sud, le Brésil, la Chine, la Fédération de Russie, l'Inde et l'Indonésie. Il examine les conditions économiques et financières qui déterminent les comportements d'innovation et façonnent aujourd'hui l'élaboration des politiques dans ce domaine. Il expose les grandes thématiques à l'ordre du jour dans les pays en matière de politiques STI, ainsi que les dernières modifications en date apportées aux panoplies de mesures nationales. Le chapitre s'appuie sur les réponses des pays à l'enquête internationale sur les politiques dans les domaines de la science, de la technologie et de l'innovation (International Survey of Science, Technology and Innovation Policy, STIP), menée conjointement par la Commission européenne et l'OCDE, ainsi que sur les travaux que cette dernière a consacrés récemment aux politiques de la science et de l'innovation.

* Note de la Turquie : « Les informations figurant dans ce document qui font référence à "Chypre" concernent la partie méridionale de l'île. Il n'y a pas d'autorité unique représentant à la fois les Chypriotes turcs et grecs sur l'île. La Turquie reconnaît la République Turque de Chypre Nord (RTCN). Jusqu'à ce qu'une solution durable et équitable soit trouvée dans le cadre des Nations Unies, la Turquie maintiendra sa position sur la "question chypriote" ».

Note de tous les États de l'Union européenne membres de l'OCDE et de la Commission européenne : La République de Chypre est reconnue par tous les membres des Nations Unies sauf la Turquie. Les informations figurant dans ce document concernent la zone sous le contrôle effectif du gouvernement de la République de Chypre.

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.

Messages clés

- Les derniers chiffres de la croissance mondiale s'avèrent décevants. Les perspectives de marché peu engageantes ont freiné l'investissement des entreprises, frappant notamment les activités d'innovation. Les investissements dans le capital intellectuel et la recherche et développement (R-D) semblent avoir atteint un palier dans de nombreux pays, nonobstant le dynamisme relatif dont ils ont fait preuve durant la crise et par la suite. Bien que les dépenses de R-D des entreprises aient retrouvé leurs niveaux d'avant-crise, après la chute amorcée en 2009, la situation financière des petites et moyennes entreprises (PME) demeure délicate dans la plupart des pays.
- Les pays suivent des itinéraires différents en matière de développement de leur capacité d'innovation, du fait de conditions économiques variables : si certains sont aux prises avec une croissance lente depuis plus de dix ans (tel est le cas du Japon et de plusieurs pays membres de l'Union européenne), d'autres ont connu un rythme plus soutenu (la Corée, Israël, l'Australie, les États-Unis, par exemple). L'Europe affiche des disparités notables de profils d'investissement dans l'innovation, ce qui pourrait menacer, à terme, la cohésion économique du continent. Les pays pris dans un cycle de croissance faible risquent d'accuser un retard croissant, tandis que le fossé devrait se creuser avec les champions mondiaux de l'innovation.
- Les investissements publics en faveur de la R-D et les plans de relance exceptionnels ont compensé partiellement la baisse des dépenses de R-D des entreprises pendant et après la crise. Toutefois, compte tenu des contraintes budgétaires en perspective et de l'évolution récente des budgets publics consacrés à la R-D, qui devraient continuer de ralentir voire reculer dans les années à venir, la reprise des dépenses de R-D ne pourra venir de l'investissement public.
- L'action des pouvoirs publics vise de plus en plus à rendre les entreprises mieux à même d'investir dans la R-D et l'innovation, ainsi qu'à accroître l'efficacité de la panoplie de mesures à l'appui de la science, de la technologie et de l'innovation. Les gouvernements se sont montrés particulièrement actifs dans quatre domaines en rapport avec la science, la technologie et l'innovation (STI) entre 2014 et 2016, à savoir :
 1. le financement de l'innovation des entreprises et de l'entrepreneuriat, notamment via la restructuration de la panoplie de mesures, et le renforcement du soutien en faveur des PME et de leur internationalisation
 2. la rationalisation des dépenses publiques de recherche, le resserrement des liens entre recherche publique et recherche privée, et la promotion de la recherche interdisciplinaire et de la science ouverte
 3. la pérennisation de l'offre de talents et l'instauration d'une culture de l'innovation
 4. l'amélioration de la gouvernance des politiques STI, une attention particulière étant portée à leur évaluation et à l'élaboration de politiques de recherche et innovation responsables (RIR).

- Pour sortir du cycle de croissance atone, les gouvernements se sont employés à restaurer les conditions propices à la compétitivité nationale. Le développement de la capacité d'innovation transformatrice de l'industrie nationale forme l'un des éléments essentiels des plans adoptés en faveur de la science, de la technologie et de l'innovation dans de nombreux pays de l'OCDE et économies émergentes.
- Dans l'ensemble, l'action des pouvoirs publics dans le domaine de la STI a légèrement évolué ces dernières années, à la fois en termes de priorités, de modalités et de ciblage. Une fraction croissante des dépenses publiques de R-D est consacrée au secteur des entreprises et non plus au système de recherche publique, ce qui signe une modification des objectifs stratégiques (accroître la capacité d'innovation des entreprises), des instruments et des cibles (les entreprises) de l'action publique.
- La rationalisation des programmes d'action en faveur de l'innovation des entreprises s'affirme comme une question de première importance, l'idée étant de faciliter l'accès aux aides publiques et de faire en sorte que le plus grand nombre en bénéficie. Bien des pays ont procédé à des regroupements et des fusions parmi les dispositifs existants, tandis que le volume global des aides accordées était laissé inchangé, lorsqu'il n'augmentait pas.
- Les gouvernements ont adopté une approche « zéro dépense », donnant la préférence aux moyens d'action qui n'impliquent pas de dépenses publiques supplémentaires à court terme, à commencer par les marchés publics et les incitations fiscales à la R-D et à l'innovation.
- La passation de marchés publics figure désormais en bonne place dans les programmes d'action en faveur de l'innovation, et les initiatives visant à encourager l'innovation des entreprises par ce biais se sont multipliées, ce qui en fait l'un des domaines d'action STI les plus dynamiques. Il faut sans doute s'attendre à de nouvelles réformes, sachant que de plus en plus de pays entendent que les instruments agissant sur la demande acquièrent à l'avenir davantage de poids.
- Les pouvoirs publics attachent toujours une grande attention à l'articulation des aides directes et indirectes à l'innovation des entreprises, par le biais essentiellement des subventions accordées sur appel d'offres et des incitations fiscales à la R-D, deux instruments généralement prépondérants dans la panoplie de mesures. Toutefois, la perception de l'importance des incitations fiscales à la R-D est liée au coût budgétaire induit et leur utilisation reste très inégale d'un pays à l'autre.
- Les régimes fiscaux en faveur de la R-D ont connu des changements plus profonds entre 2014 et 2016 qu'au cours des années précédentes. Comme par le passé, des règles particulières ont été ajoutées afin de rendre les dispositifs existants plus généreux et mieux adaptés aux PME et aux jeunes entreprises. Plus récente en revanche est la tendance qui s'affirme chez les pouvoirs publics à vouloir mettre ces dispositifs davantage au service du transfert de technologie.
- De nombreux pays ont entrepris de repenser leur panoplie de mesures afin d'aider les PME et les start-ups à accéder aux marchés mondiaux. L'internationalisation des pôles, autre vecteur essentiel d'intégration des PME aux réseaux de connaissances mondiaux, a elle aussi reçu une attention accrue de la part des pouvoirs publics.
- Certains pays revoient actuellement leur politique de recherche publique dans le but d'en améliorer l'efficacité. À rebours de la tendance qui se dégage à l'échelle mondiale en faveur d'un financement plus concurrentiel et d'un recours accru à des dispositifs de

type contractuel, quelques pays, tout particulièrement en Europe du Nord, ont décidé d'augmenter les dotations globales.

- Les sources de financement de la recherche publique ont également évolué du fait du rôle croissant de l'industrie. Les partenariats public-privé (PPP) offrent la possibilité de partager les risques, les ressources et les orientations. Les fondations scientifiques philanthropiques et privées, quoiqu'elles soient encore de petite taille, tendent de plus en plus à compléter les sources de financement public.
- De nombreux pays ont réajusté les priorités des domaines de recherche stratégiques de manière à affronter les défis sociétaux. De plus, soucieux d'ouvrir des brèches dans le cloisonnement des disciplines, certains ont réformé la gouvernance de la recherche publique et restructuré les établissements de recherche et d'autres parties prenantes.
- Les efforts déployés en faveur de la science ouverte ont été centrés sur la création de cadres juridiques idoines et la formulation d'orientations pratiques sur le libre accès et les données ouvertes. Les pays sont de plus en plus nombreux à prendre des dispositions imposant le libre accès. Le nombre de pays ayant entrepris de moderniser leurs infrastructures ou d'actualiser leur législation et leurs mécanismes de financement de la recherche pour favoriser le libre accès et l'ouverture des données a augmenté de 50 % entre la période 2012-14 et la période 2014-16.
- Les politiques d'éducation ont également évolué pour tenir compte de l'élargissement de l'éventail de compétences nécessaires à l'innovation. D'où l'accroissement des budgets consacrés à l'enseignement des sciences, des technologies, de l'ingénierie et des mathématiques (STIM), les initiatives déployées pour rendre ces disciplines plus attrayantes aux yeux des jeunes, ou encore les programmes actualisés en vue de développer les compétences génériques, les aptitudes en matière de résolution de problèmes et l'esprit d'entreprise.
- De nombreux pays ont cherché à bâtir une « culture » de la science et de l'innovation afin de renforcer la participation et le soutien du public dans les domaines de la science et de l'entrepreneuriat. Ils se sont employés par exemple à développer les capacités nécessaires pour populariser la science, et à promouvoir l'esprit d'entreprise et encourager la créativité sur le lieu de travail.
- Les tendances récentes en matière d'évaluation des politiques sont marquées par une utilisation accrue des données administratives publiques et des technologies numériques pour la collecte des données (« données massives »), par des évaluations de moindre portée et plus rapides, et par une complexité croissante des concepts et des pratiques. Face aux risques grandissants de mauvaise affectation des ressources publiques et de conflit entre les différentes mesures, on assiste à une généralisation des évaluations systémiques.
- Dans l'ensemble, les efforts déployés visaient à bâtir une base de connaissances fondée sur des données probantes, via la systématisation de l'évaluation, la mise en œuvre d'une approche pangouvernementale de l'évaluation, l'harmonisation des pratiques et la création d'infrastructures de données et de communautés d'experts.
- Si le ralentissement économique est au centre de l'attention, les dimensions éthique et sociétale de la recherche deviennent de plus en plus prégnantes et s'invitent dans l'élaboration des politiques de RIR.
- Les gouvernements s'efforcent de privilégier une approche globale de la gouvernance en renforçant les dispositifs de coordination à tous les niveaux, et en impliquant l'industrie et

la société en amont du débat politique. Les principes de recherche et d'innovation responsables ont trouvé leur place dans la formulation des programmes en faveur de l'innovation, sont intégrés dans les programmes de financement existants, ou s'adressent aux organismes et institutions qui interviennent dans l'exécution des politiques (tels les organismes de financement).

Introduction : l'héritage du passé récent

Le présent chapitre fait un tour d'horizon des évolutions mondiales récentes des politiques en matière de STI.

Les pays de l'OCDE sont confrontés à des défis sans précédent : creusement des inégalités de revenus dans un contexte de faible croissance économique mondiale, vieillissement démographique, changement climatique, épuisement des ressources naturelles et autres problématiques environnementales, fragmentation accrue des chaînes de valeur mondiales (CVM), ou encore évolution des modes de vie et des attentes sociétales. La science, la technologie et l'innovation peuvent impulser une nouvelle révolution de la production et dopper la productivité, limiter le changement climatique et découpler croissance et dégradation de la qualité de l'environnement, et aider à relever un large éventail de défis sociétaux au service de l'équité et de la cohésion (voir chapitres 1 et 2). Prenant conscience de ce potentiel, les pays de l'OCDE et au-delà ont renforcé leurs capacités nationales en matière de STI et fait de l'innovation une priorité d'action (OCDE, 2014a).

La réponse des pays face à la crise financière de 2008-09 a confirmé la place de l'innovation dans les programmes d'action publique (OCDE, 2012). De nombreux plans de relance nationaux lui ont fait la part belle, ainsi qu'à la recherche (OCDE, 2009). Les gouvernements ont investi massivement dans la mise à niveau des infrastructures STI, les dépenses consacrées à la recherche publique jouant pour leur part un rôle de tampon en compensant partiellement la baisse de celles que les entreprises affectent à la R-D. Beaucoup d'entre eux ont en outre introduit une composante écologique plus marquée dans leurs dispositifs d'action (OCDE, 2010). Toutefois, l'austérité budgétaire d'après-crise était déjà de mise dans bien des pays en 2013-14, avec des coupes dans les crédits publics de R-D et souvent une érosion de la capacité d'intervention des gouvernements dans ce domaine. Dans le même temps, ceux-ci avaient également remis à plat l'aide financière en faveur de l'innovation des entreprises et de l'entrepreneuriat au cours de la dernière décennie, afin, entre autres, de remédier au tarissement des sources conventionnelles de financement des PME.

Le présent chapitre aborde un certain nombre de problématiques, dont les éléments de conjoncture économique et financière qui déterminent les comportements et les politiques d'innovation. Y sont présentées les conditions de l'action publique dans ce domaine, de même que les grandes priorités du moment dans les capitales en ce qui concerne les politiques STI de manière plus générale, ainsi que les dernières modifications en date apportées aux panoplies de mesures nationales. Il y sera également question des initiatives prises récemment par les gouvernements pour répondre à des impératifs économiques plus immédiats, par exemple pour stimuler le potentiel d'innovation des entreprises et mettre en place des politiques plus efficaces et influentes ; de la réorientation des systèmes de recherche publique, dans le but notamment d'en favoriser l'ouverture ; et des tentatives d'améliorer la gouvernance des politiques STI, ainsi de l'accent mis sur la responsabilité et l'éthique dans leur formulation.

Le chapitre s'appuie sur les réponses des pays à l'enquête internationale sur les politiques dans les domaines de la science, de la technologie et de l'innovation (*International Survey of Science, Technology and Innovation Policy, STIP*), menée conjointement par la Commission européenne et l'OCDE (encadré 4.1). Cette enquête porte sur les défis, les orientations et les actions en matière de politiques STI dans l'ensemble des pays de l'OCDE ainsi que dans certaines économies partenaires. Une analyse approfondie de ses résultats est disponible en ligne, dans les profils des politiques et les profils par pays des *Perspectives STI 2016*.

Encadré 4.1. **Enquête internationale CE/OCDE sur les politiques en matière de science, de technologie et d'innovation (STIP)**

En 2015, l'OCDE et la Commission européenne ont uni leurs forces pour créer une enquête et une base de données communes sur les politiques STI nationales. Cette enquête et cette base de données sont uniques de par leur nature, leur objet et leur champ d'application. L'enquête vise à examiner, tous les deux ans, les principales évolutions de l'arsenal de mesures prises dans le cadre des politiques STI nationales et des mécanismes de gouvernance. Elle s'appuie sur les travaux conceptuels menés sous l'égide du Comité de la politique scientifique et technologique (CPST) de l'OCDE pour cartographier les actions entreprises en faveur de l'innovation (Kergroach et al., à paraître-a). Elle va au-delà de l'ancien questionnaire en vue des *Perspectives STI* de l'OCDE et comporte des questions pertinentes au regard des priorités de l'Union européenne en matière de recherche et d'innovation. L'enquête couvre tous les aspects des politiques STI, notamment les initiatives menées par les différents ministères et agences nationales compétents dans une variété de domaines, de la recherche à l'innovation, en passant par l'éducation, l'industrie, l'environnement, le travail, ou encore les questions financières et budgétaires. Les réponses sont fournies par les représentants des gouvernements. Le CPST et le CEER (Comité de l'Espace européen de la recherche et de l'innovation) travaillent de concert pour garantir la pertinence des contributions nationales. Les réponses sont harmonisées, puis organisées en vue d'être intégrées dans la base de données STIP.

Cette coopération Commission européenne/OCDE porte la couverture de l'enquête à 54 pays, dont 35 pays membres de l'OCDE, des grandes économies émergentes (à savoir l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, la Colombie, le Costa Rica, l'Égypte, la Fédération de Russie, l'Inde, l'Indonésie, la Lituanie, la Malaisie, le Pérou, la République populaire de Chine et la Thaïlande), et des États de l'Union européenne non membres de l'OCDE (la Bulgarie, Chypre, la Croatie, Malte et la Roumanie), auxquels s'ajoute la Commission européenne. Au total, la couverture de l'enquête et de la base STIP représente, selon les estimations, 98 % de la R-D mondiale.

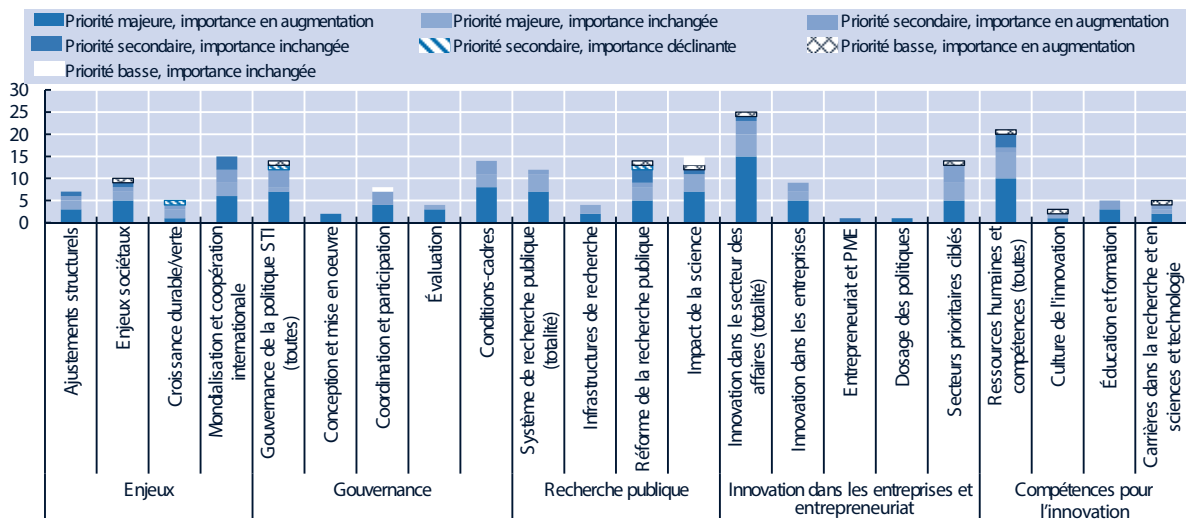
L'enquête STIP de 2016 a été réalisée entre fin octobre 2015 et début mars 2016. Au cours de cette période, 52 réponses ont été transmises, soit un taux de retour de 95 %. Les réponses ont été recueillies via un questionnaire Excel amélioré, spécialement conçu à cet effet.

4.1. Vue d'ensemble des résultats de l'enquête STIP

Les réponses des pays à l'enquête internationale CE/OCDE STIP de 2016 révèlent le fort intérêt, souvent grandissant d'ailleurs, que de nombreux gouvernements portent au renforcement des fondamentaux du triangle de la connaissance, à savoir la recherche publique, l'innovation des entreprises et l'entrepreneuriat, et les compétences (graphique 4.1). La grande thématique des politiques STI pour l'année 2016 tient au rôle que les pouvoirs publics peuvent jouer pour encourager l'innovation des entreprises et l'entrepreneuriat, un sujet auquel bien des pays attachent une importance élevée – et croissante.

Graphique 4.1. L'attention générale en matière de politiques STI se concentre sur l'innovation des entreprises et sur les compétences

Domaines prioritaires par degré d'importance, sur un total de 51 pays ayant répondu au questionnaire STIP 2016



Note : Les priorités en matière de politique STI sont définies sur la base des réponses en auto-évaluation de chaque pays aux questions suivantes : « 1) Quelles sont les principales priorités en matière de politique STI dans votre pays ? Veuillez choisir trois (au maximum cinq) priorités de la politique STI dans les listes déroulantes ci-dessous et indiquer le degré d'importance de chacune ; 2) Comment a évolué l'importance relative de ces priorités ces cinq dernières années ? Leur importance a-t-elle augmenté ou diminué ? Veuillez classer ces changements potentiels de niveau d'importance sur ces cinq dernières années. » Les indices de domaines prioritaires par degré d'importance ont été calculés la base de notations nationales. Les réponses sont fournies par les délégués au Comité de l'OCDE pour la politique scientifique et technologique (CSTP) et au Comité européen de la recherche et de l'innovation (ERAC).

Source : D'après CE/OCDE (à paraître en 2014), Base de données des politiques de STI (STIP), www.innovationpolicyplatform.org/sti-policy-database.

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433527>

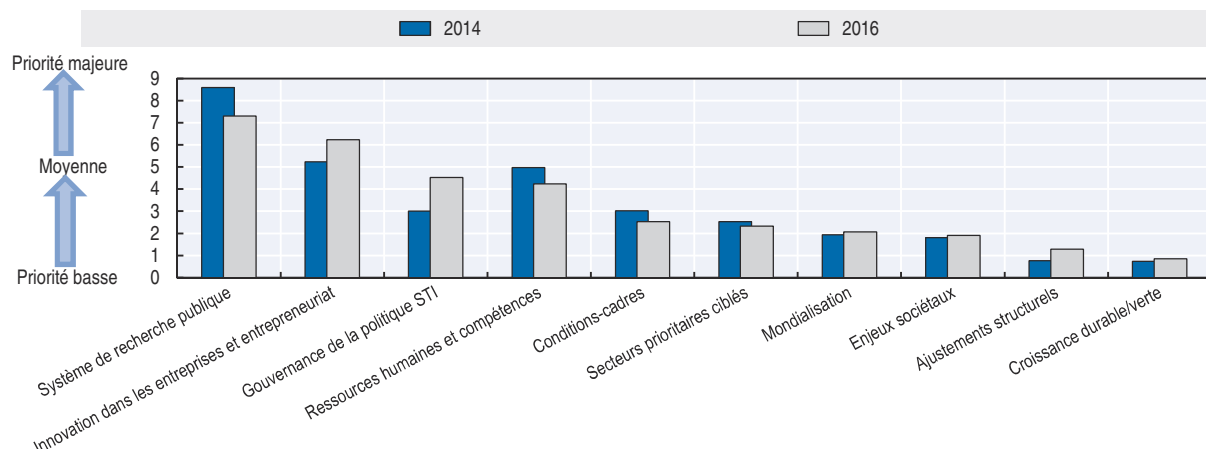
La confrontation des réponses reçues en 2014 avec celles de 2016 montre que les décideurs cherchent de plus en plus à améliorer la capacité d'innovation des entreprises et la gouvernance des politiques STI (graphique 4.2). Les réponses agrégées des pays pour lesquels des données étaient disponibles pour les deux années considérées révèlent un léger changement de priorités parmi les principaux domaines d'action : l'innovation des entreprises et l'entrepreneuriat, la gouvernance des politiques STI et, dans une moindre mesure, l'ajustement structurel gagnent en importance par rapport à d'autres axes thématiques.

D'une manière générale, l'action des pouvoirs publics dans le domaine STI a, ces dernières années, légèrement évolué dans ses priorités, ses modalités et son ciblage (graphique 4.3)¹. La panoplie de mesures, soit le nombre d'initiatives STI ayant cours, a changé dans tous les pays, bien que certains l'aient remaniée plus en profondeur que ne l'ont fait les autres. Il semble que cela soit le cas de l'Australie, de l'Espagne, de la Nouvelle-Zélande, des Pays-Bas ou de la Turquie, où de nouveaux programmes et priorités ont été mis en œuvre depuis 2014 et où l'on a parfois procédé à un abandon massif des initiatives antérieures (voir également les profils par pays).

Par ailleurs, les changements ont été plus substantiels dans certains domaines que dans d'autres (graphique 4.3). Parmi ces domaines où les gouvernements se sont montrés particulièrement actifs entre 2014 et 2016, citons : 1) le financement de l'innovation des entreprises et de l'entrepreneuriat, avec notamment un réaménagement de la panoplie de mesures existante et un renforcement de l'aide en faveur des PME et de leur internationalisation ; 2) la politique de la recherche publique, avec en particulier la rationalisation des dépenses publiques et des réformes visant à encourager la recherche

Graphique 4.2. Les priorités des politiques STI ont évolué vers des impératifs économiques plus immédiats et une plus grande efficacité

Indice de priorité des politiques dans les principaux domaines d'action, sur une moyenne des réponses des 42 pays ayant participé aux enquêtes STIP 2014 et 2016



Note : Les comparaisons entre 2014 et 2016 portent uniquement sur les pays ayant participé aux deux enquêtes. Cinquante-deux pays (parmi les 54 invités à participer) ont répondu à l'enquête 2016. Le graphique ne comprend donc pas les pays n'ayant pas fourni d'évaluation en 2014 (Brésil et Égypte) ou en 2016 (Danemark et Inde), ni les nouveaux pays participants en 2016 (Chypre, Croatie et Thaïlande). L'indice de priorité des politiques est une moyenne simple des évaluations des pays. Les valeurs concernant les pays qui n'ont pas mentionné un domaine comme prioritaire sont nulles (Kergroach, à paraître-b).

Source : D'après CE/OCDE (à paraître et 2014), Base de données des politiques de STI (STIP), www.innovationpolicyplatform.org/sti-policy-database. StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433537>

interdisciplinaire et la science ouverte (les questions touchant la science ouverte sont développées dans le chapitre 3) ; 3) les politiques relatives aux compétences, l'idée étant de pérenniser l'offre de talents et de bâtir une culture de l'innovation ; 4) l'amélioration de la gouvernance des politiques STI, l'accent étant mis sur l'évaluation et sur la formulation de politiques de RIR.

Les paragraphes qui suivent fourniront quelques informations de contexte sur l'affaiblissement des moteurs de la croissance et de l'innovation depuis le début des années 2010, avant de passer en revue les quatre principaux domaines des politiques STI dans lesquels les pouvoirs publics se sont le plus investis depuis 2014, comme indiqué ci-dessus, selon ce qu'il ressort de l'enquête STIP.

4.2. Affaiblissement des moteurs de croissance et d'innovation

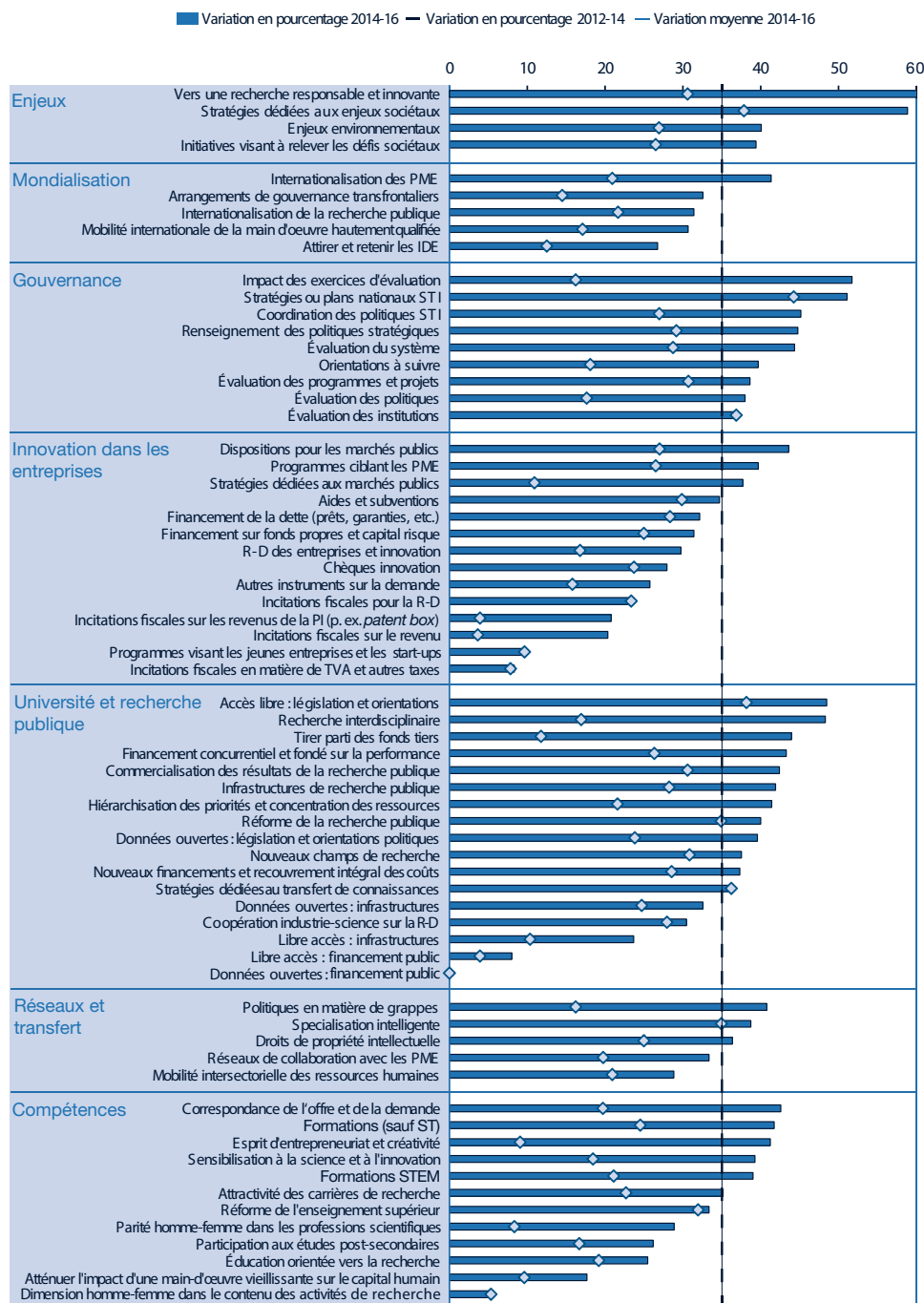
Les derniers chiffres de la croissance s'avèrent décevants

Huit ans après le début de la crise financière, la croissance économique demeure modérée dans la plus grande partie du monde. En 2016, la croissance du PIB mondial (+ 3.0 %) est restée relativement stable par rapport au taux de 2015, le plus faible des cinq dernières années (OCDE, 2016a)². Les taux de croissance du PIB sont très en-deçà des moyennes à long terme et des niveaux attendus en période de reprise. À cela s'ajoute que les prévisions ont été revues à la baisse à la lumière de données récentes, qui s'avèrent décevantes.

La montée de l'aversion au risque à l'échelle internationale a conduit à une contraction marquée des flux de capitaux et d'échanges mondiaux (FMI, 2016 ; OCDE, 2016a) (graphique 4.4). Et l'embellie du commerce mondial qui a suivi la crise a été de courte durée. À partir de 2011, la croissance des exportations de produits et de services a fortement ralenti. Le fléchissement de la croissance internationale et le ralentissement de la demande

Graphique 4.3. L'action des pouvoirs publics dans le domaine STI a légèrement évolué dans ses priorités, ses modalités et son ciblage au cours des dernières années

Changements dans la composition des politiques d'innovation par domaine, % d'initiatives politiques mises en œuvre, abandonnées ou remaniées en profondeur pendant la période 2014-16



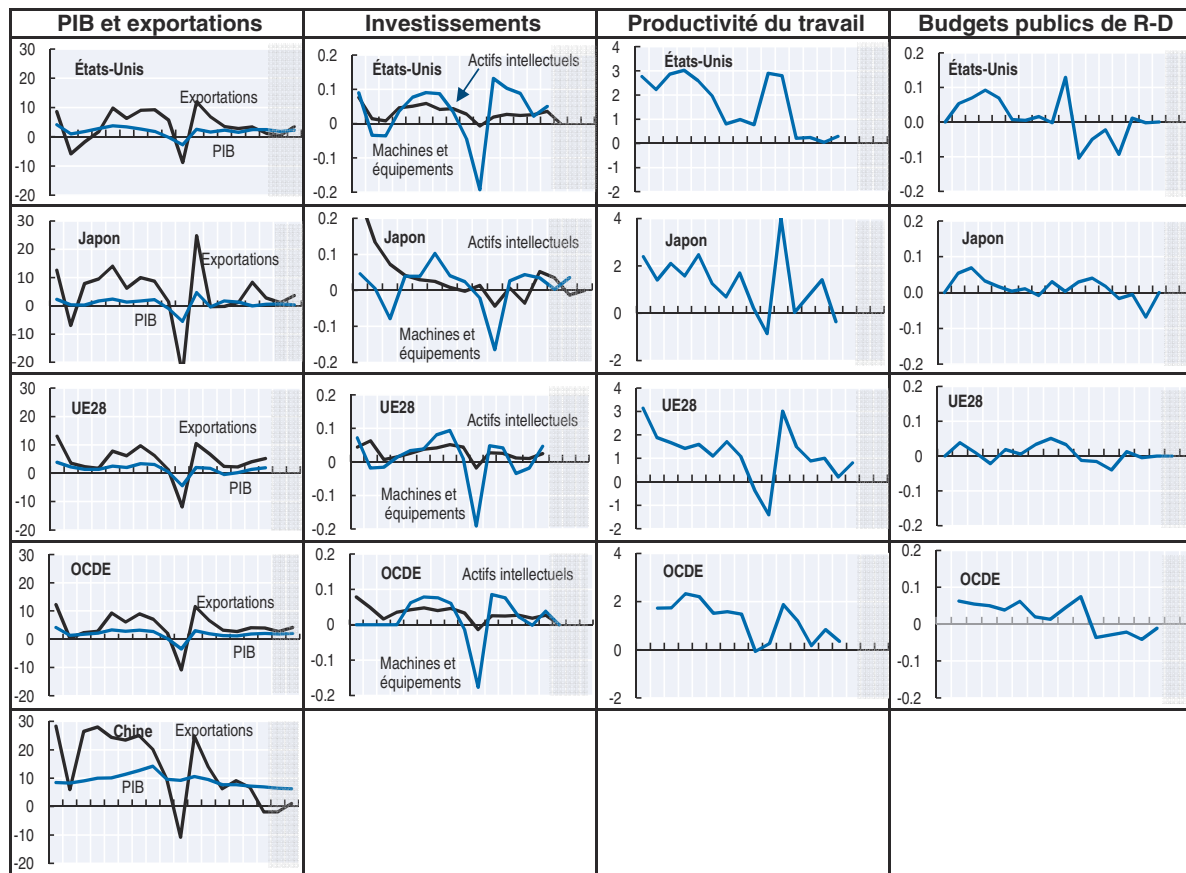
Note : Il s'agit d'un indicateur expérimental présentant le nombre d'initiatives stratégiques mises en œuvre, abandonnées ou remaniées en profondeur au cours de la période 2014-16 divisé par le nombre d'initiatives politiques en œuvre au début de la période (Kergroach et al., à paraître-b). Bien que les chiffres simples ne rendent pas compte de l'ampleur ni de l'impact des changements de politique, ce ratio reflète les priorités et l'activité des politiques STI dans des domaines et pour des périodes spécifiques.

Sources : D'après CE/OCDE (à paraître et 2014), Base de données des politiques de STI (STIP), www.innovationpolicyplatform.org/sti-policy-database; Kergroach et al. (à paraître-b), « Mapping the policy mix for innovation: the OECD STI Outlook and the EC/OECD International STIP Database », OECD Directorate for Science, Technology and Innovation Working Papers.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433549>

Graphique 4.4. **Aperçu des conditions économiques actuelles et de leur impact sur la capacité d'innovation, sélection de pays**

Taux de croissance annuels et projections (%), 2000-17



Notes : Les exportations comprennent les produits et services. Les investissements comprennent la formation brute de capital fixe dans les produits de la propriété intellectuelle (y compris les logiciels, les bases de données et la recherche et développement) ainsi que les machines, les équipements et les systèmes d'armes (y compris les investissements du secteur des technologies de l'information et des communications [TIC] dans le matériel informatique et l'équipement des télécommunications). La productivité du travail est mesurée en PIB par heure travaillée. Les budgets publics de R-D comportent les crédits et les dépenses budgétaires du gouvernement pour la R-D. Les taux de croissance sont calculés sur la base des valeurs à prix constants.

Source : OCDE (2016a), *Perspectives économiques de l'OCDE : statistiques et projections* (base de données), juin ; *Comptes nationaux des pays de l'OCDE* (base de données), juin ; OCDE (2016c), *Statistiques sur la productivité* (base de données), juin ; OCDE (2016d), *Statistiques de la recherche et développement (SRD)* (base de données), avril (données extraites les 20 et 21 juillet 2016).

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433556>

intérieure ont pesé sur la production chinoise, entraînant une baisse des exportations avec des répercussions sur les marchés émergents, tributaires des échanges de marchandises. La contraction des importations de la Chine et d'autres grandes économies émergentes a par ailleurs affaibli la demande d'exportations pour les économies avancées.

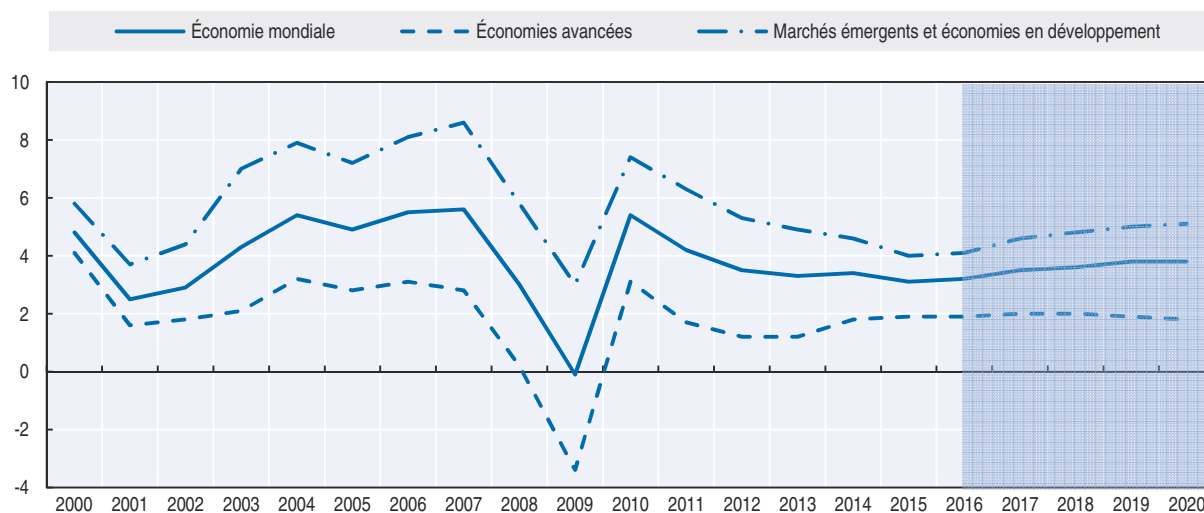
Ces différents facteurs ont tous contribué à l'atonie de la reprise dans les économies avancées. Aux États-Unis, la reprise, tirée par le secteur privé, reste dynamique, mais l'impulsion donnée par la demande intérieure et les créations d'emploi devrait marquer le pas, le pays tendant vers le plein emploi. Au Japon, la croissance économique et les perspectives globales restent fragiles du fait du ralentissement de l'activité des principaux partenaires commerciaux du pays, de la faiblesse de la consommation privée et de la poursuite du durcissement des politiques en vue de stabiliser le ratio de la dette au PIB.

Dans la zone euro, la croissance du PIB ne devrait remonter que lentement, l'investissement restant faible et le chômage élevé. La zone euro demeure en proie à un cycle de croissance atone et peine à susciter la confiance nécessaire pour attirer l'investissement susceptible d'impulser l'innovation, la productivité et l'emploi. Qui plus est, l'Union européenne est confrontée à des défis politiques majeurs (crise des réfugiés, menaces sécuritaires extérieures, impopularité des mesures d'austérité, activisme anti-européen, auxquels se surajoutent les conséquences de la sortie de l'Union décidée dernièrement par le Royaume-Uni). Ces défis mettent en péril sa cohésion et pourraient freiner davantage encore l'investissement (ESPAS, 2015). Sans compter que la reprise poussive en Europe pèse lourdement sur la croissance internationale et rend la zone vulnérable aux chocs mondiaux.


La croissance a ralenti dans les économies émergentes en situation de rattrapage, confirmant la tendance de ces dernières années (graphique 4.4). Le virage structurel vers les services opéré en Chine, conjugué à la surcapacité de l'industrie nationale, continuera d'influer sur les perspectives de croissance du pays (graphique 4.5). Le Brésil, en proie à l'incertitude politique et à une inflation croissante, devrait voir la récession s'accroître. L'économie russe semble avoir passé le creux de la vague, mais la reprise reste tributaire de la fluctuation des cours du pétrole. L'Inde affiche des perspectives de croissance plus solides, que les récentes inondations pourraient toutefois compromettre. L'assombrissement des perspectives de croissance a entraîné une chute du cours des actions et une plus grande volatilité des marchés, ce qui a eu pour effet d'accroître la vulnérabilité de certains marchés émergents face aux variations des taux de change, qui vient s'ajouter au poids d'une dette intérieure élevée.

Graphique 4.5. Diminution des écarts de croissance entre les économies avancées et les économies émergentes

Croissance du PIB, taux annuels et projections (%), 2000-20



Source : FMI (2016), *World Economic Outlook*, avril.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433560>

Les investissements dans les actifs incorporels semblent ralentir

Malgré des conditions de financement difficiles et des perspectives de marché défavorables, les acteurs économiques ont investi davantage dans les produits de propriété intellectuelle (logiciels et bases de données, et R-D, par exemple) que dans d'autres types

d'investissements physiques, y compris dans les TIC (graphique 4.4). Si les investissements dans les machines et les équipements ont fortement chuté, ceux consacrés aux actifs incorporels⁵ ont mieux résisté à la crise et ont rebondi plus rapidement (OCDE, 2014a). À titre d'exemple, les dépenses de R-D dans la zone OCDE avaient renoué dès 2012 avec leur niveau d'avant 2007.

Toutefois, les investissements dans le capital intellectuel semblent marquer le pas dans de nombreux pays, en particulier depuis 2012 (graphique 4.6). Les calculs récents de l'OCDE d'après les données du réseau INTAN-Invest font apparaître une baisse tendancielle continue des dépenses consacrées au capital organisationnel et à la formation propre aux entreprises au sein de l'Union européenne et aux États-Unis depuis 2007 (OCDE, 2015a).

Graphique 4.6. Investissement dans les actifs intellectuels

Formation brute de capital fixe, produits de la propriété intellectuelle, 2007 = 100 ; 2007-14

Diagramme 1. Divergences au sein de la zone OCDE
index 2007 = 100, 2007-14

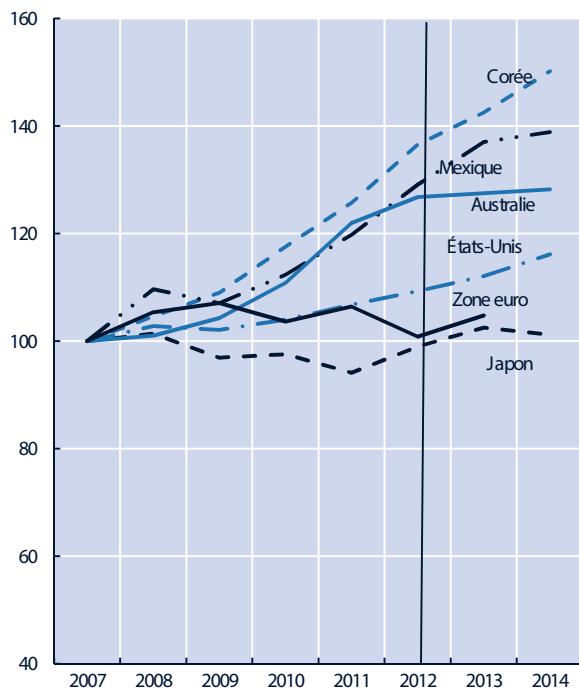
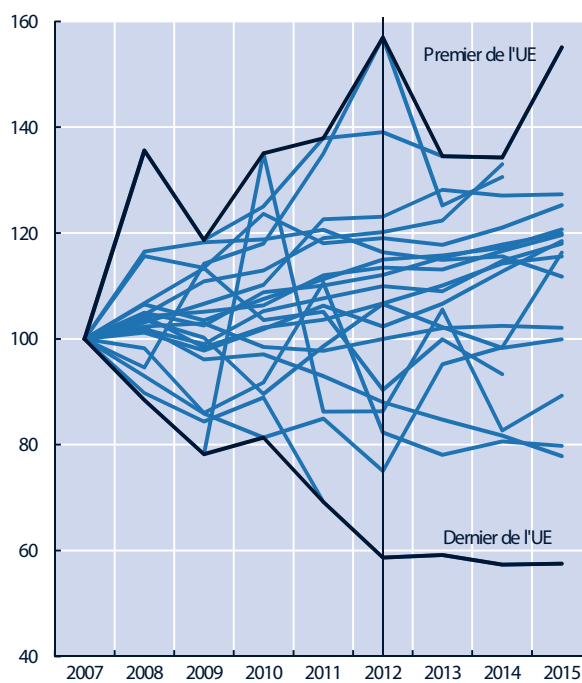



Diagramme 2. Divergences intra-européennes
index 2007 = 100, 2007-14



Source : OCDE (2016b), *Comptes nationaux des pays de l'OCDE* (base de données), données extraites du portail OECD.Stat le 20 juillet 2016.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433578>

On note toutefois des différences marquées d'une économie à l'autre. Plusieurs pays, dont la Corée, l'Estonie, les États-Unis et le Royaume-Uni, continuent d'accroître leurs investissements dans les portefeuilles d'actifs intellectuels, ce qui se traduit par une augmentation des disparités en termes de capacité d'innovation (graphique 4.6). Les précédentes éditions des *Perspectives STI* soulignaient que la reprise économique inégale allait sans doute accentuer le fossé entre, d'une part, les pays où la croissance était nulle ou molle (susceptibles d'avoir du mal à maintenir leur niveau de dépenses de R-D) et, d'autre part, ceux où elle s'avérait plus vigoureuse (et où les conditions étaient donc propices au développement de la R-D nationale) (OCDE, 2014a). Les mêmes données de comptes nationaux révèlent par ailleurs un fort dynamisme des investissements dans les actifs

incorporels pendant la crise, et ces dernières années encore, en Corée, en Israël et en Australie (graphique 4.6). Ces investissements sont également en net rebond aux États-Unis depuis 2010, mais n'ont en revanche progressé que lentement au Japon et dans la zone euro. On observe des différences notables dans les profils d'investissement au sein même de l'Europe, d'où un risque croissant de fragilisation, à terme, de sa cohésion économique.

L'innovation est le fruit d'un processus d'accumulation de connaissances, de capital et de technologie. Or si les conditions économiques restent défavorables, comme le laisse présager le ralentissement attendu de la croissance mondiale (voir chapitre 1), les pays pris dans un cycle de croissance lente pourraient avoir du mal à maintenir leur niveau d'investissement et leurs capacités d'innovation. À moyen terme, le fossé entre les champions mondiaux de l'innovation et les autres pourrait donc continuer de se creuser.

La croissance de la productivité est faible et les budgets publics sont sous pression

L'atonie de la dynamique des entreprises, alliée à un ralentissement généralisé de l'accumulation de capital intellectuel, a accentué le fléchissement de la croissance de la productivité (graphique 4.4) (OCDE, 2015b). Cette tendance avait commencé dans de nombreux pays de l'OCDE avant la crise financière, dans le sillage non seulement de l'évolution structurelle vers les services, mais aussi du ralentissement des investissements, amorcé dans les années 2000. La productivité est le moteur de la croissance économique à moyen et long termes et son tassement a été la cause première du manque de dynamisme dont celle-ci a fait montre au cours de la dernière décennie.

La conjoncture économique défavorable s'est en outre traduite par une baisse des recettes fiscales et des budgets publics, y compris dans le domaine de la science, de la technologie et de l'innovation. Le renforcement de l'aide publique en faveur des efforts nationaux de R-D a compensé partiellement la baisse de la R-D des entreprises pendant et après la crise (OCDE, 2014a). Néanmoins, compte tenu des perspectives budgétaires et de l'évolution des budgets publics de R-D en général, la reprise des activités de R-D ne pourra venir des investissements publics. De fait, les crédits budgétaires publics de R-D (CBPRD) des pays de l'OCDE ont été orientés à la baisse au cours de la période 2014-16 (graphique 4.2), plafonnant ou reculant dans la quasi-totalité de la zone OCDE et dans les grandes économies émergentes, et suivant les tendances de l'immédiat après-crise (OCDE 2014a, 2016e).

Un équilibre de croissance faible, caractérisé par la faiblesse de la demande, de l'investissement, de l'inflation, de la croissance des salaires et des gains de productivité, entrave la progression du niveau de vie, la redistribution du revenu et la consolidation des budgets publics. Pour sortir de cette situation, deux conditions seront nécessaires : la reprise de l'investissement du secteur privé et la croissance des salaires (OCDE, 2016f, à paraître), l'innovation jouant un rôle capital dans la relance de la dynamique des entreprises et la croissance de la productivité.

4.3. Sortir du cycle de croissance lente et relancer le dynamisme de l'économie

Restaurer les conditions propices à la compétitivité

Les stratégies nationales d'innovation font de plus en plus souvent partie intégrante de l'action des pays en faveur de la compétitivité, et le développement des capacités de transformation des entreprises constitue un axe fondamental des plans STI nationaux. Diverses initiatives d'envergure ont été engagées dernièrement par certains acteurs de premier plan dans le domaine de l'innovation, de même qu'au niveau de l'Union

européenne (voir également le profil « Stratégies ou plans nationaux en matière de science, technologie et innovation »).

- L'Australie a adopté son Industry Innovation and Competitiveness Agenda (IICA) en 2014 et créé un groupe de travail ministériel chargé de promouvoir l'innovation et la R-D en tant que vecteurs de productivité. Dans le cadre de ce nouveau programme, le gouvernement mise principalement sur la politique industrielle et l'ouverture de débouchés commerciaux à la recherche financée sur fonds publics pour renforcer le dynamisme de l'économie nationale. Le programme National Innovation and Science Agenda (NISA), lancé en 2015, s'appuie quant à lui sur l'IICA pour stimuler la science et l'innovation dans quatre domaines clés : capital et culture, collaboration, talents et compétences, et le gouvernement comme modèle d'innovation.
- L'Allemagne a revu en 2014 sa stratégie en faveur des technologies de pointe pour mieux y prendre en compte le point de vue du marché à l'égard de certaines technologies et souligner la nécessité de répondre aux enjeux de société. La stratégie ainsi révisée fait une place de choix aux PME innovantes.
- Au Japon, le cinquième Plan-cadre pour la science et la technologie (2016-20) fixe le cap qui sera suivi par les politiques STI nationales à moyen et long termes et se veut notamment une réponse aux défis que doivent relever les pouvoirs publics pour renforcer la compétitivité du secteur manufacturier.
- La Corée a dévoilé en 2015 la feuille de route pour la mise en œuvre de son troisième plan en faveur de la science et de la technologie. Quelque 21 milliards USD (équivalant à 19 000 milliards KRW) ont été affectés aux investissements nationaux de R-D, pour servir, entre autres, au développement de technologies stratégiques et à l'émergence de nouvelles industries.
- Le nouveau plan en faveur de la productivité (Productivity Plan) adopté par le Royaume-Uni vise à créer les conditions et l'infrastructure qui faciliteront l'innovation dans les domaines de la recherche et des rapports entre entreprises. À cet effet, le plan-concurrence (Competition Plan) contient un certain nombre de mesures destinées à améliorer l'environnement des entreprises et amplifier la concurrence.
- Les États-Unis ont actualisé leur Strategy for American Innovation en 2015 afin de canaliser les investissements vers les composantes essentielles du système d'innovation national et de promouvoir les marchés concurrentiels et l'entrepreneuriat productif.
- Une communication de 2014 diffusée au niveau de l'Union européenne permet d'apprécier comment l'économie de l'innovation stimule la compétitivité en même temps qu'elle fournit des éléments concrets pour savoir où investir en priorité et mettre la recherche et l'innovation au service de la croissance.

Le potentiel de la recherche et de l'innovation en termes de résultats économiques et de productivité a aussi été souligné de façon plus appuyée dans les grandes économies émergentes. Avec son treizième Plan quinquennal (2016-20), la Chine entend ainsi gagner en compétitivité et en influence dans les champs de la science et de la technologie et réaliser, dans des domaines fondamentaux en rapport avec cette dernière, des percées propres à faciliter la restructuration de son économie et la modernisation de son industrie. La nouvelle stratégie STI du Brésil pour 2016-19 (ENCTI), censée permettre au pays de combler son retard technologique, cible un petit nombre d'industries prometteuses (énergies renouvelables, exploitation pétrolière en mer, astronautique, TIC, etc.). La Fédération de Russie, pour sa part, a dévoilé en 2015 son Initiative nationale pour la technologie, une stratégie originale axée sur

le long terme, destinée à lui donner l'avantage en la matière, grâce à l'ouverture de marchés fondés sur des technologies nouvelles (drones dans l'industrie et les activités de services, produits des neurotechnologies, solutions réseau permettant de personnaliser la livraison de denrées alimentaires). Le Programme spécial STI du Mexique (PECiTI) pour 2014-18, le Plan national de diversification de la production du Pérou (PNDP), lancé en 2014, le Plan STI à dix ans de la Thaïlande ou encore le dixième Plan quinquennal de développement de la Turquie (2014-18) sont autant d'autres initiatives visant à renforcer la compétitivité nationale grâce à la R-D et à l'innovation.

Doper le potentiel d'innovation des entreprises

Les conditions de financement de l'innovation demeurent précaires, en particulier dans le cas des PME. Le financement de l'entrepreneuriat a beaucoup souffert de la crise (OCDE, 2012 ; 2014a ; 2015c). Les petites entreprises peinent encore à renouer avec les bénéfiques, qui constituent leur principale source de financement (graphique 4.11, diagramme 1). Les sources externes, comme les banques, les investisseurs en capital-risque et les investisseurs providentiels, sont devenues plus accessibles, lentement cependant et avec des disparités entre les pays.

La situation des grandes entreprises est différente. D'abord parce que ces entreprises sont moins dépendantes des crédits bancaires pour investir, à commencer par les entreprises multinationales. Elles ont donc moins pâti que les autres des politiques restrictives mises en place par les banques dans le passé. Ensuite parce qu'elles ont rapidement retrouvé leur rentabilité après la crise et que certaines d'entre elles disposent de réserves de trésorerie considérables qui ne sont pas employées pour investir. L'incertitude qui pèse sur la demande et l'aversion au risque qui prévaut du côté de l'offre alimentent les piètres perspectives des entreprises, contribuent à maintenir l'investissement à un niveau relativement faible et limitent la possibilité d'une reprise des activités d'innovation.

Si la majeure partie de la R-D réalisée par les entreprises reste financée par l'industrie (en moyenne à hauteur de 86.5 % dans les pays de l'OCDE en 2013 ; OCDE, 2016f), l'aide financière publique a augmenté sensiblement au cours des dix dernières années, aussi bien en termes absolus qu'en termes relatifs (graphique 4.7) (OCDE, 2014a ; 2015a). Au Canada, au Chili, en France et en Hongrie, plus du quart du financement de la R-D des entreprises provient d'une combinaison d'aides directes et indirectes, le record étant de 62 % en Fédération de Russie (graphique 4.7, diagramme 1). La part de la dépense intérieure de recherche et développement (DIRDE) financée sur fonds publics s'est nettement accrue en Belgique, en Irlande, en Islande, en France et au Canada sur la période considérée. L'intensité de l'aide publique exprimée en pourcentage du PIB a elle aussi progressé dans la quasi-totalité des pays depuis 2006, et de façon particulièrement marquée en Slovénie, en Belgique, en France et en Irlande (graphique 4.7, diagramme 2) (voir également le profil « Financement public de la R-D et de l'innovation d'entreprise »).

Les budgets publics de R-D vont, dans une mesure croissante, au secteur des entreprises au détriment de la recherche publique, signe d'une modification des objectifs stratégiques (accroître la capacité d'innovation des entreprises), des instruments et des cibles (les entreprises) des politiques publiques³. Ce tournant s'est matérialisé par des dispositifs fiscaux en faveur de la R-D de plus en plus généreux (graphique 4.8). Entre 2006 et 2013, le montant des recettes fiscales ainsi abandonnées a augmenté dans la plupart des pays pour lesquels on dispose de données. Par ailleurs, dans ces pays, la part de fonds publics allant à la R-D des entreprises a progressé plus rapidement que celle destinée à la recherche publique.

Graphique 4.7. Le soutien public à la R-D des entreprises a significativement augmenté au cours des dernières années

Diagramme 1. Combinaison des soutiens financiers directs et indirects, en pourcentage de DIRDE, 2006 et 2014

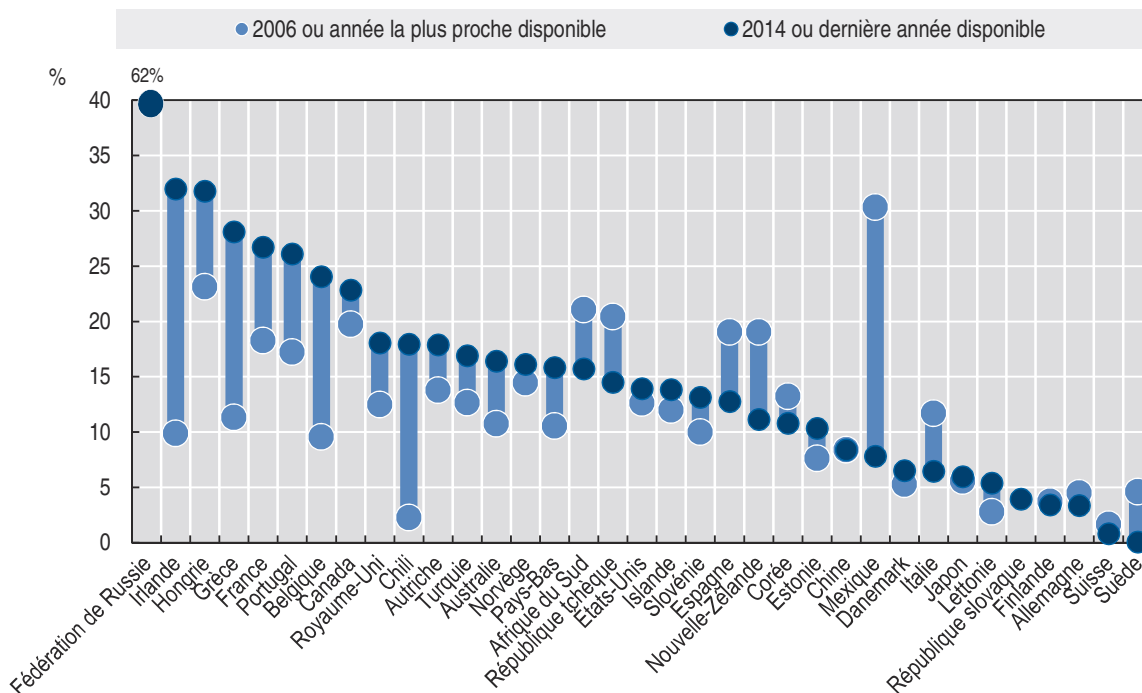
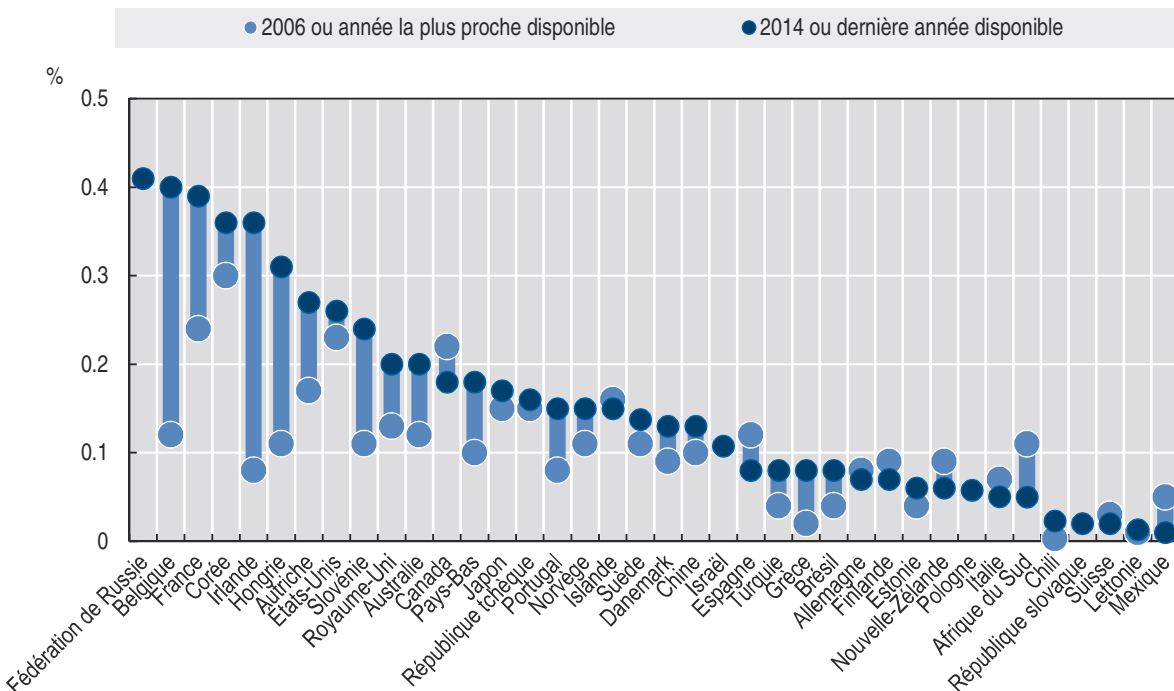


Diagramme 2. Combinaison des soutiens financiers directs et indirects, en pourcentage de PIB, 2006 et 2014

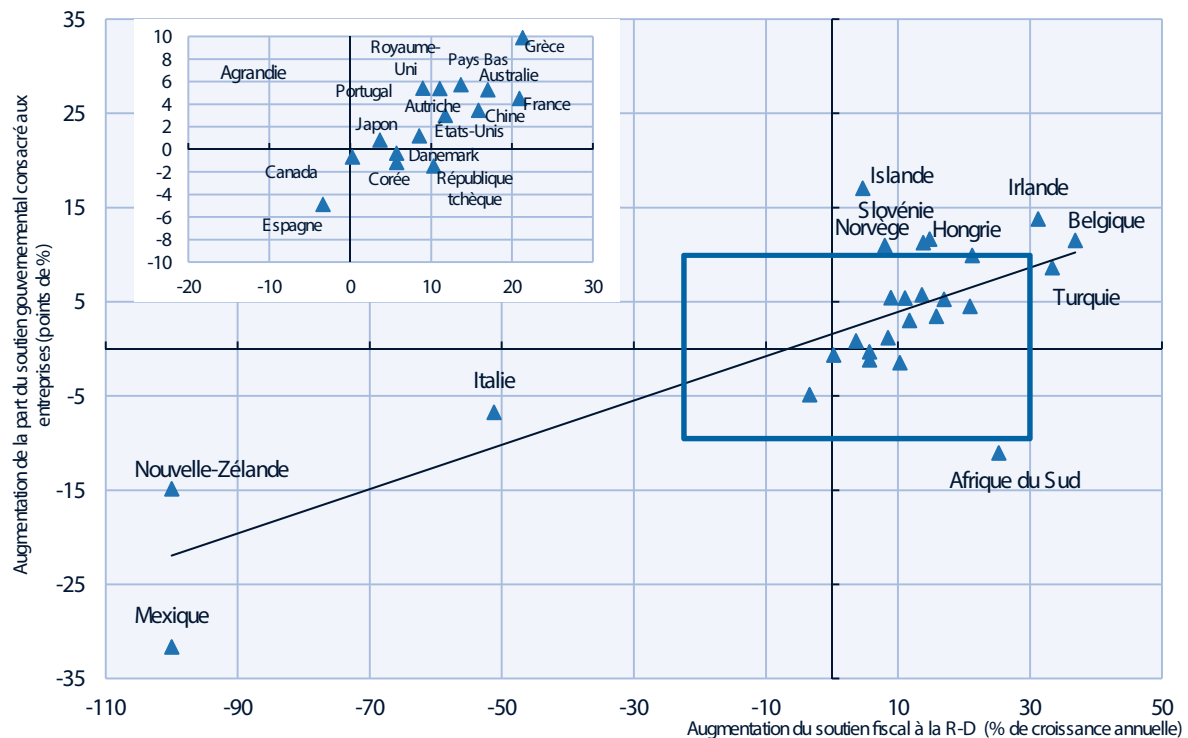


Sources : OCDE (2016d), *Statistiques de la recherche et développement (SRD)* (base de données), avril, www.oecd.org/fr/innovation/inno/srd.htm ; OCDE (2016g), Base de données OCDE/GENIST sur les incitations fiscales à la R-D, juillet, www.oecd.org/fr/sti/rd-tax-stats.htm. Données extraites du portail IPP.Stat le 8 août 2016.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433581>

Graphique 4.8. Un soutien public aux entreprises plus important par le biais d'incitations fiscales en faveur de la R-D plus généreuses

Variations en % de la part relative du soutien gouvernemental accordé aux entreprises (axe des y) et estimations de la croissance annuelle du soutien fiscal à la R-D (axe des x), 2006-14 ou années les plus proches disponibles



Note : Les pays pour lesquels deux points de données ne sont pas disponibles pour une comparaison dans le temps ne sont pas présentés dans le graphique.

Sources : OCDE (2016f), *Statistiques de la recherche et développement (SRD)* (base de données), janvier 2015, www.oecd.org/fr/innovation/inno/srd.htm ; CE/OCDE (à paraître), *Base de données des politiques de STI (STIP)* édition 2016, www.innovationpolicyplatform.org/sti-policy-database ; OCDE (2016g), *Base de données OCDE/GENIST* sur les incitations fiscales à la R-D, juillet, www.oecd.org/fr/sti/rd-tax-stats.htm. Données extraites du portail IPP.Stat le 11 septembre 2016.

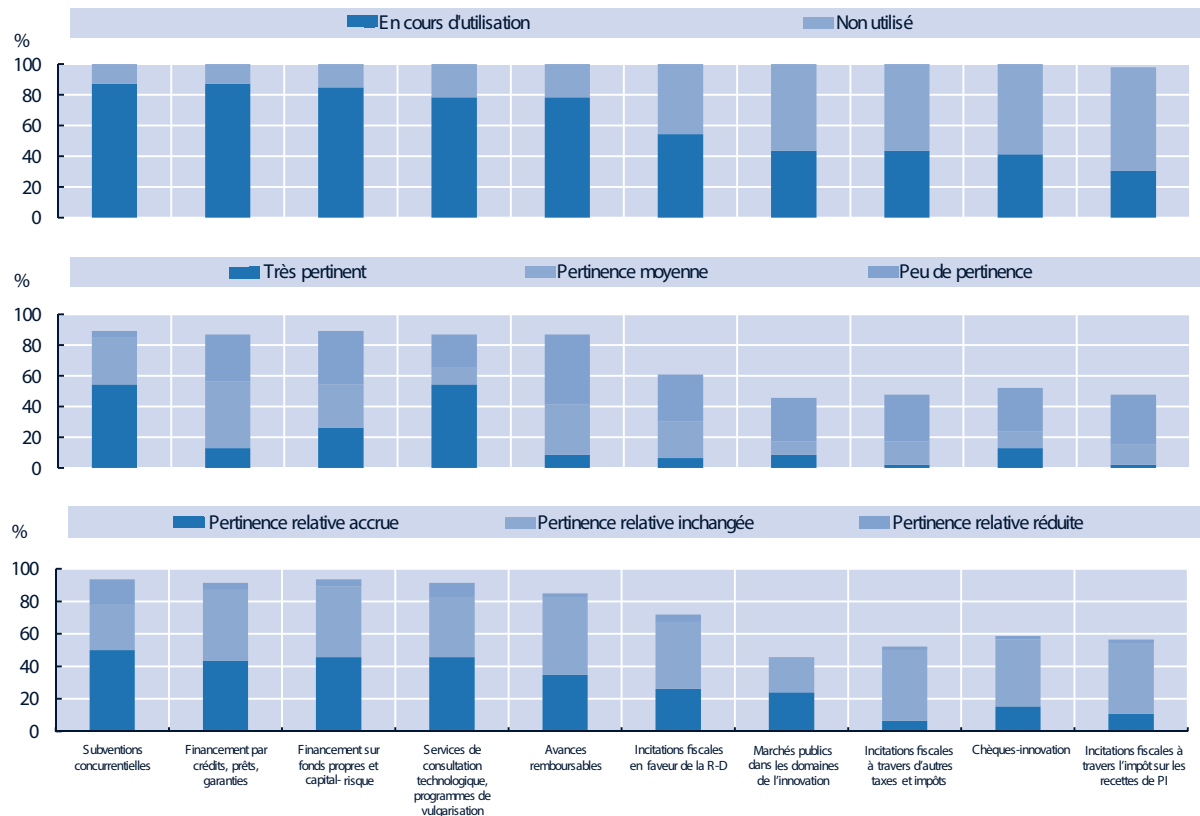
StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433595>

Toutefois, le financement direct par le biais de subventions, de prêts et de marchés publics, demeure dans bien des cas le principal type de soutien public à la R-D des entreprises. De fait, subventions, financement sur fonds propres et financement par l'emprunt (prêts, garanties et mécanismes de partage de risque, par exemple) sont les moyens d'action les plus couramment utilisés dans les 52 pays ayant répondu à l'enquête STIP 2016 (graphique 4.9). Ils occupent également, au même titre que les incitations fiscales et les services-conseils en technologie, une place croissante dans la panoplie de mesures adoptée dans nombre de pays. Il n'en reste pas moins que l'attention des pouvoirs publics demeure centrée sur le recours aux subventions accordées sur appel d'offres et aux incitations fiscales en faveur de la R-D, considérées comme les moyens d'action présentant le plus d'intérêt dans la panoplie de mesures de la plupart des pays.

Les combinaisons de mécanismes de financement de la science, de la technologie et de l'innovation et leur importance relative varient cependant sensiblement d'un pays à l'autre, et si les politiques STI en vigueur de par le monde laissent apparaître des points de convergence (voir le chapitre 1, « Mégatendances influant sur la STI »), il existe également des archétypes nationaux bien établis en ce qui concerne les politiques d'innovation des entreprises. Ainsi la Belgique, le Canada, la France et les Pays-Bas ont-ils adopté une

Graphique 4.9. Principaux instruments de financement dans le dosage des politiques en faveur de l'innovation des entreprises, 2016

En pourcentage du total des réponses auto-déclarées des pays, 51 pays participants à l'enquête STIP 2016



Note : Seuls sont comptabilisés les comptages simples des réponses des pays à la question : « Veuillez décrire le dosage des politiques de votre pays. Parmi les instruments publics de financement des activités de R-D et de l'innovation suivants, quels sont ceux en cours d'utilisation dans votre pays ? Quels sont les principaux instruments de financement public de l'innovation des entreprises dans votre pays ? L'équilibre relatif entre ces instruments a-t-il évolué récemment ? Merci de noter la pertinence relative des instruments financiers suivants dans le dosage des politiques de votre pays et d'indiquer si leur part dans le total a augmenté/diminué ou est restée inchangée. » Les réponses sont fournies par les délégués au Comité de l'OCDE pour la politique scientifique et technologique (CSTP) et au Comité européen de la recherche (ERAC).

Source : D'après CE/OCDE (à paraître), *Base de données des politiques de STI (STIP)* édition 2016, www.innovationpolicyplatform.org/sti-policy-database.

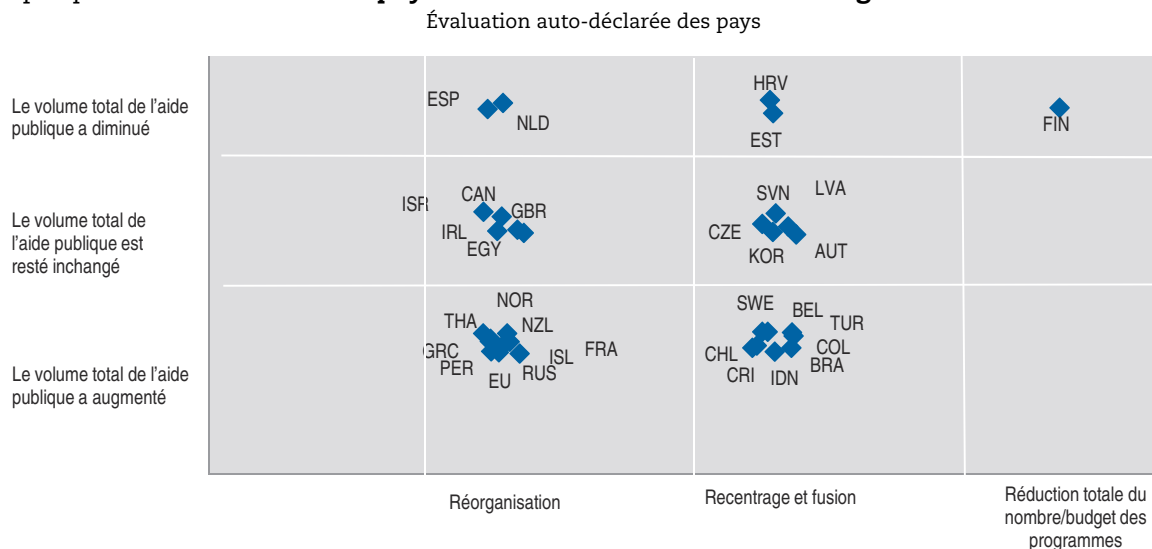
StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433609>

approche privilégiant le soutien indirect sous la forme d'incitations fiscales à la R-D, tandis que l'Allemagne, l'Estonie, la Finlande, le Mexique, la Suède et la Suisse se limitent exclusivement à une aide directe. La Chine fait figure d'exception, une part importante du financement s'y effectuant sur fonds propres (voir également le profil « Financement public de la R-D et de l'innovation d'entreprise »).

Le financement direct évolue depuis peu vers des approches davantage axées sur le marché, favorisant la sélection fondée sur la mise en concurrence et rationalisant les systèmes d'aide publique (OCDE, 2012 ; 2014a). La rationalisation de l'action publique en faveur de la science et de l'innovation est devenue un enjeu clé pour de nombreux pays de l'OCDE et économies partenaires, du fait de la complexité croissante de la politique d'innovation et de l'austérité budgétaire qui pèse actuellement sur les comptes publics nationaux. Elle contribue par ailleurs à rendre les aides publiques plus accessibles et favorise leur large distribution. En 2014-16, le mouvement de simplification engagé s'est poursuivi et

de nombreux pays, dont certains avaient déjà rationalisé leurs moyens d'intervention, ont consolidé et fusionné les dispositifs d'aide en place. Peu nombreux cependant sont les pays où le volume des aides publiques allouées s'en est ressenti (graphique 4.10). Pour certains, parmi lesquels la Belgique, la Suède et la Turquie ainsi que diverses économies émergentes (le Brésil, la Colombie, le Costa Rica et l'Indonésie), les réaménagements opérés se sont traduits bien au contraire par une nouvelle augmentation de ces aides. La Finlande apparaît comme un cas à part, puisqu'elle est le seul pays à faire état de coupes et dans le nombre total des dispositifs en place et dans le montant global des aides publiques accordées.

Graphique 4.10. **De nombreux pays ont consolidé et fusionné les régimes de soutien existants**



Note : Les positions des pays sur le graphique sont définies par l'auto-évaluation des questions suivantes : « Les régimes de soutien à l'innovation des entreprises ont-ils été rationalisés ?, consolidés ? ou supprimés au cours des deux dernières années ? » et « Du point de vue fiscal, le volume total du soutien financier public à l'innovation des entreprises est-il resté inchangé ? Ou la politique de rationalisation/consolidation a-t-elle conduit à des augmentations/diminutions du soutien financier public ? ». Seuls les pays ayant répondu à ces deux questions sont présentés dans le graphique.

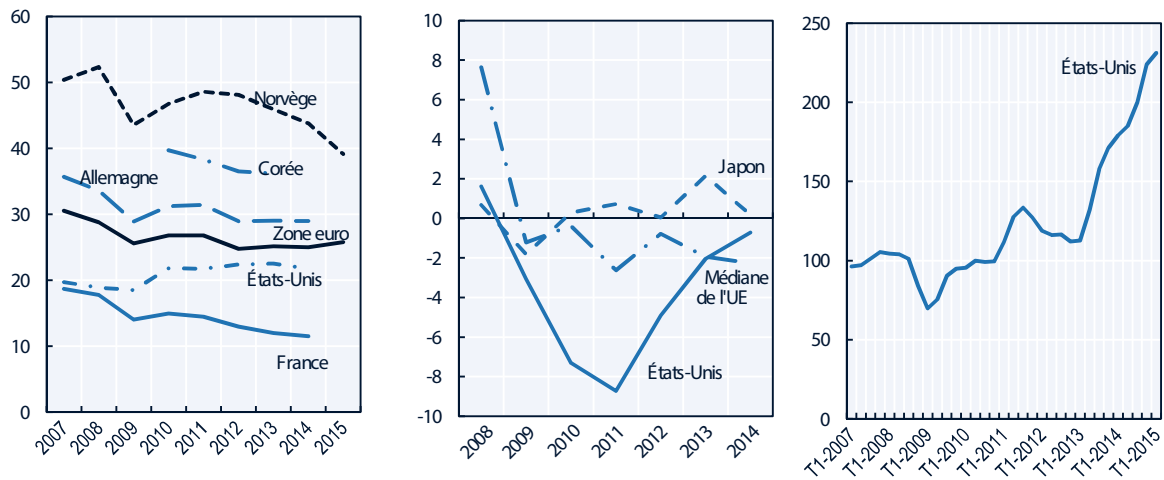
Source : D'après CE/OCDE (à paraître), *Base de données des politiques de STI (STIP)* édition 2016, www.innovationpolicyplatform.org/sti-policy-database.

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433618>

Au lendemain de la crise, les pays ont mis l'accent sur le financement par l'emprunt et par fonds propres dans leur panoplie de mesures à l'appui de l'innovation et de l'entrepreneuriat, afin de compenser la rareté des financements privés (OCDE, 2014a).

Les conditions de crédit ont commencé à se desserrer progressivement depuis que les banques ont atteint le niveau de désendettement requis, et la disponibilité perçue des prêts bancaires s'est globalement améliorée (BCE, 2016 ; OCDE, 2016h). Néanmoins, dans de nombreux pays, l'offre de financement par l'emprunt à l'intention des PME reste insuffisante et le stock de crédits bancaires en cours continue de décroître, en particulier au Canada, aux États-Unis et dans plusieurs pays européens (graphique 4.11, diagramme 2). Les gouvernements ont eu abondamment recours aux mécanismes de garantie de prêt et de partage de risque pour faciliter l'accès des PME au financement (OCDE, 2014a ; 2016h). D'autres mesures ont été prises en ce sens plus récemment, entre 2014 et 2016, en Autriche, en Lettonie, en Pologne et au Royaume-Uni.


La crise financière a creusé les écarts d'investissement, en particulier lors des phases de démarrage et de développement initial, lorsque les entreprises ne disposent pas de

Graphique 4.11. **Un retour lent des conditions de financement de l'innovation et de l'esprit d'entreprise**

Note : Le taux de marge bénéficiaire est l'excédent net d'exploitation en tant que pourcentage de la valeur ajoutée nette des sociétés non financières.
Source : OCDE (à paraître), *Panorama des comptes nationaux 2016*.

Note : La médiane de l'Union européenne est calculée en utilisant les pays pour lesquels des données sont disponibles.
Source : OCDE (2016), *Le financement des PME et des entrepreneurs 2016*.

Source : OCDE (2015), *Panorama de l'entrepreneuriat 2015*.

StatLink  <http://dx.doi.org/10.1787/888933433623>

garanties suffisantes pour accéder aux crédits bancaires. Les prises de participation ont fortement chuté durant la récession, et la reprise est restée timide depuis (OCDE, 2012 ; 2014a). En 2014, les investissements en capital-risque n'avaient retrouvé leurs niveaux d'avant-crise que dans quelques pays : Afrique du Sud, Corée, États-Unis, Fédération de Russie et Hongrie (OCDE, 2015c). Le marché américain du capital-investissement affiche un dynamisme frappant, avec un doublement des investissements en 2014-15. La situation au sein de l'Union européenne est plus morose, en particulier aux stades précoces de développement des affaires (graphique 4.11, diagramme 3). Les activités des investisseurs providentiels ont en revanche eu tendance à croître entre 2007 et 2015 (OCDE, 2016h ; EBAN, 2016). Ces investisseurs jouent un rôle essentiel au sein de l'écosystème des start-ups (OCDE, 2011). Ils représentent généralement la première source de fonds propres après le cercle initial de financement constitué par les fondateurs, les amis et la famille. Au-delà du financement, ils offrent des services déterminants pour la réussite des entreprises : mentorat, conseils stratégiques et accès aux réseaux. Leurs activités semblent plus résilientes face aux cycles conjoncturels que celles ayant trait aux investissements en capital-risque et aux crédits bancaires. Le nombre de groupes et de réseaux d'investisseurs providentiels a augmenté régulièrement aux États-Unis et dans l'Union européenne au cours des dix dernières années. Aux États-Unis, leurs investissements étaient estimés à 24,1 milliards USD en 2014. Cette forme d'investissement gagne également du terrain dans de nombreuses économies émergentes.

Les gouvernements ont eu soin de consolider les marchés nationaux de fonds propres, notamment pour le capital de départ, via la création de nouveaux fonds de fonds et fonds de capital-risque, ou le refinancement des existants (Belgique, France, Italie et République tchèque). De nouveaux dispositifs d'aide en faveur des investisseurs providentiels et mécanismes de co-investissement ont vu le jour (Australie, Espagne, France, Islande,

Pologne, ainsi qu'au niveau de l'Union européenne). Certains pays (Grèce, Pays-Bas) ont déployé les deux types d'instruments afin de couvrir tout le spectre des besoins de financement de l'innovation. Le Portugal a lancé un dispositif de financement mezzanine qui allie des éléments de financement par l'emprunt et par fonds propres (voir également le profil « Financement public de la R-D et de l'innovation d'entreprise »).

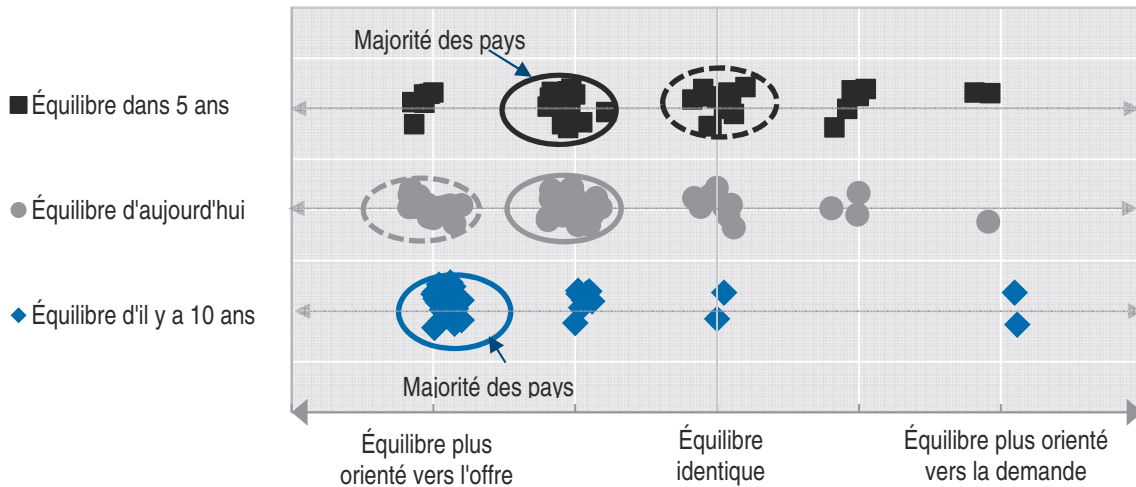
Les gouvernements se sont beaucoup intéressés dernièrement au potentiel de croissance économique que l'innovation des entreprises et l'entrepreneuriat ont à offrir (graphique 4.1) ; par conséquent, l'aide publique dans ces domaines a légèrement évolué quant à ses priorités, ses modalités et son ciblage (graphique 4.3). Contraints par leur situation budgétaire actuelle, de nombreux gouvernements se sont tournés vers des moyens d'action « zéro dépense ». À ce titre, ils ont favorisé les outils n'impliquant pas de dépenses publiques supplémentaires à court terme, tels les marchés publics et les incitations fiscales à la R-D et à l'innovation⁴ (voir également les profils « Financement public de la R-D et de l'innovation d'entreprise » et « Incitations fiscales en faveur de l'innovation »).

Les gouvernements ont été de plus en plus nombreux à élargir leur approche des politiques d'innovation en stimulant la demande d'innovation, notamment dans des domaines où il existe des besoins sociétaux urgents et où l'action des pouvoirs publics peut compléter les mécanismes du marché avec des mises de fonds minimales (voir le profil « Stimuler la demande en faveur de l'innovation »). Les marchés publics, qui représentent en moyenne 12 % du PIB dans la zone OCDE, retiennent depuis quelques années une attention soutenue de la part des ministères (OCDE, 2015d). Dans le domaine des politiques STI, il apparaît clairement que les instruments axés sur l'offre, privilégiés de longue date, ont été sensiblement délaissés au cours de la décennie écoulée (graphique 4.12). Nombreux sont les pays à avoir indiqué, en 2014, que les cinq prochaines années verraient les instruments agissant sur la demande davantage mis en avant, même si la plupart prévoient que les premiers garderont la préférence (OCDE, 2014a). Depuis lors, les gouvernements ont multiplié les initiatives visant à stimuler l'innovation des entreprises grâce aux marchés publics, faisant ainsi de ce domaine d'action des politiques STI l'un de ceux où ils ont été le plus actifs au cours de la période considérée (graphique 4.13).

De nombreux pays ont revu leurs dispositifs de gouvernance en matière de recours aux marchés publics pour stimuler l'innovation. La passation de marchés publics s'est imposée comme un volet essentiel de l'action en faveur de l'innovation (Australie, Canada, Corée, Croatie, Lettonie et Nouvelle-Zélande), des plans pour l'entrepreneuriat (Estonie), des stratégies de spécialisation intelligente (Grèce, Hongrie), des plans industriels (Turquie) et des politiques d'innovation dans le secteur public (Israël). La Suède élabore actuellement une stratégie en matière de marchés publics et a mis en place une agence nationale dédiée. Les Pays-Bas ont quant à eux lancé un nouveau plan d'action et se sont engagés à passer des marchés publics pleinement durables. Les initiatives en faveur des marchés publics destinées à améliorer le dialogue entre acheteurs et fournisseurs (Irlande), diffuser les meilleures pratiques (France, Pays-Bas) et concevoir et gérer des adjudications publiques propices à l'innovation (France) se sont multipliées. Certains pays proposent en outre des aides financières ciblées ; c'est ainsi que la Corée prévoit une remise de 20 % sur les frais d'approvisionnement pour les achats de produits de haute qualité. À cela s'ajoute que des pays ont modifié leurs procédures et cadres juridiques afin de simplifier l'accès aux marchés publics (Italie, Lettonie et Turquie), en particulier pour les petites entreprises et les start-ups (Japon, Corée). On peut s'attendre à de nouvelles réformes des pratiques en matière de marchés publics, sachant que les pays sont plus nombreux en 2016 qu'en 2014

Graphique 4.12. Vers un renforcement des approches basées sur la demande dans le dosage des politiques

Changements dans l'équilibre du dosage des politiques pour l'innovation des entreprises, auto-évaluation des pays



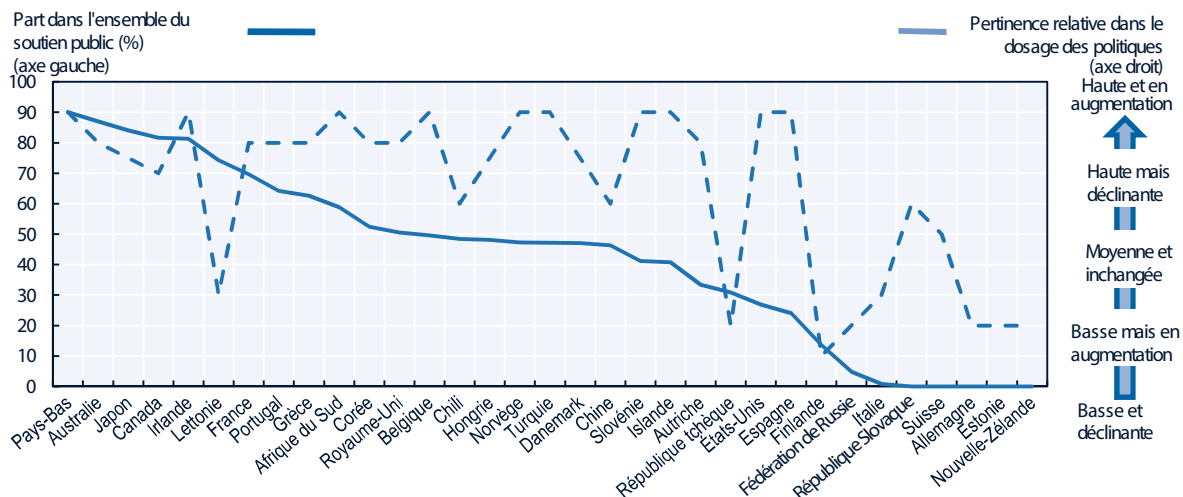
Note : L'équilibre du dosage des politiques pour l'innovation des entreprises est défini à partir des réponses en auto-évaluation des pays à la question : « Quel est le type d'équilibre des différents instruments de politique pour la R-D et l'innovation dans le dosage des politiques ? Comment cet équilibre a-t-il évolué au fil du temps et quels changements sont envisagés pour les années à venir ? Veuillez évaluer l'équilibre entre les types d'instruments de politique suivants en fonction de leur importance relative/signification dans le dosage des politiques d'innovation. » Les réponses sont fournies par les délégués au Comité de l'OCDE de la politique scientifique et technologique (CSTP) et au Comité européen de la recherche et de l'innovation (ERAC).

Source : D'après CE/OCDE (à paraître), Base de données des politiques de STI (STIP) édition 2016, www.innovationpolicyplatform.org/sti-policy-database.

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433631>

Graphique 4.13. L'utilisation et la pertinence politique des incitations fiscales à la R-D restent extrêmement disparates selon les pays

Soutien fiscal en pourcentage du soutien public direct et indirect aux entreprises en 2014 (axe gauche) et pertinence relative des incitations fiscales en 2016 (axe droit)



Note : L'indice de pertinence reflète l'importance relative des incitations fiscales à la R-D dans le dosage des politiques ainsi que les changements récents dans l'équilibre relatif entre les instruments. Les estimations sont fournies par les auto-évaluations des pays.

Sources : D'après CE/OCDE (à paraître et 2014), Base de données des politiques de STI (STIP) édition 2016, www.innovationpolicyplatform.org/sti-policy-database ; OCDE (2016f), Statistiques de la recherche et développement (SRD) (base de données, avril, www.oecd.org/fr/innovation/inno/srd.htm) ; OCDE (2016g), Base de données OCDE/GENIST sur les incitations fiscales à la R-D, juillet, www.oecd.org/fr/sti/rd-tax-stats.htm. Les données ont été extraites du portail IPP.Stat le 8 septembre 2016.

StatLink <http://dx.doi.org/10.1787/888933433645>

à annoncer un recours accru, dans l'avenir, aux instruments agissant sur la demande (Allemagne, Autriche, Chili, Corée, Costa Rica, Lituanie, Portugal et Thaïlande).

Bien que moins couramment utilisées dans l'ensemble que les subventions et autres instruments de financement direct, les incitations fiscales en faveur de la R-D tendent de plus en plus souvent à compléter les subventions directes, les restrictions internationales (imposées notamment par l'Union Européenne ou l'OMC) limitant le volume des aides publiques directes. Depuis le début des années 2000, les allègements fiscaux au titre de la R-D ont été simplifiés (avec, par exemple, l'abandon des systèmes progressifs) ; ils sont désormais plus généreux (hausse du taux d'allègement fiscal) et accessibles à un plus grand nombre de bénéficiaires (relèvement ou suppression du plafond de dépenses admissibles). Le changement de cap des politiques a été particulièrement marqué dans certains pays, où l'aide indirecte a été jusqu'à remplacer l'aide directe (en France, par exemple). La popularité grandissante des incitations fiscales a par ailleurs considérablement facilité les travaux d'envergure mondiale visant à apprécier leur incidence et leur impact (pour une vue d'ensemble de ces travaux, voir Appelt et al.).

Si, au fil du temps, les gouvernements ont été sans cesse plus nombreux à mettre en place des dispositifs fiscaux favorables à l'innovation, l'utilité de chacun d'entre eux dans la panoplie globale des politiques en vigueur n'en est pas moins extrêmement variable selon les pays. Il n'est pas rare que les allègements fiscaux n'y représentent qu'une part minime de l'aide publique accordée aux entreprises qui innovent, la moyenne de l'OCDE étant voisine de 33 % (graphique 4.13). Arrivent en tête de classement les pays où ce type d'instruments trouvent une utilité forte et croissante ; en dernière position ceux où elle est moyenne ou faible. L'utilité perçue des incitations fiscales à la R-D entretient une relation étroite avec leur coût relatif si l'on compare à certains instruments servant au financement direct de la R-D. On notera cependant que beaucoup des pays arrivant en milieu de classement – soit ceux où le financement indirect représente de 10% à 50 % de l'ensemble du financement public – accordent à la question plus d'intérêt qu'il n'y paraît au vu des allègements fiscaux pratiqués.

Relativement stables sur la période 2012-14, les dispositifs fiscaux en faveur de la R-D sont l'un des volets des politiques STI qui, globalement, ont le moins évolué (OCDE, 2014a). Davantage de changements ont en revanche été observés entre 2014 et 2016. Certains pays ont mis en place de nouveaux dispositifs fiscaux en faveur de la R-D (Lettonie, République slovaque) et des exonérations de prélèvements sur salaires (Espagne). Comme par le passé, des dispositions particulières ont été ajoutées afin de rendre les dispositifs existants plus généreux : relèvement des taux d'allègement fiscal (Autriche), des seuils de déduction des dépenses (Fédération de Russie, Thaïlande), ou du plafond de l'impôt exigible susceptible d'être compensé par des crédits d'impôt en faveur de la R-D (Espagne, Norvège). Certains dispositifs nouveaux ou dispositions amendées visent par ailleurs à rendre les allègements plus accessibles et mieux adaptés aux PME et aux jeunes entreprises (Croatie, Lettonie et Pays-Bas), par exemple en réduisant les contraintes administratives imposées aux demandeurs, ou en autorisant les entreprises déficitaires (généralement lors des phases de démarrage) à en bénéficier (voir aussi le profil « Incitations fiscales en faveur de l'innovation »).

Les allègements fiscaux en faveur de l'innovation tendent à refléter la volonté des pouvoirs publics de les utiliser comme un moyen de favoriser le transfert de technologie. Les mesures à cet effet peuvent aller des conditions préférentielles pour les dépenses de R-D collaborative ou l'achat de services intellectuels auprès d'universités et d'établissements publics de recherche (EPR) (Italie, Lettonie), à l'amortissement accéléré des investissements

dans les nouvelles technologies et connaissances (Fédération de Russie, Pologne), en passant par des régimes fiscaux avantageux pour l'acquisition d'actifs incorporels (Australie). En outre, la Fédération de Russie a pris un éventail de mesures d'exonération de TVA ou d'impôt foncier pour les centres de recherche situés dans des pôles d'activités. En Turquie, les entreprises implantées dans des zones de développement technologique bénéficient d'une panoplie d'incitations fiscales et ont l'obligation de créer un incubateur et un établissement de transfert de technologie.

Dans plusieurs pays, on note également un lien plus étroit entre, d'une part, les allègements fiscaux et, d'autre part, la création d'emplois et la réduction des coûts de main-d'œuvre. En Italie, la loi de stabilité de 2015 prévoit une série de mesures portant sur la fiscalité du travail et les impôts locaux, afin d'encourager la création d'emplois et de réduire le coût de la main-d'œuvre. En Espagne, le nouveau dispositif d'exonération de prélèvements sur salaires a pour objectif d'inciter les entreprises commerciales et les organisations innovantes à créer des emplois dans la R-D.

Les incitations fiscales en faveur de la R-D sont devenues un levier d'attractivité de l'écosystème national de la recherche et un moyen de se livrer à une concurrence fiscale pour attirer les centres de R-D étrangers. En 2013, le Royaume-Uni a mis en place un programme de crédit d'impôt sur les dépenses de R-D (Research and Development Expenditure Credit, RDEC) destiné à attirer les investissements des grandes entreprises. Depuis 2016, ce programme remplace complètement le dispositif de crédit d'impôt qui existait jusque-là.

Certains pays tendent à allier ces dispositifs axés sur les dépenses et des régimes de taxation de la propriété intellectuelle dénommés *patent boxes*, destinés à encourager le regroupement géographique des activités de R-D et de fabrication. Ces régimes prévoient des allègements fiscaux sur les revenus tirés de la propriété intellectuelle (PI) et visent à favoriser l'exploitation, sur le territoire national, de nouvelles technologies et connaissances afin d'en optimiser les avantages, notamment en termes de créations d'emploi et de diffusion des connaissances. Ils ciblent en particulier les grandes entreprises multinationales capables de mettre au point des stratégies d'optimisation fiscale à l'échelle mondiale et de dissocier la production du savoir de son utilisation. L'Indonésie, l'Irlande, le Portugal, la Thaïlande et la Turquie ont entrepris récemment d'exonérer les revenus tirés de l'exploitation de la PI de l'impôt sur les sociétés. En Fédération de Russie, les opérations liées à la protection et la commercialisation des droits de propriété intellectuelle (DPI) sont exonérées de TVA depuis 2015. Le Congrès des États-Unis envisage également de mettre en place un régime spécial de taxation de l'innovation (*innovation box*) dans le cadre d'une réforme plus large de la fiscalité des entreprises (KPMG, 2015). Toutefois, il est de plus en plus souvent reproché à ces régimes en faveur des brevets ou de l'innovation de constituer des pratiques fiscales dommageables susceptibles d'encourager la concurrence fiscale mondiale, et de mener à des transferts de bénéfices et une érosion de la base d'imposition. Fin 2015, le Royaume-Uni a adopté un projet de loi visant à mettre le régime de taxation des brevets davantage en conformité avec les normes de l'OCDE en matière de pratiques fiscales dommageables (voir également le profil « Incitations fiscales en faveur de l'innovation »).

En outre, les gouvernements ont cherché à encourager le recours à des mécanismes de financement moins traditionnels. De fait, dans les années à venir, le financement des entreprises innovantes restera un enjeu majeur. La dépendance des PME à l'égard du financement bancaire est de plus en plus considérée comme problématique (OCDE, 2016h).

Des formes originales de financement progressent à la faveur du déploiement des technologies de l'information et des communications (TIC), des pratiques entre particuliers et de la valorisation croissante des actifs intellectuels. Le financement reposant sur les actifs permet aux entreprises d'obtenir des fonds en fonction de la valeur des actifs particuliers qu'elles produisent dans le cadre de leurs activités, notamment de leurs actifs incorporels. À cela s'ajoute le financement participatif, qui permet aux entrepreneurs de lever des fonds externes auprès d'un large public, plutôt que de faire appel à un groupe restreint d'investisseurs spécialisés, chaque intervenant apportant une petite partie du financement nécessaire. En règle générale, les plateformes internet assurent l'interface entre les investisseurs et les entreprises.

Si ces mécanismes restent à ce jour de faible portée et marginaux, ils se développent rapidement et pourraient bien ouvrir de nouvelles possibilités pour autant que les cadres réglementaires en place le permettent (encadré 4.2). L'Australie a adopté une nouvelle loi autorisant le financement participatif (*crowd-sourced equity funding*) et mis en place des incitations fiscales à l'intention des investisseurs. L'Autriche a instauré un cadre réglementaire visant à développer le financement « alternatif » de l'innovation, notamment le financement participatif. Les obligations légales en termes d'informations de base à fournir et de déclarations administratives ont été réduites (simplification des prospectus afférents aux opérations sur les marchés de capitaux, par exemple). Des normes ont également été instaurées pour protéger les investisseurs.

Encadré 4.2. L'essor du financement participatif

Les estimations des volumes de financement participatif en Amérique du Nord, calculées à partir des données issues de 1 250 plateformes actives dédiées, révèlent une augmentation de 145 % entre 2013 et 2014, pour un total d'environ 9.5 milliards USD. L'Europe a enregistré une hausse comparable (+ 141 %), partant toutefois d'un niveau inférieur, pour atteindre un total de 3.3 milliards EUR. Le phénomène a explosé en Asie (+ 340 %), pour s'établir à 3.4 milliards USD en 2014 ; la région devrait d'ailleurs tirer l'expansion mondiale à venir. L'Afrique, l'Océanie et l'Amérique du Sud ont certes enregistré une progression notable, mais les volumes étaient tous inférieurs à 100 millions USD en 2015. Le financement participatif se heurte néanmoins à un obstacle : plus de la moitié des transactions servent actuellement à financer des causes sociales ou artistiques et des opérations immobilières plutôt que d'autres activités menées par des entreprises à but lucratif.

Les plateformes de financement participatif pourraient en outre avoir une incidence considérable sur les autres circuits de financement, du fait des opportunités d'investissement et de partage de risques qu'elles offrent (OCDE, 2016h). Par exemple, les investisseurs providentiels, qui tendent à investir localement, à la différence des investisseurs en capital-risque, sont en mesure de financer des start-ups sur une zone géographique plus étendue. Ces mêmes plateformes contribueront également à renforcer la tendance croissante des investisseurs providentiels à co-investir avec d'autres acteurs intervenant dans les phases initiales de développement, afin de diversifier les risques. De même, les plateformes de financement sans prise de participation (don ou financement avec contrepartie) ouvrent de nouveaux horizons aux innovateurs, tout en faisant courir des risques limités aux donateurs, qui n'agissent pas par intérêt pécuniaire (OCDE, 2015e).

D'importantes questions réglementaires demeurent sans réponse (OCDE, 2015e). Les opportunités que présente le financement participatif demanderaient à être examinées au regard des risques corollaires, notamment pour les investisseurs, lesquels n'ont pas toujours

Encadré 4.2. **L'essor du financement participatif** (suite)

aisément accès à l'information et sont sans doute moins familiers de ce genre de transactions que ne le sont des professionnels. Il y aurait lieu également de se demander en quoi consistent (ou consisteront) le produit ou les « bénéfices pour la collectivité ». Compte tenu des perspectives que le financement participatif ouvre aux start-ups en phase de démarrage, il convient d'établir un cadre réglementaire clair, afin de minimiser ses risques et de libérer tout son potentiel (Wilson et Testoni, 2014, cité dans OCDE, 2015e).

Sources : Massolution (2015), *2015CF Crowdfunding Industry Report*, http://reports.crowdsourcing.org/?route=product/product&product_id=54 ; OCDE (2016h), *Financing SMEs and Entrepreneurs 2016: An OECD Scoreboard*, http://dx.doi.org/10.1787/fin_sme_ent-2016-en ; OCDE (2015e), *Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE 2015*, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264243767-fr>.

Affronter la concurrence mondiale

La prospérité d'un pays, qui a longtemps été fonction de sa participation à l'économie internationale, dépend aujourd'hui de son intégration aux chaînes de valeur mondiales (CVM). Pays et entreprises prennent part aux CVM par le biais de l'investissement direct étranger (IDE) et des échanges de biens et de services, qui permettent d'accéder à un éventail plus large de technologies, de compétences et d'actifs à forte intensité de savoir. Les CVM ont modifié la nature de la concurrence mondiale : les entreprises et les pays ne rivalisent plus seulement pour gagner des parts de marché dans des secteurs à forte valeur ajoutée, mais aussi, de plus en plus souvent, pour développer des activités à forte valeur ajoutée au sein des CVM. Sans compter que ces dernières permettent à de nouveaux types d'entreprises – notamment de jeunes structures innovantes – de s'internationaliser (voir le profil « Attirer les investissements scientifiques et technologiques internationaux des entreprises »).

De nombreux pays ont entrepris récemment de repenser leur panoplie de mesures afin d'aider les PME et les start-ups à accéder aux marchés mondiaux. La plupart des initiatives ont visé à fournir à ces entreprises des fonctions de veille au marché et une aide à la commercialisation, la promotion et la valorisation de leur marque (Corée, Espagne, France, Islande, Italie, République tchèque, Royaume-Uni et Turquie). Certains pays leur permettent d'accéder à des mécanismes de financement du risque et de garantie d'emprunt (France, Malaisie), mettent en place des guichets uniques d'information et de conseils d'experts (Corée, Espagne et Royaume-Uni), les accompagnent dans la recherche de partenariats internationaux (Royaume-Uni), et mettent sur pied des formations permettant d'acquérir des compétences et des connaissances sur les marchés internationaux (Islande). La Slovénie mène actuellement un programme d'aide complet. Dans la même veine, l'Autriche, la Corée et la Turquie ont créé des incubateurs et des accélérateurs internationaux.

Des aides financières ont également été consenties pour encourager les petites entreprises à participer à des projets internationaux de R-D axée sur le marché (Autriche, Canada, Chili, Espagne, Lituanie, Turquie, ainsi qu'au niveau de l'Union européenne) ou les aider à combler l'écart financier afin d'accéder aux marchés étrangers (Canada, Irlande), par exemple via des « bons d'internationalisation » (Autriche, Italie et Portugal). Le budget du programme conjoint européen Eurostars, qui s'inscrit dans le cadre de l'initiative Horizon 2020 (2014-20), a été considérablement accru dans le but de promouvoir les activités de recherche transnationale à finalité commerciale auxquelles participent des PME. Le Costa Rica a mis en place des aides à l'innovation et des aides sectorielles, avec une certification de participation aux CVM.

Des mécanismes de gouvernance ont eux aussi été révisés dans le même but. La France a ainsi réuni ses différentes agences dans le domaine pour former Business France, entité qui sera investie d'un rôle essentiel de communication, et aura pour mission de renforcer l'attractivité du pays et cultiver son image de marque. L'Allemagne a dévoilé un plan d'action censé définir la marche à suivre à l'échelon ministériel pour la planification et l'exécution de ses activités de coopération internationale, y compris de suivi et d'évaluation. Ce plan d'action fait appel aux instruments les plus divers, des dispositifs de mobilité aux alliances et partenariats stratégiques.

Autre vecteur essentiel d'intégration des PME aux réseaux de connaissances mondiaux, l'internationalisation des pôles a mobilisé l'attention des pouvoirs publics (voir le profil « Politiques en faveur des pôles d'activités et spécialisation intelligente »). La mondialisation et la concurrence croissantes ont favorisé la spécialisation et l'internationalisation des pôles ; qui plus est, les contraintes budgétaires ont poussé les pouvoirs publics à recentrer leur action sur des domaines présentant un potentiel de retombées positives élevé.

En outre, les documents d'orientation et les plans d'action nationaux en faveur de la science, de la technologie et de l'innovation ont mis l'accent sur l'internationalisation (Allemagne, Australie et Hongrie). Par exemple, l'une des priorités phares de la nouvelle version de la stratégie allemande en faveur des technologies de pointe tient à l'intégration des entreprises et de la science dans les flux mondiaux de connaissances. Cette stratégie comprend par ailleurs un nouveau programme de financement de l'internationalisation des pôles d'activités de pointe. Le programme Baltic Sea Region (BSR) Stars (2015-17), cité plus loin, vise à instaurer et renforcer la coopération transnationale entre le Danemark, la Suède, la Norvège, la Finlande, l'Allemagne, la Lituanie, l'Estonie, la Lettonie, la Pologne et l'Islande, en établissant des liens entre les organisations de pôles. Récemment, l'Australie, la Belgique (Flandre), la Croatie, la Pologne, le Portugal, la Slovénie et la Turquie ont revu leurs politiques en faveur des pôles ou lancé des programmes d'aide à leur développement, afin d'en promouvoir l'internationalisation et de renforcer leur capacité à accéder aux marchés internationaux et aux chaînes logistiques mondiales. Un programme de centres d'expertise mondiaux qui s'adresse à des pôles bien établis de stature internationale a été arrêté dans le cadre du programme norvégien de pôles d'innovation. Son objectif est d'asseoir leur position concurrentielle, en renforçant notamment leur attractivité au sein des CVM.

4.4. Réorienter la recherche publique

Rationaliser les dépenses de recherche publique et accélérer le transfert de connaissances

L'université et la recherche publique ont elles aussi connu d'importants changements d'orientation (graphique 4.3). Certains pays revoient actuellement leur politique globale en matière de recherche dans le but commun d'améliorer l'efficacité du financement public, mais en adoptant, pour ce faire, des approches diverses (voir le profil « Financement de la recherche publique »). Une tendance claire se dégage depuis plusieurs années à l'échelle mondiale en faveur d'un financement plus concurrentiel, avec l'introduction de critères de performance dans le financement institutionnel de base et le recours accru à des dispositifs de type contractuel (OCDE, 2014b). Cette tendance s'est renforcée depuis 2014 en Autriche, au Canada, en Grèce, en Irlande, en Italie, en Nouvelle-Zélande, en Turquie, et en Europe centrale et orientale (Estonie, Pologne). On observe cependant en parallèle un phénomène inverse, avec l'essor des dotations globales dans quelques pays, en particulier en Europe du Nord.

Différents facteurs poussent les pays à concentrer la contribution financière qu'ils accordent à la recherche publique sur des axes prioritaires – les progrès de la recherche scientifique et les nouvelles opportunités qui en découlent, l'intensification de la course mondiale aux talents et aux ressources, et la diminution des ressources publiques. À cet égard, le financement de la recherche publique s'avère particulièrement préoccupant. Les budgets publics affectés à la R-D plafonnent, voire commencent à reculer dans de nombreux pays où les pouvoirs publics constituent la principale source de financement de la recherche publique (OCDE, 2014a). Les États-Unis, qui comptent le système de recherche publique le plus important au monde, ont enregistré la plus longue baisse pluriannuelle de financement fédéral de la R-D universitaire depuis le début des années 70 (NSF, 2015). En outre, les tendances internationales à long terme laissent entrevoir une stabilisation, aux niveaux actuels, des budgets publics en faveur de la R-D (voir chapitre 3). À moins qu'une forte croissance économique ne signe la reprise des dépenses publiques, les crédits publics alloués à la recherche publique ne devraient progresser que lentement. Les priorités d'action concurrentes, telles que l'attention croissante portée à l'innovation des entreprises – et le financement y afférent – et les incitations fiscales en faveur de la R-D, pourraient peser plus fortement encore sur les budgets publics de R-D. Sans compter que la diminution de l'aide publique aux universités et aux établissements d'enseignement supérieur pourrait nuire à la qualité et à l'inclusivité des systèmes éducatifs du fait des coupes dans les services éducatifs et de la hausse des frais de scolarité qui s'ensuivront.

Les décideurs sont sans cesse au défi d'opérer des arbitrages en termes de répartition des ressources entre les différents domaines scientifiques, les besoins à court et long termes, les grands établissements de recherche et les chercheurs individuels, l'infrastructure et le personnel, et les besoins nationaux et internationaux (voir le profil « Missions et orientation de la recherche publique »). La Lettonie mène actuellement des réformes structurelles afin de renforcer sa capacité de recherche institutionnelle, tandis que la Turquie a lancé une évaluation de son infrastructure de recherche en vue d'en améliorer l'efficacité. Le Pérou a pour sa part adopté le plan *Innovate Perú*, qui gère les budgets STI nationaux et met l'accent sur la formation de ressources humaines hautement spécialisées.

De nombreux pays ont réajusté les priorités des domaines de recherche stratégiques de manière à affronter les défis sociétaux (Australie, Belgique-Flandre, Danemark, Italie et Norvège). La Chine, dans son 13^e Plan quinquennal (2016-20), entend doubler la part du financement consacré à la recherche fondamentale (à 10 %), tandis que la Corée ambitionne de porter la part des dépenses de recherche publique affectées à la recherche fondamentale à 40 % d'ici 2017. Les Pays-Bas ont eux aussi augmenté le budget destiné à ce type de recherche. La France a relevé la contribution relative de l'Agence nationale de la recherche aux programmes génériques. Le Danemark a simplifié son système de financement de la recherche en fusionnant les institutions pour former le Fonds pour l'innovation, qui a pour mission de soutenir les projets tout au long de la chaîne de valeur, de la recherche stratégique à la commercialisation.

La recherche publique a également vu ses sources de financement évoluer du fait du rôle croissant de l'industrie, par exemple en Allemagne, en Irlande, en Italie et au Luxembourg, sous l'effet d'incitations plus fortes à l'investissement, d'une minoration des budgets publics qui lui sont alloués dans certains pays et d'un meilleur alignement des programmes de recherche publique sur les besoins sociétaux. À cet égard, comme évoqué plus haut, les incitations fiscales à la R-D sont de plus en plus souvent utilisées pour lever des fonds privés à l'appui de la recherche publique (Islande, Italie). À cela s'ajoutent d'autres

leviers : nouveaux dispositifs de gouvernance (refonte des ministères des affaires économiques et de la science en Belgique, nouvelle stratégie de l'enseignement supérieur en Hongrie, politique et plan d'action ST en Islande), nouveaux cadres juridiques (Grèce), chèques-innovation (Portugal et République tchèque), programmes d'aide publique assortis d'une obligation de cofinancement minimum (Lettonie, Pays-Bas) et actualisation des mécanismes d'affectation des dotations globales afin d'encourager les financements tiers (Norvège). L'Irlande mène le programme Spokes, qui octroie un financement supplémentaire aux centres de recherche existants qui réalisent des projets financés sur fonds publics, à condition qu'ils fassent intervenir des partenaires industriels.

Les PPP offrent la possibilité de partager les risques, les ressources et les orientations. La conclusion de tels partenariats est encouragée par des groupements de financement (en Espagne, en Irlande et au Pérou, par exemple) et des initiatives ou centres de recherche conjoints. La Suède et le Royaume-Uni ont récemment apporté des capitaux destinés à financer la recherche, à hauteur respectivement de 35 millions USD et 725 millions USD, à des partenariats stratégiques à grande échelle susceptibles de lever des financements privés équivalents. Au niveau de l'Union européenne, plusieurs PPP ont vu le jour, à l'instar des Initiatives technologiques conjointes (ITC) à long terme, qui devraient recevoir 12 milliards USD du secteur privé sur les sept prochaines années.

Les établissements scientifiques philanthropiques et privés, bien que marginaux et de petite taille, tendent de plus en plus à compléter les sources de financement public, en particulier dans la recherche fondamentale translationnelle et des domaines de recherche ciblés (santé et bien-être, par exemple). La Norvège et le Portugal ont rétabli ou renforcé il y a peu les dispositifs de soutien en faveur des dons. L'Espagne a institué le Conseil des Fondations pour la science, chargé de diffuser l'information sur les meilleures pratiques en matière de promotion des investissements dans la science et d'inciter d'autres fondations à se tourner vers la science. L'Australie a créé le Biomedical Translation Fund (BTF), doté de 174 millions USD en PPA (250 millions AUD) et chargé d'inciter le secteur privé à investir et d'accélérer la transposition des découvertes médicales australiennes en applications de santé.

Les pays ont continué d'adopter des lois et de mettre au point des stratégies nationales afin de promouvoir à la fois la commercialisation des résultats de la R-D et la collaboration entre les milieux universitaires et industriels (Corée, Turquie). Des directives nationales sont également directement intégrées dans les stratégies STI plus larges (Danemark, Irlande), notamment les stratégies de spécialisation intelligente (Croatie, France, Grèce, Lettonie, Lituanie et Portugal). La Colombie, la Croatie, la Norvège, les Pays-Bas et la Slovénie poursuivent les efforts de professionnalisation des organismes responsables du transfert de technologie. Les plateformes et pôles technologiques nationaux se sont multipliés dans de nombreux pays ; ils agissent comme des espaces physiques ou virtuels permettant aux entreprises et aux EPR d'entrer en relation et d'accéder à des ressources, des compétences et des services d'assistance technique. À l'échelle internationale, le projet Baltic Sea Region (BSR) Stars (2015-17) a pour objectif de jeter des ponts entre les environnements de recherche, les pôles d'activités et les réseaux de PME des différents pays de la région. Les gouvernements ont également mis sur pied des programmes de transfert de technologie (Allemagne, Lituanie), des holdings technologiques (Corée) et des accélérateurs (Turquie) afin de favoriser la commercialisation des résultats de la recherche publique.

Favoriser la recherche interdisciplinaire et la science ouverte

Affronter les défis sociétaux complexes qui se posent à l'échelle mondiale exige des efforts de recherche dans des domaines traditionnellement éloignés, alors même que les organismes publics de recherche (universités et établissements publics), les organismes de financement de la recherche et les mécanismes d'évaluation (en particulier les examens par les pairs) sont essentiellement compartimentés par discipline. Ces dernières décennies, les pays se sont intéressés de près aux moyens de réduire ce cloisonnement, ce qui a conduit à restructurer divers établissements de recherche et parties prenantes (Belgique, Corée, Japon, Pays-Bas, Royaume-Uni et Suède), et à modifier les pratiques d'évaluation et de sélection (Islande, Italie et Norvège).

Les initiatives en faveur de la science ouverte montent en puissance avec l'élargissement de l'accès aux résultats et aux données de la recherche, notamment aux publications scientifiques (voir le profil « La science ouverte »). Les efforts déployés récemment ont été centrés sur la création de cadres juridiques idoines et la formulation d'orientations pratiques sur le libre accès et les données ouvertes. Les pays sont de plus en plus nombreux à prendre des dispositions imposant le libre accès. Dans la plupart des cas, les organismes qui financent la recherche sont à l'origine de telles initiatives, mais il arrive également que ces dispositions soient inscrites dans la loi, que ce soit au niveau national (Mexique) ou fédéral (Allemagne). L'Allemagne, l'Autriche et le Royaume-Uni ont modifié récemment leur législation nationale sur les droits d'auteur de manière à promouvoir la science ouverte. Des infrastructures adaptées ont également été mises en place, afin notamment de favoriser le partage des données de la recherche. La planification et le financement des grandes infrastructures électroniques sont de plus en plus souvent intégrés aux procédures nationales (et européennes) destinées à planifier et financer plus largement les infrastructures de recherche. Les États-Unis, la Finlande et le Royaume-Uni ont également entrepris de remédier au déficit de compétences dans les domaines de la science ouverte et de l'analytique des données massives en favorisant la mise en place de formations spécifiques et en formulant des orientations à l'intention des chercheurs.

4.5. Étendre les compétences et insuffler une culture de l'innovation

Plusieurs pays ont entrepris il y a peu de renouveler leur panoplie de mesures afin de renforcer les compétences en matière d'innovation, et de développer une culture de la science et de l'innovation plus large. C'est d'ailleurs l'un des volets les plus actifs des politiques en faveur de l'innovation (graphique 4.3).

L'enseignement des sciences, des technologies, de l'ingénierie et des mathématiques (STIM) reste fondamental dans de nombreux pays de l'OCDE et d'économies partenaires. Les budgets publics consacrés au développement de l'enseignement de ces disciplines ont augmenté en Afrique du Sud, en Belgique (au niveau fédéral), en Croatie, aux États-Unis et en Lettonie. D'autres initiatives ont vu le jour récemment, des efforts déployés pour les rendre plus intéressantes et attrayantes aux yeux des jeunes (Irlande, Nouvelle-Zélande et Portugal) aux nouveaux programmes de formation et critères de recrutement des enseignants (Corée, Croatie, Irlande, Norvège et Suède), en passant par la mise en place de nouvelles méthodes d'enseignement et le recours à des outils pédagogiques numériques (Espagne, Irlande, Lituanie, Portugal et République tchèque) (voir le profil « Le renforcement de la formation et des compétences au service de l'innovation »).

Les politiques d'éducation ont également évolué pour tenir compte de l'élargissement de l'éventail de compétences hors science et technologie nécessaires à l'innovation. Les programmes ont été actualisés afin de développer les compétences génériques (Espagne), les aptitudes en matière de résolution de problèmes (Corée) et l'esprit d'entreprise (Croatie, Fédération de Russie, Irlande et Turquie). En Finlande, l'entrepreneuriat est lié à la citoyenneté participative et active, et constitue un thème transdisciplinaire abordé au cours des premier et deuxième cycles de l'enseignement secondaire.

De nombreux pays ont également cherché à renforcer la participation et le soutien du public dans les domaines de la science et de l'entrepreneuriat. Il s'agit là d'un pilier des stratégies STI nationales, celles des économies à revenu intermédiaire (Chili, Colombie, Costa Rica et Malaisie) mais aussi de certaines économies plus avancées qui affichent traditionnellement un niveau élevé de performance au regard des indicateurs STI (Corée, Finlande). Des efforts ont également été déployés pour développer les capacités afin d'insuffler une culture ST et de populariser la science – événements de communication, musées et ressources internet (Fédération de Russie, France et République tchèque). De nombreuses initiatives ont par ailleurs vu le jour, sous la forme de grandes manifestations publiques (Australie, Corée, Croatie et Grèce), de campagnes de promotion (Chili), de concours et de prix (Australie, Canada, Chine et Costa Rica). Les pouvoirs publics ont en outre cherché à développer l'esprit d'entreprise et élargir les formes de créativité, jusque sur le lieu de travail (voir le profil « Développer une culture de la science et de l'innovation »).

4.6. Améliorer la gouvernance des politiques

Vers des politiques fondées sur des données probantes

Les pouvoirs publics portent ces dernières années une attention croissante à l'évaluation et à l'étude d'impact des politiques STI (graphique 4.3 et profil « L'évaluation et l'étude d'impact des politiques STI »). Cette tendance s'explique en partie par les contraintes budgétaires et la nécessité de justifier de l'utilisation optimale des fonds publics. Les pratiques en matière d'évaluation dépendent dans une large mesure du pays et du contexte dans lequel elles s'inscrivent. D'où l'hétérogénéité persistante de la nature et du niveau de développement de ces types d'exercices selon les pays, ainsi que leur lente évolution. Dans certains cas, les capacités en termes d'évaluation et d'étude d'impact sont aux premiers stades de développement (Afrique du Sud, Colombie, Fédération de Russie et Malaisie) (OCDE, 2016i ; 2016j), tandis que dans d'autres, ces activités font partie intégrante de la culture politique et sont davantage institutionnalisées.

Les tendances récentes en matière d'évaluation des politiques sont marquées par une utilisation accrue des données administratives publiques et des technologies numériques pour la collecte des données (« données massives »), des évaluations de moindre portée et plus rapides (Nouvelle-Zélande), une utilisation plus stratégique des évaluations (République populaire de Chine) et la complexité croissante des concepts et des pratiques, du fait souvent de la multiplication des raisons qui les sous-tendent, des objectifs stratégiques visés, des acteurs, des dispositifs, des cibles et des instruments.

La complexification de l'arsenal de politiques STI (avec davantage d'instruments, d'objectifs, d'intervenants) a fait croître le risque d'une mauvaise affectation des ressources publiques et de conflit éventuel entre les différentes mesures. En conséquence, on assiste à une généralisation des évaluations systémiques, dont les modalités diffèrent toutefois d'un pays à l'autre. La Colombie, l'Espagne, l'Islande, la Lituanie, le Luxembourg,

la Malaisie, la Suède et la Thaïlande ont fait l'objet récemment d'examen à grande échelle, menés par des pairs sous l'égide d'organisations internationales, dont l'OCDE. L'Union européenne a pour sa part réalisé une évaluation de son septième programme-cadre, ainsi qu'une évaluation intermédiaire du programme Horizon 2020 (CE, 2013). Par ailleurs, certains pays ont mobilisé la capacité d'évaluation nationale pour mesurer les résultats des mesures entreprises (Plan de développement de la ST en Chine, stratégie de R-D Knowledge-Based Estonia en Estonie, par exemple), concentrant parfois les efforts sur des parties du système STI national (système d'aide aux entreprises en Irlande, politique en faveur des entreprises aux Pays-Bas, ou encore système de recherche en Australie).

Dans l'ensemble, les efforts déployés visaient à bâtir une base de connaissances sur les politiques STI, via la mise en place d'études d'impact et la systématisation de l'évaluation, la mise en œuvre d'une approche pangouvernementale de l'évaluation (par exemple, au Royaume-Uni, le ministère des Finances a défini un cadre d'évaluation afin de comparer les dépenses d'investissement dans différents domaines d'action publique), l'harmonisation des pratiques (méthodologies et indicateurs communs) et la création d'infrastructures de données et de communautés d'experts (OCDE, 2012). Les États-Unis, le Japon et la Norvège ont mené des initiatives de type « science de la politique de la science et de l'innovation » (*science of science and innovation policy*, SciSIP) afin de mettre au point des modèles, des outils analytiques, des données et des mesures. La Commission européenne (Policy Support Facility) et l'OCDE/la Banque mondiale (avec la Plateforme des politiques d'innovation) tiennent à jour des plateformes numériques offrant un accès unique aux bases de connaissances disponibles à l'échelle internationale sur l'innovation et les politiques, ainsi que des outils d'évaluation comparative et de diagnostic (PPI, 2016).

Vers des politiques STI plus responsables

Les gouvernements s'efforcent de privilégier une approche globale de la gouvernance en renforçant les dispositifs de coordination à tous les niveaux (Autriche, Colombie et Irlande) et en impliquant l'industrie et la société en amont du débat politique, par le biais d'approches participatives de la définition des priorités (Argentine, Chili, Danemark, Grèce, Pays-Bas et Turquie) (voir le profil « Participation du public aux politiques STI »).

Si le ralentissement économique est au centre de l'attention, les décideurs chargés des politiques STI sont aussi confrontés à des défis sociétaux sans précédent, auxquels il est urgent de s'atteler. Dans la Déclaration de Daejeon sur les politiques de la science, de la technologie et de l'innovation pour l'ère du numérique mondial (2015), les ministres de nombreux pays de l'OCDE et d'économies partenaires ont mis en évidence le rôle de la STI en tant que levier essentiel pour répondre aux enjeux mondiaux et sociaux, notamment la durabilité environnementale, la sécurité alimentaire et le vieillissement en bonne santé, et réaliser les Objectifs de développement durable adoptés par les Nations Unies. Face aux préoccupations croissantes, les dimensions éthique et sociétale de la recherche deviennent de plus en plus prégnantes et s'invitent dans l'élaboration des politiques de RIR. L'arsenal de mesures RIR est complexe, car il implique de mobiliser de nombreux instruments à différents stades du cycle pour atteindre des objectifs stratégiques divers. Dans la pratique, la plupart des efforts déployés récemment visaient à aborder la gouvernance selon une approche globale, définir une nouvelle orientation et ligne d'action nationale, mettre en place des infrastructures et des incitations à l'appui de la recherche interdisciplinaire et de la science ouverte, élargir l'éventail de compétences et insuffler une

culture de l'innovation (voir les profils « Participation du public aux politiques STI » et « Développer une culture de la science et de l'innovation »).

Les principes de recherche et d'innovation responsables ont été intégrés dans les programmes en faveur de l'innovation (voir le profil « Stratégies ou plans nationaux en matière de science, technologie et innovation »). Le programme de recherche de l'Union européenne Horizon 2020 met l'accent sur les défis sociétaux et agit comme un fédérateur afin de faire converger les stratégies nationales de plusieurs pays européens (CE, 2013). En dehors de l'Union européenne, le Japon a lancé son cinquième Plan ST (2016-20), qui a pour objectif de favoriser la croissance durable et de contribuer à relever les défis mondiaux. Les exercices nationaux de prospective et d'évaluation technologique anticipant les besoins sociétaux à long terme ont étayé l'élaboration des politiques en Allemagne et en République tchèque.

En aval, des initiatives RIR ciblent les organisations intervenant dans le déploiement des politiques, à l'instar des organismes de financement, par exemple (Norvège, Pérou). Par ailleurs, les principes de RIR sont parfois intégrés dans les programmes de financement existants, via l'augmentation de la part du financement consacré à la recherche interdisciplinaire, la prise en compte des questions de parité homme-femme dans le processus d'affectation des fonds (Irlande), la priorité donnée aux sciences sociales et humaines (Allemagne), et le financement de nouveaux programmes de recherche spécifiques (tels que le programme Top Citizen Science, en Autriche).

Notes

1. Il y a lieu de signaler que les résultats de l'enquête STIP font actuellement l'objet d'un traitement semi-quantitatif aux fins du développement d'indicateurs sur les politiques. Un approfondissement est nécessaire pour mieux cerner et apprécier les possibilités et limites d'utilisation et d'interprétation (Kergroach, à paraître-b). Une analyse descriptive de la base de données STIP pourrait néanmoins donner matière à quelques observations élémentaires.
2. La présente section est constituée d'extraits des *Perspectives économiques de l'OCDE 2016*, sauf indication contraire.
3. L'unité d'observation retenue pour établir la cartographie de l'enquête STIP est celle des « grandes initiatives », lesquelles s'entendent d'interventions menées par les pouvoirs publics i) en adéquation avec un ou plusieurs de leurs objectifs en matière de science, de technologie et d'innovation ; ii) afin d'agir sur le comportement d'acteurs et de parties prenantes, qu'ils soient d'origine nationale ou étrangère, qui interviennent dans les systèmes nationaux d'innovation ou exercent sur eux une influence ; iii) pour une durée minimale ou sans limitation de durée (autrement dit qui n'ont pas un caractère ponctuel). Les observations sont faites aux niveaux national, central ou fédéral, selon la structure administrative propre à chaque pays. Une initiative des pouvoirs publics sert un objectif unique ou multiple ; elle a plusieurs propriétés. Chacune de ces initiatives recouvre une ou plusieurs actions stratégiques, menées à bien au moyen d'un ou plusieurs instruments, et possède un caractère générique, ou spécifique si elle porte sur un ou plusieurs groupes, secteurs et/ou technologies bien déterminés. Elle se caractérise également par son angle d'attaque (action sur la demande/sur l'offre, approche ascendante ou descendante) et son mode d'exécution (concurrentiel ou universel, sélectif ou discrétionnaire). On notera que les caractéristiques d'une initiative sont aussi intrinsèquement liées aux actions stratégiques, instruments et cibles qui lui sont associés. Il est possible par conséquent de décrire la panoplie de mesures en vigueur en fonction de l'articulation et des propriétés des initiatives engagées (Kergroach, S. et al., à paraître-a).
4. Bien qu'elles aient un coût financier de par l'abandon de recettes qu'elles occasionnent, les incitations fiscales à la R-D ne représentent qu'un modeste montant en proportion du produit de l'impôt sur les sociétés. Les allègements fiscaux en faveur de la R-D équivalaient en 2014 à 4 % – sinon moins – des recettes perçues par l'État au titre de cet impôt dans la plupart des pays et à moins de 12 % de ces recettes là où les dispositifs en vigueur sont particulièrement généreux (calculs de l'auteur d'après OCDE, 2016b et 2016g).

5. Le capital intellectuel, parfois dénommé « actifs immatériels » ou « actifs incorporels », représente une ressource pérenne des entreprises et des institutions. Par nature, les actifs intellectuels ne sont pas physiques, et leur valeur tient principalement à leur contenu en termes de connaissances et à leur capacité à valoriser d'autres actifs. Les investissements en capital intellectuel peuvent se répartir en trois groupes principaux : les données informatisées (logiciels, bases de données, etc.) ; le capital d'innovation (R-D scientifique et non scientifique, droits d'auteur, dessins et modèles, marques) ; et les compétences économiques (dont la valeur de marque, certains aspects de publicité et marketing, le capital humain propre à l'entreprise et le savoir-faire organisationnel). Certains types d'actifs intellectuels sont désormais comptabilisés dans le Système des comptes nationaux (SCN). Les actifs intellectuels entrant dans la définition du SCN sont les suivants : logiciels, R-D, loisirs, originaux littéraires et artistiques, et prospection minière. D'autres actifs intellectuels tels que les activités de conception, le développement de nouveaux produits dans le secteur financier, les marques, les formations propres aux entreprises et le capital organisationnel sont depuis quelques années au centre d'un travail méthodologique visant à établir des mesures comparables internationalement (OCDE, 2015a).

Références

- Appelt, S. et al., « R&D tax incentives: Evidence on design, incidence and impacts », *OECD Science, Technology and Industry Policy Papers*, Éditions OCDE, Paris.
- BCE (Banque centrale européenne) (2016), *Survey on the access to finance of enterprises (SAFE)*, avril, www.ecb.europa.eu/stats/money/surveys/sme/html/index.en.html.
- CE (Commission européenne) (2013), *Programme-cadre de l'UE pour la recherche et l'innovation – Horizon 2020 (2014-2020)*, <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/responsible-research-innovation>.
- CE/OCDE (à paraître), *International Database on STI Policies (STIP)*, édition 2016, www.innovationpolicyplatform.org/sti-policy-database.
- EBAN (European Business Angels Network) (2016), *The European Trade Association for Business Angels, Seed Funds, and other Early Stage Market Players*, statistiques en ligne, mai, www.eban.org/wp-content/uploads/2014/09/Early-Stage-Market-Investment-2015.png.
- ESPAS (Système européen d'analyse politique et stratégique) (2015), *Tendances mondiales à l'horizon 2030 : L'Union européenne peut-elle relever les défis à venir ?*, Bureau des publications de l'Union européenne, Luxembourg, http://europa.eu/espas/pdf/espas-report-2015_fr.pdf.
- FMI (Fonds monétaire international) (2016), *World Economic Outlook*, avril, www.imf.org/external/datamapper/index.php.
- IPP.Stat (2016), Plateforme de statistiques PPI IPP.Stat, janvier, www.innovationpolicyplatform.org/content/statistics-ipp.
- Kergroach, S. et al. (à paraître-a), « Mapping the policy mix for innovation: The OECD STI Outlook and the EC/OECD International STIP Database », *Document de travail de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris.
- Kergroach, S. et al. (à paraître-b), « Measuring some aspects of the policy mix: Exploring the EC/OECD International STI Policy Database for policy indicators », *Document de travail de la Direction de la science, de la technologie et de l'innovation de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris.
- KPMG (2015), « International Tax, Patent Boxes, and Tax Reform », septembre, <https://home.kpmg.com/content/dam/kpmg/pdf/2015/10/tnf-combined-sep11-2015.pdf> (consulté le 24 septembre 2016).
- Massolution (2015), *2015 CF Crowdfunding Industry Report*, Crowdsourcing.org, http://reports.crowdsourcing.org/?route=product/product&product_id=54.
- NSF (National Science Foundation) (2015), *NSF's Higher Education Research and Development (HERD) Survey*, novembre, www.nsf.gov/statistics/2016/nsf16302/ (consulté le 24 septembre 2016).
- OCDE (2016a), « Perspectives économiques de l'OCDE n° 99 (Édition 2016/1) », *Perspectives économiques de l'OCDE : statistiques et projections (base de données)*, juin, <http://dx.doi.org/10.1787/f1f62136-fr>.
- OCDE (2016b), *Comptes nationaux des pays de l'OCDE (base de données)*, données extraites du portail OECD.Stat le 2 juin 2016.
- OCDE (2016c), *Statistiques sur la productivité (bases de données)*, www.oecd.org/fr/std/stats-productivite/.
- OCDE (2016d), *Statistiques de la recherche et développement (SRD) (base de données)*, mars, www.oecd.org/fr/innovation/inno/srd.htm.

- OCDE (2016e), *Principaux indicateurs de la science et de la technologie de l'OCDE* (base de données), www.oecd.org/fr/sti/pist.htm.
- OCDE (2016f, à paraître), *Panorama des comptes nationaux*, Éditions OCDE, Paris.
- OCDE (2016g), Base de données OCDE/GENIST sur les incitations fiscales à la R-D, juillet, www.oecd.org/fr/sti/rd-tax-stats.htm.
- OCDE (2016h), *Financing SMEs and Entrepreneurs 2016: An OECD Scoreboard*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/fin_sme_ent-2016-en.
- OCDE (2016i), *OECD Reviews of Innovation Policy: Malaysia 2016*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264255340-en>.
- OCDE (2016j), *Examens de l'OCDE des politiques d'innovation*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/fr/sti/inn/examensdelocdedespolitiquesdinnovation.htm.
- OCDE (2015a), *Science, technologie et industrie : Tableau de bord de l'OCDE*, Éditions OCDE, Paris, www.oecd.org/fr/sti/science-technologie-industrie-tableau-de-bord.htm.
- OCDE (2015b), *The Future of Productivity*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264248533-en>.
- OCDE (2015c), *Panorama de l'entrepreneuriat 2015*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/entrepreneur_aag-2015-fr.
- OCDE (2015d), *Panorama des administrations publiques 2015*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/gov_glance-2015-fr.
- OCDE (2015e), *Perspectives de l'économie numérique de l'OCDE 2015*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264243767-fr>.
- OCDE (2014a), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2014*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2014-fr.
- OCDE (2014b), *Promoting Research Excellence: New Approaches to Funding*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264207462-en>.
- OCDE (2012), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2012*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2012-fr.
- OCDE (2011), *Financing High-Growth Firms: The Role of Angel Investors*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264118782-en>.
- OCDE (2010), *Science, technologie et industrie : Perspectives de l'OCDE 2010*, Éditions OCDE, Paris, http://dx.doi.org/10.1787/sti_outlook-2010-fr.
- OCDE (2009), « Policy responses to the economic crisis: Investing in innovation for long-term growth », *Synthèses de l'OCDE*, Paris, juin, www.oecd.org/sti/42983414.pdf (consulté le 24 septembre 2016).
- OCDE (2002), *Manuel de Frascati 2002 : Méthode type proposée pour les enquêtes sur la recherche et le développement expérimental*, Éditions OCDE, Paris, <http://dx.doi.org/10.1787/9789264299047-fr>. Mise à jour de 2015 disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1787/9789264257252-fr>.
- IPP.Stat (Plateforme des politiques d'innovation) (2016), www.innovationpolicyplatform.org/content/statistics-ipp.
- Wilson, K. et M. Testoni (2014), « Improving the role of equity crowdfunding in Europe's capital markets », *Bruegel Policy Contribution Issue*, vol. 2014, n° 09.

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. L'Union 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.

Science, technologie et innovation : Perspectives de l'OCDE 2016

Science, technologie et innovation : Perspectives de l'OCDE est une publication bisannuelle visant à informer les décideurs et les analystes sur les changements récents et possibles des modèles de la science, la technologie et de l'innovation (STI), au niveau mondiale, et leurs implications potentielles pour les politiques nationales et internationales. *Science, technologie et innovation : Perspectives de l'OCDE* fournit une analyse comparative des nouvelles politiques et instruments utilisés dans les pays de l'OCDE et un certain nombre de grandes économies émergentes (Brésil, Chine, Inde, Indonésie, Fédération de Russie et Afrique du Sud), afin de renforcer la contribution de la science et de l'innovation à la croissance et à l'adressage des défis mondiaux et sociaux. Les performances des pays sont référencées et examinées sur la base des informations et des indicateurs les plus récents, mais également à partir des récents développements nationaux en matière de politique d'innovation.

Veillez consulter cet ouvrage en ligne : http://dx.doi.org/10.1787/sti_in_outlook-2016-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.

éditionsOCDE
www.oecd.org/editions



ISBN 978-92-64-28796-9
92 2016 06 2 P



9 789264 287969