

Rapport sur la propriété intellectuelle  
dans le monde 2022

# La trajectoire de l'innovation



**OMPI**



**Rapport sur la propriété intellectuelle  
dans le monde 2022**

# **La trajectoire de l'innovation**

La présente œuvre est publiée sous la licence  
Creative Commons – Attribution 4.0 International.

L'utilisateur est libre de reproduire, distribuer, adapter, traduire et exécuter en public le contenu de la présente publication, y compris à des fins commerciales, sans autorisation expresse, pour autant que l'OMPI soit mentionnée en tant que source et que toute modification apportée au contenu original soit clairement indiquée.

Proposition de citation : Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2022 : La trajectoire de l'innovation. Genève : OMPI.

Les adaptations, traductions et œuvres dérivées ne peuvent en aucun cas arborer l'emblème ou le logo officiel de l'OMPI, sauf si elles ont été approuvées et validées par l'OMPI. Pour toute demande d'autorisation, veuillez nous contacter via le [site Web de l'OMPI](#).

Pour toute œuvre dérivée, veuillez ajouter la mention ci après : "Le Secrétariat de l'OMPI décline toute responsabilité concernant la modification ou la traduction du contenu original."

Lorsque le contenu publié par l'OMPI comprend des images, des graphiques, de marques ou des logos appartenant à un tiers, l'utilisateur de ce contenu est seul responsable de l'obtention des droits auprès du ou des titulaires des droits.

Pour voir un exemplaire de cette licence, veuillez consulter l'adresse suivante :  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Tout litige découlant de la présente licence qui ne peut pas être réglé à l'amiable sera soumis à l'arbitrage, conformément au règlement d'arbitrage de la Commission des Nations Unies pour le droit commercial international (CNUDCI) en vigueur. Toute sentence rendue à l'issue d'un arbitrage s'impose aux Parties et règle définitivement leur différend.

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'OMPI aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement celles des États membres ou du Secrétariat de l'OMPI.

La mention d'entreprises particulières ou de produits de certains fabricants n'implique pas que l'OMPI les approuve ou les recommande de préférence à d'autres entreprises ou produits analogues qui ne sont pas mentionnés.

© OMPI, 2022

Organisation Mondiale  
de la Propriété Intellectuelle  
34, chemin des Colombettes  
Case postale 18  
CH-1211 Genève 20, Suisse

DOI: 10.34667/tind.45357

ISBN: 978-92-805-3385-9 (version imprimée)

ISBN: 978-92-805-3386-6 (version en ligne)

ISSN: 2790-9883 (version imprimée)

ISSN: 2790-9891 (version en ligne)



Attribution 4.0 International  
(CC BY 4.0)

Couverture: Getty Images / © AF-Studio et  
Getty Images / © Lan Zhang

# Table des matières

<b>Liste des tableaux et figures</b>	<b>4</b>	<b>Les écosystèmes d'innovation définissent la trajectoire de l'innovation</b>	<b>17</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>6</b>	<b>Introduction</b>	
<b>Remerciements</b>	<b>9</b>	<b>Quelle est la trajectoire de l'innovation ?</b>	<b>18</b>
<b>Résumé</b>	<b>10</b>	<b>Technologies à l'origine de la croissance de l'innovation</b>	<b>21</b>
<b>Notes techniques</b>	<b>104</b>	<b>Chapitre 1</b>	
<b>Abréviations et sigles</b>	<b>110</b>	<b>La trajectoire de l'innovation</b>	<b>22</b>
		1.1 Dividendes sociaux et dividendes privés	22
		1.2 Interactions au sein des écosystèmes d'innovation	24
		1.3 Les forces économiques à l'œuvre	27
		1.4 Comment une politique peut-elle orienter la trajectoire de l'innovation ?	33
		1.5 Les pays en développement et la trajectoire de l'innovation	36
		1.6 La trajectoire de l'innovation future	39
		<b>Les nouvelles technologies peuvent stimuler le développement en tirant parti des écosystèmes d'innovation locaux</b>	<b>47</b>
		<b>Chapitre 2</b>	
		<b>La trajectoire de l'innovation dans l'histoire</b>	<b>48</b>
		2.1 Seconde Guerre mondiale	48
		2.2 Industrie spatiale	54
		2.3 Essor de l'informatique dans les pays d'Asie de l'Est	60
		2.4 Résumé et conclusions du chapitre	64
		<b>Technologies numériques en croissance rapide Dépôts de brevets 2015-2020</b>	<b>69</b>
		<b>Chapitre 3</b>	
		<b>La trajectoire de l'innovation : les défis de demain</b>	<b>70</b>
		3.1 Les enseignements de la COVID-19	71
		3.2 Tenir compte de l'impératif du changement climatique	75
		3.3 La numérisation change le monde	84
		3.4 Les politiques publiques peuvent tirer parti de l'innovation pour relever les défis	90
		3.5 Conclusions et recommandations générales	93

## Liste des tableaux et figures

Figure 1 Domaines technologiques en forte croissance dans les dépôts de brevets, 1895-2020	11	Tableau 2.2 Meilleures universités et meilleurs hôpitaux avec lesquels des contrats ont été passés pour des projets relatifs à la pénicilline et au paludisme, 1941-1947	53
Figure 2 Croissance des technologies en pourcentage de la croissance moyenne du nombre total de brevets, 2016-2020	11	Figure 2.1 Rendement solaire, en pourcentage, 1960-2020	57
Figure 3 Financement du secteur spatial par la NASA et les investisseurs privés américains, 2010-2019	13	Figure 2.2 Dépenses de la NASA et investissements privés américains dans l'espace, 2010-2019	57
Figure 4 Résumé du concept d'interactions entre les acteurs de l'écosystème de l'innovation	13	Figure 2.3 Part mondiale de brevets déposés dans le domaine de l'électricité, certains pays asiatiques, 1970-2018	63
Figure 5 Estimations de l'avantage social et privé de la mise au point du vaccin contre la COVID-19	14	Figure 3.1a Sources de financement des vaccins contre la COVID-19 par type (en pourcentage)	71
Figure 6 Part des technologies de l'information et de la communication brevetées dans le monde, certains pays d'Asie de l'Est, 1950-2020	14	Figure 3.1b Financement des vaccins contre la COVID-19 par type et par région (en milliards de dollars É.-U.)	71
Figure 7 Croissance des technologies mondiales liées à l'environnement, 1973-2017	15	Figure 3.2 Part des investissements publics en R-D par technologie (en pourcentage), 1974-2019	76
Figure 1.1 Estimation de l'avantage social et privé en milliards de dollars É.-U.	23	Figure 3.3a Nombre total de brevets déposés pour des technologies propres par catégorie	79
Figure 1.2 Résumé du concept d'interactions entre acteurs de l'innovation	25	Figure 3.3b Technologies d'atténuation du changement climatique dans le secteur énergétique, par sous-catégories	79
Figure 1.3 Parts des publications scientifiques par domaine scientifique, 1840-2019	28	Figure 3.4 Part des principales sources d'énergie dans la consommation énergétique totale des États-Unis d'Amérique	80
Figure 1.4 Parts des brevets par domaine technique, 1900-2020	29	Figure 3.5a Total des demandes de brevet dans l'industrie automobile, par brevets verts (véhicules électriques et hybrides), gris et sales	81
Figure 1.5 Résumé du concept d'écosystème de l'innovation en évolution autour d'une nouvelle technologie	30	Figure 3.5b Part des demandes de brevet relatives à des technologies vertes (électriques et hybrides), grises et sales en pourcentage de demandes de brevet dans l'industrie automobile	81
Figure 1.6 Résumé conceptuel des cycles concernant les technologies génériques	32		
Tableau 2.1 10 premières universités avec lesquelles l'OSRD a passé des contrats, classées selon la valeur totale des contrats, 1941-1947	52		

Figure 3.6a Part mondiale de marché des véhicules électriques	82
Figure 3.6b Dépenses pour l'achat de véhicules électriques par origine des fonds	82
Figure 3.7 Part des technologies numériques généralistes par catégorie (à gauche) et en pourcentage de l'ensemble des demandes de brevet (à droite)	85

## Avant-propos

Depuis plus d'un siècle, l'activité d'innovation s'est considérablement développée dans le monde entier. Stimulée par une série d'avancées technologiques allant du moteur à combustion interne aux technologies de l'information et de la communication, elle est devenue l'un des outils les plus puissants à notre disposition pour promouvoir l'amélioration du niveau de vie et de bien-être.

Photo: OMP/ © Berrod



Aujourd'hui, nous sommes à l'aube d'un nouveau chapitre prometteur de l'innovation mondiale. Les technologies numériques telles que l'intelligence artificielle, les mégadonnées, l'informatique en nuage et l'Internet des objets sont en plein essor. Ces technologies qui s'imposent rapidement ont le potentiel de transformer de larges pans de l'économie mondiale, d'ouvrir de nouvelles perspectives de croissance pour les start-up et les autres entreprises et de donner aux populations et aux communautés de toutes les régions du monde les moyens de se développer.

Toutefois, si l'impact positif des idées, produits et services nouveaux est bien compris, l'environnement de prise de décisions plus large sur lequel repose l'innovation est beaucoup moins analysé.

Dans une large mesure, cela reflète la grande diversité des facteurs à l'œuvre. Les décisions en matière d'innovation sont souvent complexes et mettent en jeu un large éventail de parties prenantes et d'intérêts. Ainsi, si les nouvelles opportunités scientifiques et techniques sont infinies, les ressources – humaines et financières – ne le sont pas. De même, avant toute décision d'investissement, faut-il comparer les avantages et les inconvénients des nouvelles technologies, ainsi que des modèles existants. Il y a ensuite les variables qui ne peuvent pas être anticipées, les chocs, situations d'urgence et autres événements susceptibles de modifier en un clin d'œil la demande de la société en matière d'innovation.

Ce processus est le thème du *Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2022*. Notre objectif est de montrer comment les décisions des différents acteurs au sein des écosystèmes d'innovation, tels que les responsables politiques, les chercheurs, les entreprises, les entrepreneurs et les consommateurs, s'articulent pour façonner la trajectoire future non seulement de l'innovation, mais également des économies et des sociétés dans le monde entier.

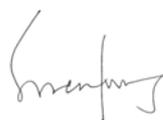
Le rapport s'ouvre sur un examen des principaux facteurs qui définissent la trajectoire de l'innovation, y compris le lien entre les avantages sociaux et les avantages privés. Si les motivations publiques et privées ne sont pas toujours alignées, le rapport montre qu'elles peuvent être utilisées efficacement pour le bien commun.

Comme dans les précédentes éditions, nous complétons cette discussion théorique au moyen d'études de cas rétrospectives. À travers les prismes de l'innovation

médicale durant la Seconde Guerre mondiale, de l'évolution de la course à l'espace et de l'essor des technologies de l'information en Asie de l'Est, nous passons en revue les nombreux facteurs et parties prenantes qui influent sur l'orientation de l'innovation et donnons quelques clés utiles aussi bien pour les pays hautement industrialisés que pour les économies émergentes.

Le rapport se conclut en examinant comment l'innovation peut contribuer à relever les défis mondiaux d'aujourd'hui et de demain. Si la trajectoire à long terme de l'innovation demeure incertaine, nous savons que les nouvelles technologies et solutions numériques ont un rôle essentiel à jouer dans l'édification d'un monde plus vert, plus juste, plus sain et plus résilient. Mais comment orienter l'innovation vers des résultats productifs qui profitent aux économies, aux communautés et à notre planète? Quels moyens de politique générale peuvent être mis en œuvre pour aligner les mesures d'incitation à l'innovation privée sur les besoins de la société? Et que peut-on faire pour aider davantage les pays en développement et les pays les moins avancés à tirer parti des possibilités d'innovation?

Alors que le monde entier cherche à se relever de la pandémie, l'innovation a un rôle crucial à jouer pour ouvrir de nouvelles possibilités de croissance et créer des solutions indispensables aux défis communs que nous devons relever. Les décisions en matière d'innovation peuvent être complexes mais, comme le souligne ce rapport, il est essentiel qu'elles soient comprises.



**Daren TANG,**  
Directeur général  
de l'Organisation Mondiale  
de la Propriété Intellectuelle (OMPI)



## Remerciements

Le Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2022 a été élaboré sous la direction générale de Daren Tang (Directeur général) et Marco Alemán (sous-directeur général). Il a été supervisé par Carsten Fink (économiste en chef) et établi par une équipe dirigée par Julio Raffo (chef de la Section de l'économie de l'innovation). L'équipe était constituée de Intan Hamdan-Livramento (économiste), Maryam Zehtabchi (économiste), Philipp Großkurth (boursier), Federico Moscatelli (boursier), Deyun Yin (boursière) et Prince Oguguo (boursier au titre du programme des jeunes experts) au sein du Département de l'économie et de l'analyse de données.

Le rapport s'est inspiré de différentes études spécialement réalisées à cet effet :

Chapitre 1 : Carsten Fink a fourni des contributions sur les estimations sociales des vaccins contre la COVID-19 et Xiaolan Fu (Université d'Oxford) et Liu Shi (Université d'Oxford), sur les perspectives des pays en développement.

Chapitre 2 : Henry Hertzfeld (Université George Washington), Benjamin Staats (Université George Washington) et George Leaua (Université George Washington) ont mis à disposition des études de fond sur l'espace, BhavSampat (Université de Columbia), sur les antibiotiques et Keun Lee (Université nationale de Séoul), sur les technologies de l'information en Asie de l'Est.

Chapitre 3 : Joëlle Noailly (Graduate Institute, Vrije Universiteit Amsterdam, Tinbergen Institute) a réalisé des études de fond concernant la recherche sur les technologies à faibles émissions de carbone et Manuel Trajtenberg (Université de Tel-Aviv), sur les technologies numériques généralistes.

L'équipe a également bénéficié de relectures et de commentaires de personnalités externes. Richard R. Nelson (Université de Columbia) a formulé des observations et des commentaires sur les différents chapitres du rapport.

Les études de fond ont également été passées en revue par Suma Athreye (University of Essex), Dominique Foray (École polytechnique fédérale de Lausanne), Lisa L. Ouellette (Faculté de droit de Stanford), Can Huang (Zhejiang University), Andrea Sommariva (Bocconi School of Management) et Valeria Costantini (Université Tre de Rome).

Plusieurs spécialistes ont fourni des contributions et des commentaires précieux lors de l'élaboration du rapport, notamment Alica Daly (OMPI), Ernest Miguez (Université de Bordeaux), Giovanni Napolitano (OMPI) et Anja von der Ropp (OMPI).

Samiah Do Carmo Figueiredo, Jovana Stojanović et Judith Davila Monzon ont pour leur part apporté un appui administratif précieux.

Le personnel du Centre de connaissances de l'OMPI a apporté un soutien précieux à la recherche tout au long de l'élaboration du rapport.

Enfin, nous adressons nos remerciements aux collègues de la Section de l'édition et de la conception qui ont supervisé la production du rapport.

## Résumé

Ce que les économistes définissent comme la “trajectoire de l’innovation” – le thème du présent rapport – est la combinaison ou la somme de toutes les décisions que prennent des individus, des entreprises, des universités et des gouvernements au sujet des possibilités technologiques à exploiter à un moment donné.

Il ne s’agit pas seulement de savoir combien les pays investissent dans les nouvelles idées. L’affectation de ressources humaines et financières à diverses activités d’innovation peut déterminer la trajectoire de l’innovation des communautés et des pays, voire du monde, pour les prochaines décennies.

La trajectoire à court terme de l'innovation et ses effets sont relativement simples à anticiper et à coordonner. Par exemple, pour faire face à la pandémie de COVID-19, les gouvernements et les entreprises ont réussi à réorienter l'investissement consenti dans l'innovation vers la recherche, l'homologation et la production de masse de vaccins, et ont atteint leur objectif en un temps record. Les vaccins ont permis de réduire considérablement le nombre de décès et ont aidé l'économie mondiale à se remettre du marasme provoqué par la pandémie de 2020.

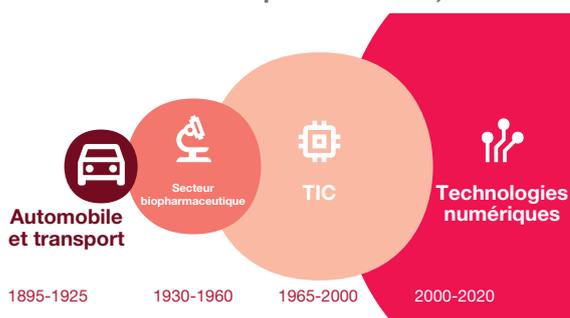
Les effets à long terme de l'innovation – tant du point de vue du rendement ou des bénéfices pour les entreprises, que de celui des avantages, ou de l'absence d'avantages, pour la société – sont moins prévisibles. Par exemple, il est difficile de prévoir lesquelles des innovations technologiques limitant le changement climatique s'avéreront les plus efficaces.

### L'innovation a connu une croissance exponentielle au cours des 100 dernières années, avec des catalyseurs technologiques très différents.

Au siècle dernier, les décisions en matière d'innovation se sont traduites par des variations au niveau des trajectoires suivies. Les technologies liées aux moteurs à combustion, aux transports et autres machines de type mécanique ont dominé la cartographie de l'innovation durant les premières décennies du siècle dernier. Les technologies biopharmaceutiques ont connu un essor considérable grâce aux médicaments dans les années 1930, et aux biotechnologies depuis les années 1990. Et dans les dernières décennies du XX<sup>e</sup> siècle, on a assisté à une forte évolution vers les technologies de l'information et de la communication (TIC) et les semi-conducteurs, qui ont représenté un quart de l'ensemble des brevets au cours des années comprises entre 1990 et 2010. Cette augmentation de la part des TIC dans les brevets s'est faite principalement au détriment des technologies "traditionnelles" du génie mécanique.

### Diverses technologies ont stimulé la croissance de l'innovation au cours des 100 dernières années.

Figure 1 Domaines technologiques en forte croissance dans les dépôts de brevets, 1895-2020



### Aujourd'hui, l'innovation se trouve à un carrefour où de nouvelles technologies prometteuses sont en plein essor.

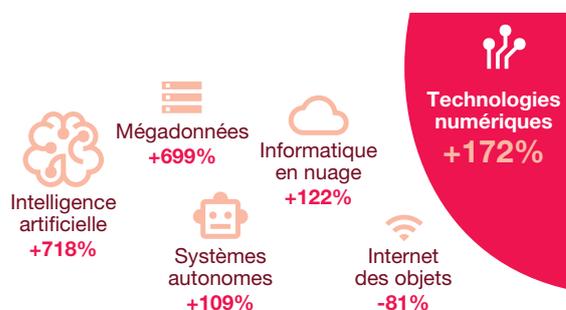
Alors que nous entrons dans la troisième décennie du XXI<sup>e</sup> siècle, des forces nouvelles et puissantes déterminent la trajectoire de l'innovation dans des domaines comme la science, la technologie et la médecine.

La numérisation change le monde. La nouvelle vague de technologies numériques englobe l'intelligence artificielle, les technologies prédictives, une automatisation extrêmement poussée et les mégadonnées. Les technologies numériques généralistes transforment les industries en y apportant de nouveaux innovateurs et des structures, des pratiques et des valeurs nouvelles. Ces technologies donnent naissance à de nouvelles industries, comme l'Internet des objets.

La numérisation a le potentiel de stimuler la croissance économique, mais risque d'exacerber les inégalités. L'intelligence artificielle, l'automatisation et d'autres technologies numériques généralistes peuvent stimuler la croissance économique lorsqu'elles génèrent des innovations qui complètent et améliorent la productivité humaine. Cependant, elles risquent d'aggraver les inégalités économiques lorsque l'innovation se limite à remplacer la main-d'œuvre. Elles rendront certains métiers obsolètes et en feront naître d'autres qui nécessiteront une palette de compétences différentes. Si elles peuvent créer des possibilités de sauter des étapes pour certains pays parmi les moins avancés, d'autres pourraient ne pas en profiter en raison d'un manque d'investissements et de l'absence de la main-d'œuvre hautement qualifiée nécessaire.

### L'innovation liée au numérique a augmenté 172% plus vite que l'ensemble des brevets au cours des cinq dernières années.

Figure 2 Croissance des technologies en pourcentage de la croissance moyenne du nombre total de brevets, 2016-2020



Le succès du vaccin contre la COVID-19 est un modèle d'innovation à suivre. La pandémie de COVID-19 a créé et, en partie, accéléré la demande de nouvelles

technologies pour lutter contre le virus. La crise de la COVID-19 a incité tous les acteurs de l'écosystème de l'innovation – gouvernements, secteur privé, centres de recherche et universités, communautés internationales, organisations non gouvernementales (ONG), y compris les fondations philanthropiques – à trouver des solutions dans l'urgence.

L'ampleur de la pandémie et le fait qu'elle a frappé une grande partie de la population mondiale ont grandement inspiré le secteur privé. En outre, les pouvoirs publics de plusieurs pays ont apporté une aide financière significative au secteur privé, notamment pour les essais cliniques et les concepteurs de vaccins présentant des candidats vaccins prometteurs, en vue de mettre en place une capacité de fabrication à grande échelle.

Enfin, les efforts déployés dans l'urgence par les organismes publics nationaux et internationaux concernés aux fins d'approbation et de coordination ont permis un déploiement plus rapide des vaccins dans le monde entier.

La collaboration fructueuse entre les secteurs public et privé pour rechercher et mettre au point rapidement des candidats vaccins contre la COVID-19 illustre la manière dont les politiques peuvent servir à réorienter l'effort d'innovation vers un objectif commun.

La mise au point du vaccin contre la COVID-19 a eu des répercussions sur la recherche médicale et la pratique de la médecine. Le succès de la plateforme des vaccins à ARN messager contre la COVID-19 a apporté la preuve que cette technologie fonctionne et pourrait être appliquée à d'autres maladies. Cela pourrait également marquer le début d'un nouvel âge d'or pour la mise au point de vaccins, semblable à celui de la Seconde Guerre mondiale.

La crise de la COVID-19 a également modifié la pratique de la médecine en accélérant l'adoption des technologies numériques. De nombreux changements étaient déjà en cours, mais la pandémie a souligné l'urgence de "passer au numérique" et a créé des possibilités d'améliorations sur le plan opérationnel, notamment les consultations médicales virtuelles.

Cela étant, le déploiement rapide des vaccins contre la COVID-19 et l'adoption à grande échelle des outils biotechnologiques sous-jacents ne sont pas exempts de difficultés sur le court terme. La création et le déploiement des vaccins utilisant la nouvelle technologie requièrent une main-d'œuvre hautement qualifiée et des laboratoires de recherche dotés de matériel de pointe. De plus, la rapidité du développement du vaccin contre la COVID-19 et des essais médicaux a eu pour conséquence de retarder l'homologation d'autres médicaments. Enfin, l'accent mis sur les vaccins et les traitements contre la pandémie de COVID-19 pourrait nuire à d'autres axes de la recherche médicale pendant un certain temps.

## Les exigences des sociétés en matière d'innovation peuvent changer en un clin d'œil, surtout lorsqu'elles sont confrontées à des crises.

Parfois, des changements systémiques importants et inattendus – tels que de nouvelles technologies de pointe, des crises épidémiologiques ou des guerres – bouleversent les préférences et les priorités des acteurs des écosystèmes concernés. Il est généralement demandé aux gouvernements et aux décideurs d'intervenir face à un choc susceptible de modifier les priorités.

Par exemple, suite à la Seconde Guerre mondiale, le Gouvernement des États-Unis d'Amérique a mobilisé la science civile pour répondre aux besoins induits par la guerre en créant et finançant des organismes de recherche publics, comme le National Institute of Health. Plus de 70 ans plus tard, un grand nombre d'innovations médicales mises au point pendant cette période sont utilisées de manière habituelle dans la pratique hospitalière.

La Seconde Guerre mondiale a créé une demande en faveur de nouvelles solutions technologiques à des problèmes tels que le traitement des soldats blessés et la réduction du taux de mortalité. Pendant la guerre, le Gouvernement des États-Unis d'Amérique a alloué des sommes importantes à la recherche-développement, à savoir près de 100 fois ce qu'il investissait dans la science les années précédentes. Cette augmentation concrète de l'effort public a aidé et appuyé la production de masse de pénicilline, la mise au point de succédanés du sang et la création et la production de vaccins, ainsi que la recherche sur les hormones et de nombreuses autres avancées médicales. Elle a ouvert de nouvelles voies à la recherche et au progrès de la médecine, qui ont été explorées pendant de nombreuses années. Les recherches sur la pénicilline ont contribué à la mise au point d'antibiotiques par les entreprises pharmaceutiques dans les décennies qui ont suivi la guerre.

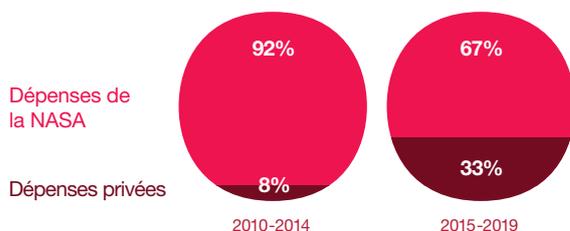
De même, la guerre froide a entraîné une expansion de la recherche-développement financée par le gouvernement fédéral américain dans de nouveaux domaines, comme la mission sur la Lune. En 1957, l'Union soviétique est devenue le premier pays à lancer un satellite en orbite terrestre basse. Les États-Unis d'Amérique ont riposté en 1961 avec un programme destiné à envoyer un homme sur la Lune avant la fin de la décennie en cours. Un grand engagement politique, un budget important et les capacités techniques de la communauté des scientifiques et des ingénieurs ont permis d'atteindre cet objectif en octobre 1969.

À la fin du XX<sup>e</sup> siècle, le financement par le gouvernement fédéral de la recherche-développement "axée

sur une mission”, dans le cadre des programmes spatiaux, a donné naissance à des technologies de télécommunications satellitaires et a, à terme, motivé la participation d'intérêts commerciaux aux activités spatiales. Les pays les plus industrialisés dépendent de plus en plus des systèmes spatiaux pour la technologie de l'information, l'imagerie de télédétection, les données de positionnement, de navigation et de synchronisation, et d'autres applications. Une nouvelle course à l'espace entre les États-Unis d'Amérique et la Chine pourrait donner naissance à des technologies innovantes – et imprévisibles – dans les décennies à venir.

### Innovation spatiale : le financement public a favorisé le progrès technologique et l'émergence de nouvelles industries.

Figure 3 Financement du secteur spatial par la NASA et les investisseurs privés américains, 2010-2019



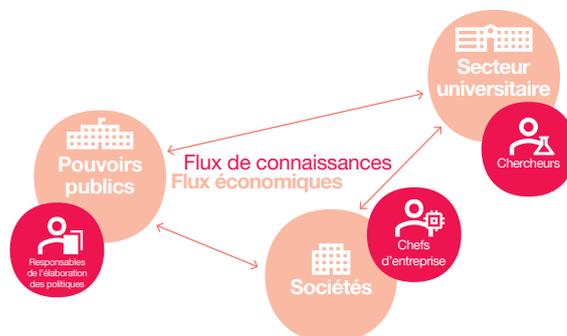
### La trajectoire de l'innovation ne se décide pas seule; elle est la somme d'une multitude de décisions prises par des entrepreneurs, des chercheurs, des consommateurs et des décideurs politiques.

La trajectoire de l'innovation évolue constamment. Elle est influencée par les choix et les interactions des acteurs publics et privés souhaitant tirer profit de l'innovation. C'est cet écosystème de l'innovation qui détermine la trajectoire de l'innovation. La curiosité amène les chercheurs à explorer de nouveaux domaines scientifiques et les ingénieurs à expérimenter de nouvelles technologies. Les sociétés, les entrepreneurs et les gouvernements recensent les possibilités d'innovation en s'appuyant sur des prévisions concernant le dividende privé et le dividende social potentiels.

Les acteurs privés saisissent plus rapidement une possibilité d'innovation lorsque les dividendes escomptés sont à la fois prévisibles et faciles à monnayer. Ils sont également attirés par les projets d'innovation sur le court terme, où les risques d'échec sont moindres. Cela dit, les possibilités d'innovation à plus long terme, pour lesquelles le risque est plus élevé, procurent souvent les plus gros dividendes sociaux.

### Les écosystèmes d'innovation définissent la trajectoire de l'innovation pour les décennies à venir.

Figure 4 Résumé du concept d'interactions entre les acteurs de l'écosystème de l'innovation



Les pouvoirs publics doivent promouvoir les dividendes sociaux et privés de l'innovation. Ils s'y attellent souvent en centralisant les activités et les ressources consacrées aux innovations d'intérêt général, c'est-à-dire aux produits ou services mis gratuitement à la disposition de tous, notamment pour la défense nationale ou la prévention des pandémies. Ils peuvent également être la principale source de demande en faveur des technologies innovantes. Les pouvoirs publics élaboreront des politiques visant à influencer la fourniture de biens publics dans les domaines de la santé, de la sécurité ou de l'enseignement.

La trajectoire de l'innovation est en grande partie fixée par les connaissances acquises par les secteurs grâce à l'expérience pratique ou aux chaînes d'approvisionnement. Les flux de savoirs et d'innovation entre domaines et secteurs incitent fortement les scientifiques, ingénieurs et entrepreneurs à embrasser de nouveaux domaines ou secteurs en appliquant les technologies qu'ils maîtrisent déjà, en réaffectant des ressources et en influant en définitive sur la trajectoire de l'innovation.

### Les motivations des secteurs public et privé en matière d'innovation ne sont pas nécessairement similaires, mais elles peuvent être optimisées pour le bien commun.

Les dividendes sociaux et privés des technologies orientent l'innovation. Les innovations peuvent avoir un effet de transformation – pour le meilleur ou pour le pire – sur l'environnement, la santé publique, les communautés locales ou certaines données démographiques, pour ne citer que quelques exemples. Ce sont les dividendes sociaux de l'innovation. Si une technologie est respectueuse de l'environnement, elle apportera des avantages socioéconomiques à l'ensemble de la communauté; inversement, une nouvelle technologie

moins chère mais plus polluante peut avoir un impact socioéconomique négatif.

Le dividende social de l'innovation peut être très différent du dividende privé obtenu par les innovateurs à vocation commerciale, comme le montre la mise au point des vaccins contre la COVID-19. Selon nos recherches, l'avantage social de l'innovation vaccinale se chiffre à 70,5 billions de dollars É.-U. dans le monde, soit 887 fois l'avantage privé. Cet important bénéfice social représente la valeur des vies sauvées, des problèmes de santé évités et de la levée des mesures de confinement, qui dépasse de loin les revenus générés par les fabricants de vaccins.

### L'innovation publique-privée est essentielle pour servir le bien commun.

Figure 5 Estimations de l'avantage social et privé de la mise au point du vaccin contre la COVID-19



### Les besoins en matière d'innovation diffèrent à travers le monde.

La capacité des pays en développement de produire ou d'absorber des solutions technologiques qui leur permettent de répondre à leurs besoins socioéconomiques propres dépend de leurs écosystèmes d'innovation locaux et de la mesure dans laquelle ceux-ci sont connectés aux réseaux d'innovation mondiaux.

Dans certains cas, dans les pays appartenant généralement à la catégorie des pays à revenu intermédiaire, les écosystèmes d'innovation peuvent débloquer des capacités d'innovation sans précédent en tirant parti de leurs capacités scientifiques, de leur capital technologique et de leur main-d'œuvre qualifiée pour combler l'écart technologique entre eux et les pays les plus avancés.

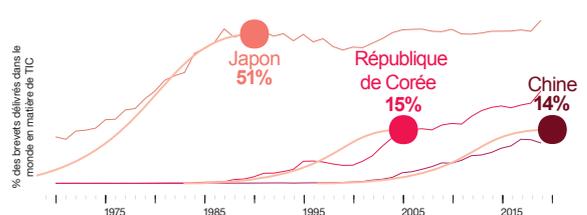
Dans le cas du secteur de l'informatique en Asie de l'Est, par exemple, le Japon, la République de Corée et la Chine ont réussi à s'intégrer pleinement à l'économie mondiale et à devenir des participants essentiels et actifs des chaînes de valeur mondiales. Leurs politiques industrielles respectives ont facilité leur passage à l'informatique de pointe en quelques décennies seulement. Les années 1980 ont vu les populations

des pays d'Asie de l'Est se positionner sur les marchés des ordinateurs personnels, des magnétoscopes, des lecteurs de cassettes audio et du matériel de télécommunication. Ont suivi, dans les années 1990, les puces à mémoire et les téléphones cellulaires sans fil, et, dans les années 2000, divers produits numériques, parmi lesquels les télévisions numériques, les systèmes de télécommunication sans fil et les smartphones.

Le développement de tous les pays d'Asie de l'Est présente des éléments communs. Il s'agit notamment du rattrapage économique, du progrès technologique rapide des entreprises et branches d'activité privées, et des mesures adoptées par les pouvoirs publics pour réduire les risques que peuvent courir les entreprises qui se lancent dans de nouvelles branches d'activité.

### Les nouvelles possibilités technologiques peuvent stimuler le développement économique

Figure 6 Part des technologies de l'information et de la communication brevetées dans le monde, certains pays d'Asie de l'Est, 1950-2020



Dans d'autres cas, les acteurs du marché et autres acteurs peuvent disposer en interne d'une capacité locale d'innovation insuffisante pour recenser, assimiler et exploiter les nouvelles technologies mises au point ailleurs ou produire les innovations eux-mêmes. En raison de leur faible pouvoir d'achat, ils peuvent avoir du mal à accéder aux innovations mondiales pour répondre à leurs besoins. Les infrastructures de base, telles que les routes, l'électricité ou les soins médicaux, et d'importantes institutions comme un secteur financier efficace peuvent laisser à désirer ou être inexistantes, rendant certaines technologies étrangères moins bien adaptées à leurs besoins. L'innovation peut alors devoir impliquer un faible niveau de qualification et une échelle généralement petite, et cibler certaines communautés ou régions.

Dans tous les cas, les besoins du pays sont prioritaires, car l'innovation se produit différemment selon les régions du monde. L'innovation importée de l'étranger doit être utilisable dans le pays importateur. Le bond en avant ne peut se faire que si l'on en tient compte. Plus important encore, l'innovation ne doit pas nécessairement être à la pointe du progrès pour être socialement utile.

## Les technologies permettant de relever les grands défis, tels que le changement climatique, font cruellement défaut.

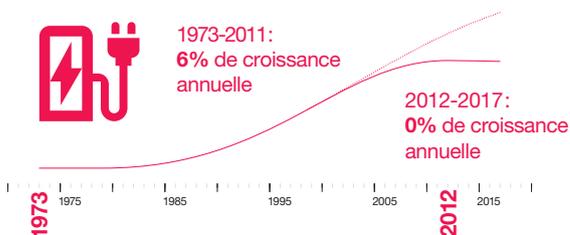
La future trajectoire de l'innovation dépendra des politiques internationales et multilatérales visant à relever les "grands défis", tels que l'accès à l'éducation et à la santé et l'atténuation du changement climatique.

La collaboration fructueuse entre les secteurs public et privé dans la mise au point rapide de candidats vaccins contre la COVID-19 montre dans quelle mesure les politiques axées sur une mission peuvent être sources de changements importants. À l'instar des efforts déployés en temps de guerre dans les années 1940, ces collaborations se sont appuyées sur la science et les technologies existantes, prouvant leur efficacité et garantissant la production et le déploiement rapides et à grande échelle des vaccins.

Les politiques "axées sur une mission" peuvent-elles servir à remédier aux problèmes sociaux, environnementaux et économiques complexes auxquels le monde doit faire face? Les politiques fondées sur la centralisation des prises de décisions et la concentration des ressources sur la réalisation d'un seul objectif ont été très utiles dans le cas du programme d'alunissage de l'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) ou de la mise au point du vaccin contre la COVID-19. Mais même les politiques axées sur une mission peuvent ne pas être suffisantes. Certains observateurs considèrent que les politiques des pouvoirs publics ne sont qu'un élément de la solution, qui nécessitera également les efforts de tous les acteurs de l'écosystème de l'innovation, y compris les consommateurs.

## Les technologies propres ont connu un essor après la crise du pétrole, mais cela pourrait ne pas suffire...

Figure 7 Croissance des technologies mondiales liées à l'environnement, 1973-2017



Un engagement plus soutenu en faveur du développement durable aux niveaux public, privé et au niveau des consommateurs modifie la manière dont les entreprises mènent leurs activités, avec notamment le passage aux énergies renouvelables ou l'adoption de technologies

d'atténuation du changement climatique pour réduire leur empreinte carbone. En ayant recours à des subventions, des réglementations et des normes pour promouvoir les technologies respectueuses de l'environnement, les gouvernements contribuent à atténuer certains des risques et des incertitudes associés à l'investissement dans des technologies nouvelles et relativement peu éprouvées dans le domaine énergétique.

L'innovation dans les technologies à faible émission de carbone, en particulier dans le secteur de l'énergie, s'est développée au cours des deux premières décennies du XXI<sup>e</sup> siècle et s'est accompagnée d'une forte augmentation des demandes de brevet correspondantes. Une hausse a également été observée dans les technologies habilitantes, telles que les batteries, l'hydrogène et les réseaux intelligents.

Toutefois, les technologies se trouvant à un stade de développement précoce – recherche fondamentale ou appliquée – ont tendance à être plus risquées et peuvent donc nécessiter un financement public afin d'atténuer ces risques. Les technologies d'élimination du carbone, par exemple, sont coûteuses à mettre en place et à entretenir.

En outre, la perception des risques liés au réchauffement climatique change progressivement. L'incitation des acteurs privés à investir dans la mise au point de technologies propres repose sur la demande prévue.

## La politique peut-elle contribuer à orienter la trajectoire de l'innovation ?

Les politiques publiques peuvent influencer la trajectoire de l'innovation de plusieurs manières :

Les politiques favorisant la découverte scientifique et technologique sont le plus nécessaires lorsque l'incertitude en matière d'innovation et le risque associé sont maximaux. Par exemple, les gouvernements procèdent régulièrement à des achats directs pour contribuer à la mise au point de technologies de défense et aérospatiales.

Les politiques d'atténuation des risques sont probablement le plus efficaces dans les premières phases de la mise au point, après la découverte initiale. Les subventions pour la recherche-développement, les prêts à des conditions avantageuses et les mesures d'incitation fiscale en faveur de la recherche-développement sont des instruments classiques d'atténuation des risques.

Les politiques d'adoption rapide visent non seulement à réduire le risque lié à l'innovation, mais aussi à accroître le nombre d'entreprises utilisant une technologie donnée. Les pouvoirs publics peuvent intervenir pour doper la production d'une

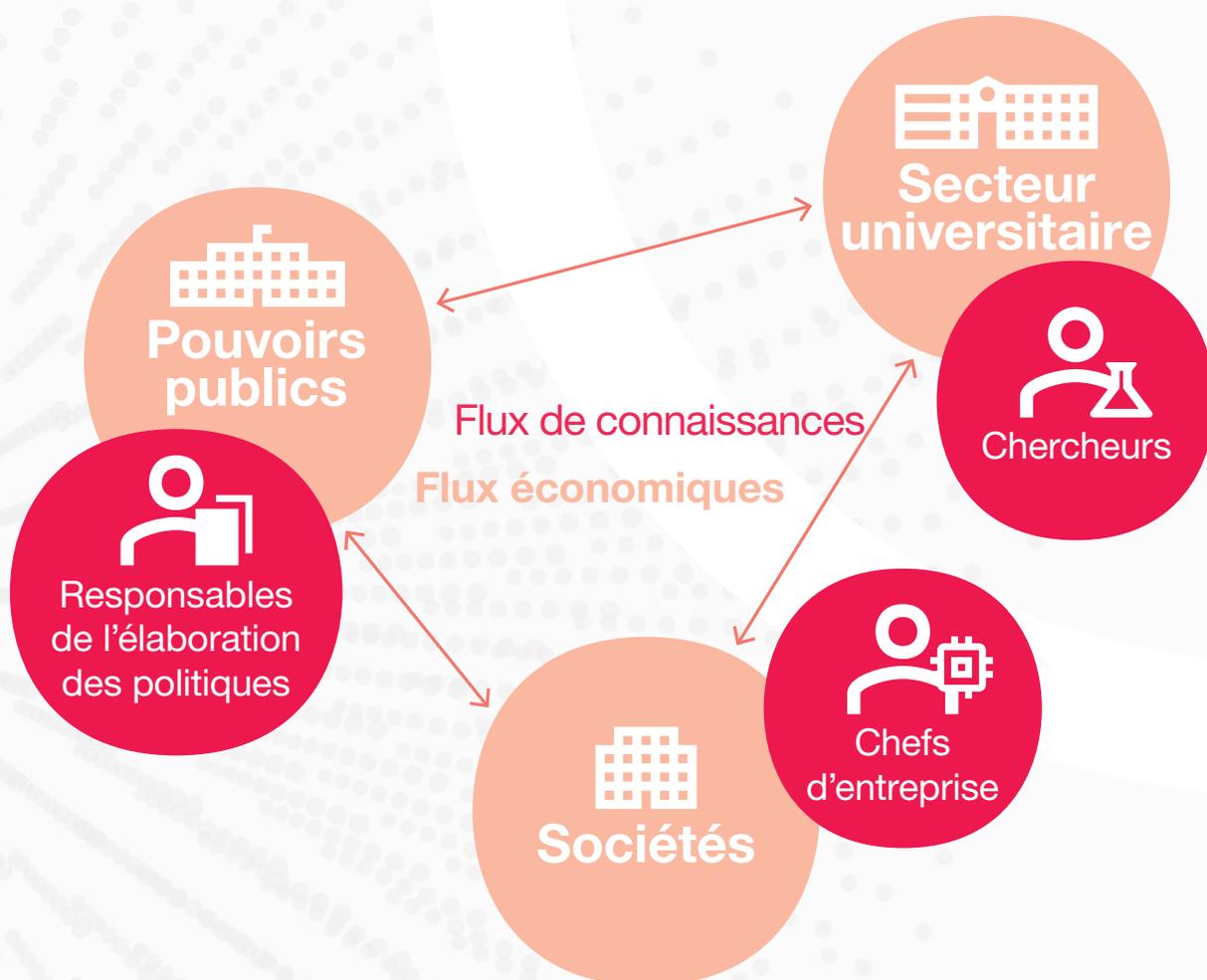
technologie donnée et, ce faisant, lui permettre d'atteindre une échelle suffisante pour que cette dernière soit rentable.

Les pouvoirs publics peuvent également réduire le risque ou encourager l'adoption de manière indirecte, en stimulant la consommation de produits et services incorporant une innovation souhaitée. Ils peuvent accorder des subventions aux producteurs pour contenir la hausse des prix, ou aux consommateurs pour les encourager à acheter. Ils peuvent influencer l'acceptation au moyen de programmes d'enseignement financés par des fonds publics, afin de réduire les coûts, d'accroître la disponibilité d'une main-d'œuvre qualifiée et de promouvoir l'initiative privée dans certains domaines.

La réglementation des technologies numériques – y compris la manière dont l'accès aux données est régi – joue un rôle important dans le maintien d'un marché concurrentiel qui encourage et récompense l'innovation. Les technologies numériques évoluant à un rythme rapide, de nombreux gouvernements dans le monde envisagent actuellement d'adapter leur réglementation en conséquence.

Les grands défis du monde actuel – lutte contre le changement climatique, réduction des inégalités, sécurité alimentaire, prévention des pandémies – sont des biens publics, et il est peu probable que le secteur privé puisse à lui seul allouer suffisamment de ressources d'innovation pour les résoudre. Le défi relatif au changement climatique ne saurait non plus être relevé par les secteurs privé et public d'un seul pays. Ce n'est qu'au travers d'un effort multipartite et coordonné au niveau international que nous serons en mesure de répondre à ces défis mondiaux.

# Les écosystèmes d'innovation définissent la trajectoire de l'innovation



# Quelle est la trajectoire de l'innovation ?

**Depuis que l'ingénieur écossais James Watt (1736–1819) a construit la première machine à vapeur exploitable il y a plus de 250 ans, lançant ainsi concrètement la première révolution industrielle, les progrès technologiques rapides ont été le moteur d'une croissance économique toujours plus étendue, au profit des pays et des acteurs économiques du monde entier. Aujourd'hui, le monde se trouve à l'aube d'une nouvelle révolution industrielle – la quatrième – fondée sur les technologies numériques, telles que la robotique, l'intelligence artificielle et les mégadonnées.**

Le montant et le rythme des investissements que font les pays, les industries et les entreprises dans la transformation des ressources de recherche-développement, à la fois humaines et financières, en nouvelles technologies détermineront en grande partie la croissance économique future, les niveaux de vie et le bien-être global dans le monde.

Cependant, toutes les décisions en matière d'innovation – au sens de la commercialisation de nouveaux produits et procédés – ne sont pas simples à prendre. En effet, les technologies existantes sont toujours en concurrence avec de nouvelles technologies prometteuses pour ce qui est des retours sur investissement potentiels. La machine à vapeur, l'électricité et l'Internet avaient tous des alternatives viables qui auraient pu les remplacer ou empêcher leur développement. Dans les années 1800, le moteur thermique "Stirling" était considéré comme une technologie concurrente sérieuse de la machine à vapeur, mais moins bien adapté aux matières premières disponibles et aux besoins industriels de l'époque. Au début du XX<sup>e</sup> siècle, l'éclairage urbain fonctionnait principalement au gaz. Ce n'est que lorsque l'électricité s'est généralisée dans les années qui ont suivi que les villes ont commencé à remplacer les réverbères à gaz par un éclairage électrique plus sûr, moins onéreux et plus puissant. Dans les années 1980, une décennie avant l'essor des courriers électroniques et de l'Internet, un service interactif de contenus en ligne dénommé Minitel était déjà largement utilisé en France pour communiquer ou acheter des produits via un écran, un clavier et un modem relié à un réseau téléphonique. L'ironie veut que l'engagement dans ce qui était alors une technologie révolutionnaire, mais qui s'est finalement avéré être une impasse, était tel qu'il a ralenti l'adoption de l'Internet en France par rapport aux économies voisines qui n'avaient pas mis au point de système innovant similaire.

Décider quelle voie technologique emprunter n'est donc pas chose facile. Si les opportunités technologiques peuvent être à tout moment abondantes, les ressources économiques à investir dans l'innovation ne le sont pas. Le nombre de personnes talentueuses – ingénieurs, scientifiques ou entrepreneurs – et les ressources financières qui peuvent être affectés aux activités d'innovation sont limités. Pour obtenir les meilleurs retours sur investissement en matière de recherche-développement, les sociétés privées et les entrepreneurs pèsent toujours les perspectives technologiques de telle ou telle technologie et les préférences des consommateurs avant de prendre des décisions en matière d'innovation. Par exemple, les voitures à essence et les voitures électriques ont coexisté au début du XX<sup>e</sup> siècle; cependant, il n'existait guère d'infrastructure de réseau électrique en dehors des zones urbaines, tandis que l'infrastructure nécessaire pour les voitures à essence était moins coûteuse à développer. Aussi les consommateurs préféraient-ils l'autonomie offerte par les voitures à essence.

Plus une décision en matière d'innovation est couronnée de succès, plus elle peut être révolutionnaire – ou "perturbatrice": les téléphones portables, par exemple, ont transformé le marché de la téléphonie. De nouvelles entreprises et secteurs se créent pour produire des innovations couronnées de succès, remplaçant les producteurs d'innovations moins heureuses. Les gouvernements et les décideurs doivent essayer de choisir les gagnantes lorsqu'ils décident comment utiliser au mieux l'argent des contribuables et concevoir des politiques favorisant l'innovation.

Ce que les économistes appellent la "trajectoire de l'innovation" – le thème du dernier *Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde* – est la combinaison ou la somme de toutes les décisions des particuliers, des

# Ce que les économistes appellent la “trajectoire de l’innovation” est la combinaison ou la somme de toutes les décisions prises par les particuliers, les entreprises, les universités et les gouvernements concernant les opportunités technologiques à saisir.

entreprises, des universités et des gouvernements quant aux opportunités technologiques à saisir. Les implications à court terme de la trajectoire de l’innovation sont relativement faciles à anticiper et à coordonner. Pour répondre à la pandémie de COVID-19, les gouvernements et les entreprises ont réorienté avec succès les investissements faits dans l’innovation vers la recherche, l’homologation et la production massive de vaccins (voir le chapitre 3), atteignant l’objectif fixé dans un temps record. Les vaccins ont considérablement réduit le nombre de décès dus à la maladie et ont permis à l’économie mondiale de rebondir après l’effondrement de 2020 provoqué par la pandémie, les entreprises privées impliquées dans la production des vaccins réalisant des bénéfices considérables.

En revanche, les retombées économiques à long terme de la trajectoire de l’innovation sont bien moins prévisibles et plus difficiles à coordonner. Il est difficile, par exemple, de prévoir quels seront les effets de la COVID-19 à plus long terme. De même, les efforts actuellement déployés visant à produire des technologies “propres” pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub>,

le gaz à effet de serre le plus répandu, ont donné à ce jour des résultats incertains. Il est difficile de dire si les ressources allouées sont insuffisantes ou si les voies technologiques explorées sont suffisamment complémentaires pour apporter une réponse efficace à la crise du réchauffement climatique (voir le chapitre 3). Les choix technologiques peuvent ouvrir la voie à des opportunités commerciales imprévisibles, parfois très éloignées dans le futur. Comme l’illustre le chapitre 2, les panneaux solaires ont initialement été déployés dans le cadre du programme spatial américain à la fin des années 1950, mais il a fallu de nombreuses années avant que leur exploitation commerciale ne décolle.

En outre, la question se pose de savoir non seulement combien investir, mais également comment répartir cet investissement entre les différentes options technologiques. L’affectation de ressources humaines et financières à diverses activités d’innovation peut déterminer la trajectoire de l’innovation des communautés et des pays, voire du monde, pour les prochaines décennies.

Quel est le rôle de la politique gouvernementale dans l’orientation de la trajectoire de l’Innovation ? À bien des égards, les gouvernements nationaux tentent déjà d’orienter l’innovation par le financement de l’éducation supérieure et des activités liées à la recherche. La plupart des économies disposent d’établissements d’enseignement comme les universités et autres établissements d’enseignement supérieur qui gèrent des formations et des programmes de recherche financés par des fonds publics. Ces programmes s’inscrivent dans des politiques à long terme visant à répondre aux incertitudes et aux larges perspectives de la science fondamentale. Les gouvernements financent également les programmes scientifiques et technologiques axés sur des missions, comme l’Administration nationale de l’aéronautique et de l’espace (NASA) aux États-Unis d’Amérique ou l’Agence spatiale européenne, qui font souvent appel à des développements technologiques du secteur privé.

Les politiques menées par les gouvernements et les décisions en matière d’innovation prises par les sociétés privées coexistent dans un écosystème d’innovation complexe qui comprend, entre autres, des particuliers – tels que des scientifiques – des organismes gouvernementaux et des entreprises multinationales. Le gouvernement et les entreprises privées peuvent se compléter ou se faire concurrence pour les ressources limitées allouées à l’innovation. Dans un cas comme dans l’autre, ils s’influencent mutuellement en permanence. Ainsi, c’est la demande gouvernementale qui a par exemple donné naissance au programme spatial américain, à la NASA et à l’industrie aérospatiale américaine (voir le chapitre 2). Comprendre les écosystèmes de l’innovation est essentiel pour concevoir des politiques d’innovation qui allouent efficacement les ressources afin d’induire et d’orienter l’innovation vers des besoins concrets du monde.

Les découvertes scientifiques d'hier contribuent à la création des innovations de demain. C'est la recherche fondamentale menée au fil des ans et les progrès accomplis dans la biologie et la génétique qui ont permis de mettre au point des vaccins contre la COVID-19 si rapidement (voir le chapitre 3). Les choix des gouvernements et des consommateurs privés éclairent les ingénieurs et les entrepreneurs sur les nouveaux produits à développer.

Aujourd'hui, plusieurs technologies sont sur le point d'engendrer de grandes transformations : les énergies renouvelables, la modification des gènes et les nanotechnologies, par exemple. Une nouvelle révolution industrielle fondée sur les technologies numériques provoque déjà de profonds changements dans l'économie mondiale, remodelant les chaînes de valeur (approvisionnement) internationales et locales et redéfinissant le rôle de la main-d'œuvre dans les industries de services. Certaines industries seront amenées à briller, d'autres à se ternir.

Ces nouvelles technologies numériques peuvent aider à relever les "grands défis" mondiaux tels que le réchauffement de la planète et les futures pandémies (voir le chapitre 3). Mais comment les décideurs peuvent-ils garantir que l'innovation nécessaire continue à voir le jour ? Comment peuvent-ils encourager une innovation dans des domaines qui améliorent le bien-être social comme des technologies durables et socialement responsables ?

Le présent rapport a pour objet d'engager la réflexion sur ces thèmes cruciaux. Le chapitre 1 examine les principaux éléments conceptuels qui régissent la trajectoire de l'innovation, en présentant les forces économiques en jeu et en replaçant la trajectoire de l'innovation dans le contexte des écosystèmes de l'innovation. Le chapitre 2 examine ces concepts à la lumière de trois études de cas historiques : l'innovation durant la Seconde Guerre mondiale, la formation d'une industrie spatiale et l'essor de l'industrie de l'information et des technologies en Asie. Le chapitre 3 se penche sur ce que l'innovation peut faire pour relever trois grands défis spécifiques : créer des technologies propres pour endiguer le réchauffement climatique, mettre en pratique les enseignements tirés de la crise de la COVID-19 et surfer sur la vague des nouvelles technologies numériques perturbatrices.

# Technologies

à l'origine de la croissance de l'innovation

Automobile  
et transport



1895-1925



Secteur  
biopharma-  
ceutique

1930-1960



TIC

1965-2000



Technologies  
numériques

2000-2020

# La trajectoire de l'innovation

**Qu'entend-on par trajectoire de l'innovation? C'est la somme, à un moment quelconque, des décisions que prennent des individus, des entreprises, des universités et des gouvernements – dans quelque secteur d'activité que ce soit – au sujet des orientations à suivre en matière d'innovation. Même si les possibilités technologiques et scientifiques d'innovation peuvent ne pas manquer, les ressources – tant financières qu'humaines – nécessaires pour investir dans l'innovation sont limitées. Certaines décisions en matière d'innovation permettent d'obtenir des résultats spectaculaires, comme cela a été récemment le cas avec les nouveaux vaccins à acide ribonucléique messager (ARNm) mis au point pour combattre le coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère (SRAS-CoV-2), dont il sera question plus loin et au chapitre 3. D'autres décisions aboutissent à une impasse.**

Les décisions prises par les individus et les entreprises en matière d'innovation sont souvent induites par la perspective d'un profit financier. Mais elles peuvent aussi avoir des incidences socioéconomiques, positives ou négatives, qui se font sentir au-delà du contexte commercial immédiat. En conséquence, les décisions peuvent aligner ou juxtaposer des attentes sociales et privées pour la trajectoire de l'innovation. Ces attentes font l'objet de la section 1.1, qui examine les concepts de dividende privé et de dividende social de l'innovation. L'écosystème complexe des interactions entre les entreprises, les universités et les gouvernements est présenté dans la section 1.2. La section 1.3 se penche sur les forces économiques qui donnent forme à la trajectoire de l'innovation. La section 1.4 expose les principaux instruments de politique générale pouvant encourager l'innovation et montre comment ils peuvent donner forme à la trajectoire de l'innovation. La section 1.5 examine la manière de susciter l'innovation dans les pays moins développés. La section 1.6 formule, en conclusion du chapitre, quelques observations générales sur la future trajectoire de l'innovation.

## 1.1 Dividendes sociaux et dividendes privés

Les entreprises et entrepreneurs privés ne cessent de prendre des décisions concernant les innovations qui, espèrent-ils, leur seront profitables. Ils déterminent si l'incorporation de nouvelles technologies dans les processus de production ou la mise au point de nouvelles technologies ou de nouveaux produits serait financièrement intéressante. Ils décident également

des possibilités technologiques à mettre en œuvre. Ainsi, par exemple, les entreprises qui mettent au point des vaccins contre la maladie à coronavirus (COVID) avaient le choix entre les technologies de vaccins traditionnelles, qui reposent sur l'utilisation d'un germe pathogène atténué ou inactivé pour mettre en place une défense, ou une nouvelle technologie ARNm (cette dernière utilise un minuscule morceau du génome du virus SARS-CoV-2 pour stimuler la production d'anticorps et développer ainsi une réponse immunitaire).

Les dividendes privés – pour l'essentiel des bénéfiques – de ces décisions représentent la différence entre les revenus que les entreprises et les entrepreneurs tirent de la commercialisation réussie d'innovations et l'ensemble des coûts de développement – y compris ceux d'éventuels échecs antérieurs. Les pouvoirs publics peuvent alléger certains des coûts à l'aide de politiques fiscales, de subventions et de prêts. Ils peuvent également assurer un revenu pour l'innovation privée en garantissant les prix. Ces politiques d'innovation sont examinées plus en détail dans la section 1.4.

Les dividendes sociaux représentent les incidences des innovations sur l'ensemble de la société, y compris sur l'économie en général et sur l'environnement, et non pas seulement sur le bilan des entreprises. Ce concept englobe l'ensemble des avantages ou bénéfices que les entreprises privées tirent de l'innovation, ainsi que les innovations scientifiques et technologiques créées dans les universités et les organismes de recherche publics. Ces dernières enrichissent l'innovation privée, notamment grâce aux entreprises naissantes et dérivées lancées par des universités.

Les innovations peuvent avoir un effet de transformation socioéconomique – pour le meilleur ou pour le pire –, par exemple sur l'environnement, la santé publique ou les communautés locales, ou encore sur des données démographiques spécifiques. Dans bien des cas, un tel effet – une composante des dividendes sociaux – n'aurait pas été pris en considération par le secteur privé au moment de se tourner vers tel ou tel domaine de l'innovation. Les économistes classent ces innovations porteuses de transformations sous la rubrique des “externalités”, car, souvent, les acteurs qui les produisent n'en avaient pas eu l'intention.

Par exemple, lorsqu'une entreprise met au point une nouvelle technologie moins onéreuse et plus productive, toutes choses par ailleurs égales, elle devrait en retirer des dividendes privés positifs sous la forme d'une augmentation de ses bénéfices, puisque la technologie en question lui a offert un avantage concurrentiel. Mais si cette technologie s'avère plus respectueuse de l'environnement, elle profitera également à l'ensemble de la collectivité sur le plan socioéconomique. Les dividendes sociaux seront d'autant plus élevés que la technologie propre sera adoptée plus rapidement par les autres entreprises et les marchés. Si, au contraire, une entreprise privée met au point une nouvelle technologie moins onéreuse et plus productive – mais plus polluante –, elle pourra elle aussi voir grossir ses bénéfices, mais les incidences socioéconomiques seront négatives.

Les acteurs privés saisissent très rapidement une possibilité d'innovation lorsque les dividendes escomptés sont à la fois prévisibles et faciles à monnayer. Ils sont souvent attirés par des projets d'innovation pour lesquels le risque d'échec est plus faible, le délai de mise au point plus court et l'échelle plus petite (plus la taille du projet est faible, plus le risque l'est généralement aussi). Les possibilités d'innovation qui s'écartent de ces paramètres risquent d'être plus difficiles à monnayer<sup>1</sup>.

Cela dit, les possibilités d'innovation pour lesquelles le risque est plus grand, les délais plus longs et l'échelle plus importante peuvent procurer les plus gros dividendes sociaux positifs. Par exemple, certaines technologies de pointe – comme la machine à vapeur, l'électricité ou l'Internet – se généralisent plus tardivement, contribuant à la réalisation d'innovations ultérieures dans des branches d'activité très diverses. Ces technologies sont dites “génériques” (voir la section 1.3). Souvent, leur diffusion n'est pas immédiate et les premiers investissements peuvent sembler problématiques, voire tout à fait risqués pendant quelque temps.

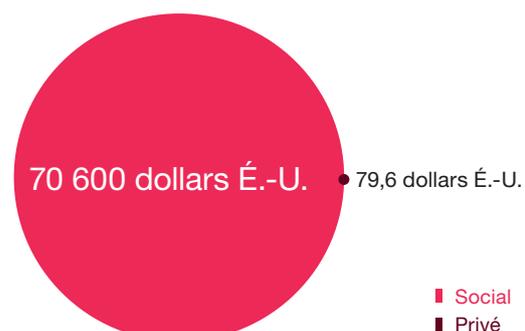
De nombreuses possibilités d'innovation se présentent lorsqu'il s'agit pour la société de relever ses plus grands défis. C'est ainsi que le réchauffement de la planète, les pandémies ou la criminalité poussent à la mise au point de technologies non polluantes, de vaccins ou de meilleurs moyens d'assurer la sécurité. L'innovation peut

favoriser le partage ou la diffusion du savoir et l'accumulation de capital humain. Les pouvoirs publics peuvent vouloir que les entreprises partagent leurs innovations avec les autres entreprises dans l'intérêt supérieur de l'économie, notamment en améliorant la formation et les compétences de la main-d'œuvre, même si cela réduit les dividendes privés de l'innovation.

Pour les pouvoirs publics, il est ardu de créer les conditions propices à la production de dividendes tant sociaux que privés. Ils s'y attellent souvent en centralisant les activités et les ressources consacrées aux innovations d'intérêt général, c'est-à-dire aux biens et services mis gratuitement à la disposition de tous, comme la défense nationale ou le savoir au niveau national. Ainsi, par exemple, ils financent la recherche et l'éducation publiques afin de renforcer l'offre de nouvelles connaissances scientifiques et de les diffuser plus largement. D'autre part, les gouvernements sont la principale source de demande de technologies innovantes dans certains domaines d'activité stratégiques tels que la défense ou la santé<sup>2</sup>. On en a un exemple clair et récent avec plusieurs initiatives gouvernementales – comme l'Operation Warp Speed aux États-Unis d'Amérique – qui ont facilité et accéléré la mise au point, la fabrication et la distribution de vaccins, de traitements et de diagnostics dans le cadre de la COVID-19 (voir le chapitre 3, encadré 3.1).

### L'avantage social des vaccins contre la COVID-19 est supérieur à leur avantage privé

Figure 1.1 Estimation de l'avantage social et privé en milliards de dollars É.-U.



Source: Basé sur des estimations dans Fink (2022).

La trajectoire de l'innovation évolue constamment en raison des choix des acteurs publics et privés qui cherchent à optimiser les dividendes privés et sociaux des innovations apportées dans différents domaines et secteurs d'activité, et du fait des interactions entre ces acteurs. La section suivante examine la manière dont ces derniers interagissent dans un écosystème complexe lorsqu'ils définissent la trajectoire de l'innovation.

**Encadré 1.1****Les avantages sociaux et privés de la mise au point de vaccins contre la COVID-19**

En raison de l'échelle mondiale de la pandémie de COVID-19 et de ses effets économiques de grande portée, les dividendes privés et sociaux d'un vaccin efficace ne pouvaient qu'être élevés. Mais encore ?

En se basant sur les données relatives aux prix des vaccins commercialisés avec succès et sur l'hypothèse selon laquelle la vaccination finira par couvrir 75% de la population mondiale, Fink (2022) a calculé que les recettes privées devraient atteindre au total 130,5 milliards de dollars É.-U. Même si l'on ne connaît pas le montant exact des coûts de recherche-développement, ce chiffre représente un dividende privé de l'innovation important.

Cela étant, l'avantage social des vaccins est considérablement plus élevé. Il représente la valeur des vies sauvées et des problèmes de santé évités, ainsi que celle des pertes de production évitées en rendant moins nécessaires les mesures comme les confinements prises par les pouvoirs publics pour contenir la pandémie. L'étude utilise une trajectoire épidémiologique contre-factuelle reposant sur les cas d'infection avant l'introduction des vaccins et la réalisation hypothétique de l'immunité collective. Elle utilise ensuite ce que l'on appelle des estimations de la valeur d'une vie statistique (VVS) et les pertes de production mondiales de l'année 2020 ayant précédé l'introduction des vaccins pour estimer un avantage social de 70,5 billions de dollars É.-U., soit 887 fois l'avantage privé.

Les vaccins efficaces contre la COVID-19 seraient sans doute apparus en l'absence d'un financement public de la recherche-développement, mais le rendement social très élevé de l'innovation en matière de vaccins efficaces montre pourquoi les gouvernements ont mobilisé des financements et aidé à coordonner les essais cliniques et le renforcement des capacités de production.

Par ailleurs, l'étude de Fink cherche à expliquer comment l'apparition des variants du virus, la nécessité de doses de rappel et les différentes trajectoires épidémiologiques influent sur les dividendes privés et sociaux. Ces derniers restent élevés par rapport aux montants plausibles des investissements de recherche-développement, et l'avantage social représente dans tous les cas au moins 220 fois l'avantage privé.

Le calcul du dividende social ne tient pas compte de plusieurs effets socioéconomiques qui sont difficiles à quantifier et qui, pour certains, pourraient ne se matérialiser qu'à long terme. Ce sont notamment

un accès réduit aux soins de santé dû au fait que la pandémie a surchargé les systèmes de santé; les pertes éducatives liées à la fermeture prolongée des écoles; les pertes d'emploi et la sortie permanente de la population active, et l'augmentation des coefficients d'endettement par rapport au PIB (produit intérieur brut), qui met en doute la viabilité budgétaire et entraîne un effet d'éviction pour d'autres investissements publics.

En outre, les premières données font apparaître que la pandémie est associée à une diminution de 5% des essais cliniques pour les maladies autres que la COVID-19<sup>9</sup>. Face à la menace représentée par le virus, une société pourrait bien avoir intérêt à réaffecter des ressources en matière de recherche-développement, mais cette réaffectation risquerait de se faire aux dépens des progrès de la lutte contre les autres maladies.

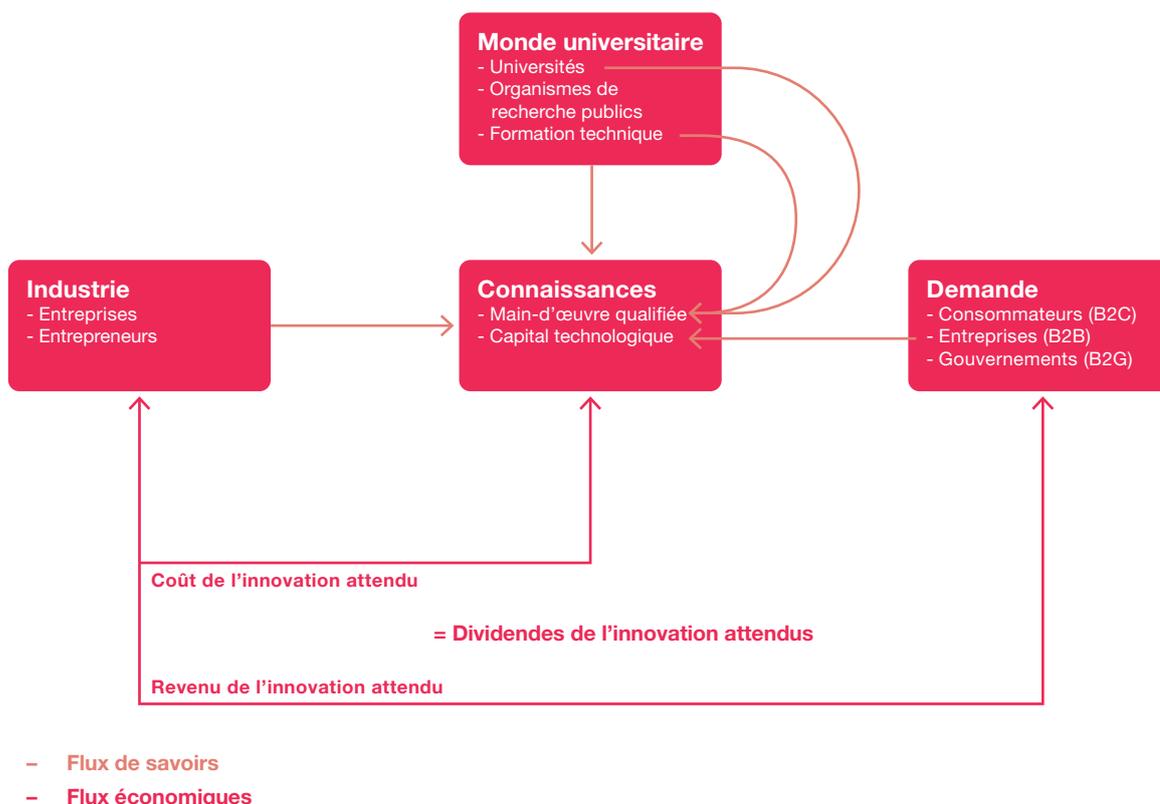
## 1.2 Interactions au sein des écosystèmes d'innovation

Les institutions scientifiques peuvent décider d'influencer la trajectoire de l'innovation en l'orientant vers certains domaines, par exemple en développant davantage de programmes pratiques pour former des ingénieurs spécialisés ou en transférant la technologie vers des secteurs particuliers. Les industries et les entreprises peuvent décider d'investir plus fortement dans la recherche-développement et dans d'autres activités génératrices d'innovation. Elles le font soit pour créer de nouvelles technologies, soit pour absorber des technologies existantes provenant d'autres acteurs de l'écosystème de l'innovation, comme les universités, les fournisseurs ou les entreprises concurrentes<sup>4</sup>. Les gouvernements influencent la trajectoire de l'innovation en allouant des ressources humaines et financières au moyen d'un large éventail d'instruments de politique générale (voir la section 1.4).

Un écosystème de l'innovation peut se définir comme l'ensemble des acteurs dont les choix influencent les résultats en matière d'innovation et, de ce fait, la trajectoire de l'innovation. Ces acteurs sont des entreprises, qui vont des fournisseurs spécialisés aux fabricants et détaillants travaillant pour le consommateur final, ainsi que, comme on l'a indiqué, les établissements investis d'une mission scientifique et technologique, comme les universités ou les organismes de recherche publics. Mais ces écosystèmes peuvent aussi englober des institutions dont la principale mission n'est pas d'ordre scientifique ou technologique, telles que les organismes publics, les institutions financières ou les offices de propriété intellectuelle, pour n'en citer que quelques-unes. Le degré d'articulation d'un

## Les acteurs des écosystèmes de l'innovation interagissent pour parvenir à l'innovation

Figure 1.2 Résumé du concept d'interactions entre acteurs de l'innovation



Source : Adapté de (Schmookler, 1962a) et (Kline et Rosenberg, 1986).

Note: B2C, relations entre une entreprise et les consommateurs; B2B, relations entre entreprises; B2G, relations entre une entreprise et le gouvernement.

environnement de l'innovation est défini non seulement par le degré de développement des institutions qui le composent, mais aussi par leurs interactions. Les choix et les interactions qui se rencontrent au sein de l'écosystème ne peuvent qu'avoir de fortes incidences sur la trajectoire de l'innovation.

### Les écosystèmes se constituent par aire géographique et par thème

La notion d'écosystème de l'innovation a été étudiée dans plusieurs séries de publications relevant de l'économie et des sciences sociales<sup>5</sup>. Les acteurs de l'écosystème font circuler de façon non linéaire et fortement interdépendante les connaissances et les idées qui aboutissent à l'innovation.

On constate que l'innovation et les connaissances circulent le plus facilement à l'intérieur de certaines limites géographiques ou thématiques<sup>6</sup>. Les individus et les institutions d'une même ville ou région multiplient leurs interactions – formelles ou informelles –, créant de nouvelles possibilités de faire circuler des connaissances et naître l'innovation. Il en va de même pour un écosystème de l'innovation où sont partagés

des technologies ou des liens commerciaux communs, comme dans le cas d'une chaîne de valeur mondiale. De même, les individus et institutions œuvrant dans le même contexte scientifique, technologique ou industriel communiqueront et, de ce fait, échangeront des connaissances avec le plus de facilité<sup>7</sup>. Le dynamisme écosystème de l'innovation dans les technologies de l'information et des communications (TIC) de la Silicon Valley, dans la région de San Francisco, est un exemple de concentration à la fois géographique et thématique. En revanche, les chaînes de valeur mondiales des fabricants d'automobiles sont des exemples de concentration thématique, mais non géographique; autrement dit, une innovation très spécifique circule dans tous les sens entre les fournisseurs de pièces détachées d'automobile et les constructeurs automobiles dans différentes parties du monde.

Il est à noter que la proximité géographique et thématique suppose la mobilité de personnes qualifiées, qui sont les meilleurs vecteurs de flux de savoirs, en particulier des savoirs implicites. Les talents prennent et abandonnent des emplois dans le même écosystème, en transmettant au passage informations et connaissances. Toutefois, l'absence de proximité géographique ou thématique n'empêche pas nécessairement

les écosystèmes de l'innovation de nouer des liens avec des acteurs extérieurs ou d'autres thèmes scientifiques et technologiques<sup>8</sup>.

### Comment un écosystème fixe une trajectoire

L'interaction entre les acteurs de l'écosystème de l'innovation repose sur les flux de savoirs. Ces derniers s'accumulent dans un écosystème de l'innovation et déterminent les possibilités d'innovation potentielles à la disposition des acteurs, lesquelles fixent la trajectoire de l'innovation. La figure 1.2 résume ces interactions, que l'on examine ci-après.

Dans les écosystèmes de l'innovation, chaque acteur complète et utilise un ensemble de connaissances<sup>9</sup>. Les professeurs utilisent ces connaissances pour former les futurs scientifiques, techniciens supérieurs et entrepreneurs dans le cadre de programmes d'enseignement universitaire ou technique, tandis que les chercheurs enrichissent cet ensemble de nouvelles connaissances scientifiques fondamentales et appliquées. Les ingénieurs et techniciens supérieurs appliquent ces connaissances en travaillant dans une entreprise, une université ou un organisme public et, ce faisant, ils contribuent à accroître la base expérimentale et technique. Les entrepreneurs utilisent ces connaissances lorsqu'ils créent de nouvelles entreprises, et les complètent lorsqu'ils conçoivent un nouveau produit ou procédé.

Comment la trajectoire de l'innovation choisie par les acteurs est-elle fixée? Plusieurs interactions jouent simultanément. Tout d'abord, il y a la curiosité. La curiosité amène les chercheurs à explorer un nouveau domaine scientifique et les ingénieurs à expérimenter une technique innovante ou une nouvelle technologie. La curiosité n'est pas confinée aux programmes de recherche des universités et des organismes publics. Les entreprises sont de plus en plus nombreuses à se doter de services d'ingénierie ou de recherche-développement formelle, qui donnent libre cours à la curiosité scientifique et technologique. On peut aussi être curieux en dehors d'une université ou du laboratoire d'une entreprise. La curiosité de Thomas Edison (1847-1931), l'inventeur autodidacte de l'ampoule électrique, entre autres choses; de l'actrice et inventrice Hedy Lamarr (1914-2000), et de Steve Jobs (1955-2011), cofondateur d'Apple Inc., a été éveillée en dehors de toute structure formelle<sup>10</sup>.

Les entreprises, les entrepreneurs et les gouvernements recensent les possibilités d'innovation en s'appuyant sur des prévisions concernant les dividendes privés et sociaux potentiels, c'est-à-dire le bénéfice que pourrait en retirer une entreprise ou la société.

Une entreprise qui songe à un nouveau produit innovant doit se demander de quel personnel qualifié et de

quel capital technologique elle aura besoin pour mettre ce produit au point et le fabriquer. La main-d'œuvre et l'équipement nécessaires peuvent se trouver déjà sur le marché ou l'entreprise peut devoir former du personnel ou créer l'équipement en partant de zéro. Du fait des risques et des coûts en jeu, il est probable que les innovations verront le jour plus vite dans les régions où les talents et les équipements sont déjà disponibles. Par exemple, plus on compte d'informaticiens et d'ingénieurs en informatique très compétents dans un écosystème de l'innovation et plus celui-ci peut compter sur du matériel informatique de pointe, plus il faut s'attendre à ce que les entrepreneurs et les entreprises jouent la carte de l'innovation liée aux TIC.

À l'inverse, l'absence de capital ou de main-d'œuvre peut aussi déboucher sur des possibilités d'innovation. Le manque de matériel informatique de pointe peut lui-même créer des possibilités d'innovation pour les fournisseurs spécialisés du secteur des TIC, comme ceux qui offrent des services informatiques et de capacité de stockage partagés. Le coût de la main-d'œuvre spécialisée peut inciter les fabricants d'équipements à produire une innovation qui se substitue à la main-d'œuvre. Plusieurs spécialistes indiquent que la pénurie de main-d'œuvre que les États-Unis d'Amérique ont connue au XIX<sup>e</sup> siècle a réorienté l'effort d'innovation vers les technologies permettant d'économiser la main-d'œuvre plus rapidement qu'en Grande-Bretagne, qui avait jusque-là été la première puissance industrielle mondiale<sup>11</sup>. La pénurie de main-d'œuvre qualifiée peut aussi pousser les universités et les organismes publics à créer de nouveaux programmes destinés à former les ressources humaines dont ont besoin des secteurs spécifiques.

L'innovation tient compte des possibilités de bénéfice, elles-mêmes liées à la taille d'un marché réel ou potentiel<sup>12</sup>. La perspective d'une plus forte demande incite les entrepreneurs et les entreprises à investir, car ils ont plus de chances d'amortir les coûts liés à l'innovation et de dégager un bénéfice. Les économies d'échelle peuvent également être au rendez-vous. Plus les personnes ayant un problème à résoudre sont nombreuses, plus la probabilité de lui trouver une solution innovante est grande. De même, plus il y a de gens qui réfléchissent à un problème, plus il est facile de trouver l'esprit inventif nécessaire pour le régler. La même logique vaut pour les ressources et les outils spécifiques mis en œuvre.

La taille et les préférences du marché expliquent pour une bonne part le taux d'innovation des entreprises toutes trajectoires confondues, ainsi qu'en attestent les marchés actuels des ordinateurs et des téléphones portables. La croissance rapide du marché de l'automobile (et de l'innovation qui lui est indissociable) dans la première partie du XX<sup>e</sup> siècle a été davantage liée aux mutations économiques et sociales qui se sont produites dans certaines régions du monde qu'aux

possibilités technologiques. Dans le cas du moteur à combustion interne et d'autres pièces automobiles, les connaissances scientifiques et la technologie ont précédé la forte expansion de l'offre et de la demande. De fait, certains spécialistes avancent que l'innovation automobile n'a pris son essor qu'avec l'apparition aux États-Unis d'Amérique d'une classe moyenne relativement prospère ayant les moyens d'acheter une voiture<sup>13</sup>.

Le marché n'est pas fait que de consommateurs finaux privés; il englobe également les entreprises d'une chaîne d'approvisionnement, ainsi que les gouvernements et les institutions. Une pénurie de main-d'œuvre qualifiée ou de capital technologique et le coût de ces facteurs peuvent, comme on l'a indiqué, créer des marchés potentiels pour les entreprises qui fournissent de nouveaux équipements ou offrent une formation spécialisée. Ces marchés "entre entreprises" contribuent aussi à fixer la trajectoire de l'innovation. Le coût de la main-d'œuvre peut inciter les fournisseurs spécialisés de machines et d'équipements à innover dans les domaines de la robotique et de l'automatisation au service d'autres secteurs d'activité. De même, le coût du transport peut stimuler l'innovation dans la conteneurisation ou les technologies d'impression en trois dimensions (impression 3D).

La participation des gouvernements à l'innovation consiste à financer la recherche et l'enseignement publics et à être la principale source de demande de technologies de l'innovation dans les secteurs stratégiques. Les politiques publiques encouragent et appuient souvent les changements à apporter aux programmes universitaires pour augmenter l'offre de main-d'œuvre qualifiée. Tel a été le cas des instituts de recherche publics créés en République de Corée dans les années 1960 et 1970, comme l'Institut coréen de science et de technologie (voir le chapitre 2). La Chine en a fourni d'autres exemples à partir des années 1990. Dans les deux cas, les institutions ont favorisé la formation d'une main-d'œuvre spécialisée pour le secteur informatique. Les domaines dans lesquels les gouvernements sont la principale source de demande de technologies de l'innovation sont la défense, la santé, l'éducation et l'agriculture<sup>14</sup>.

### 1.3 Les forces économiques à l'œuvre

Les décisions des acteurs d'un écosystème de l'innovation modifient constamment la trajectoire de l'innovation. La présente section examine comment elles "approfondissent" ou "élargissent" cette trajectoire.

#### "Approfondir" la trajectoire de l'innovation

Les ressources économiques sont attirées par les technologies les plus rentables et les secteurs qui les

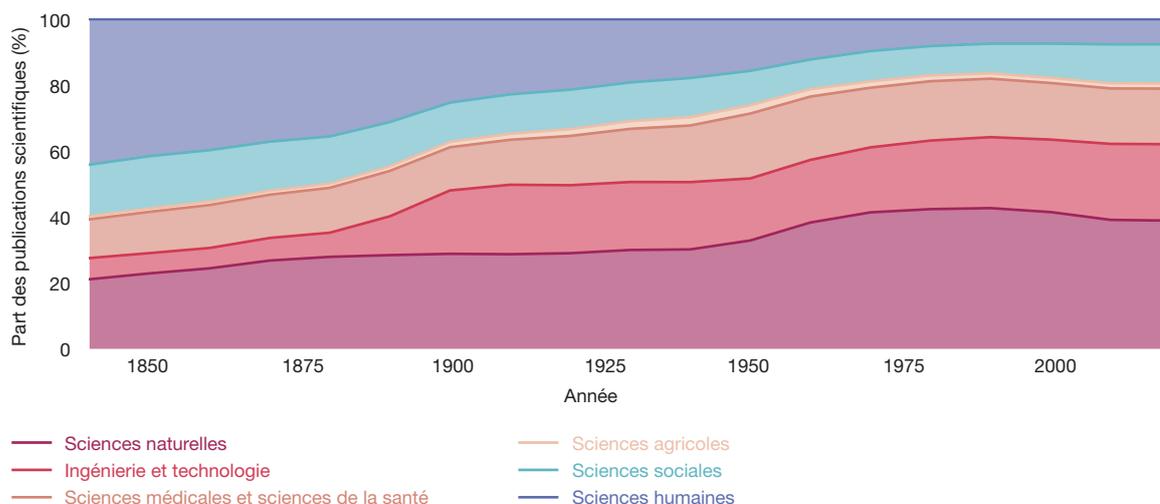
utilisent. Cela renforce les décisions technologiques antérieures et privilégie les innovations et secteurs les plus performants. Ce mécanisme de renforcement "approfondit" les décisions en matière d'innovation récemment prises dans les domaines et secteurs scientifiques, jouant un rôle important pour la fixation de la trajectoire de l'innovation.

En affectant simplement un plus grand nombre de talents et des ressources financières plus importantes à un domaine ou secteur donné, les entreprises ou les gouvernements peuvent influencer directement sur la trajectoire de l'innovation. La réaffectation d'un plus grand nombre de scientifiques et d'équipements de recherche-développement accélère le rythme des découvertes scientifiques et des innovations dans un domaine de la technologie donné. Tel a été le cas, par exemple, des efforts déployés pour découvrir de nouveaux antibiotiques pendant la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle ou, plus récemment, pour produire des vaccins contre la COVID-19 (voir les chapitres 2 et 3)<sup>15</sup>. De même, l'affectation d'un plus grand nombre de moyens en matière d'innovation semble devoir générer un plus grand nombre d'innovations liées aux processus de production. Les unités de recherche-développement des entreprises peuvent mettre au point de nouvelles idées ou adapter des idées existantes afin d'accroître l'efficacité de la fabrication des produits existants. Les études économiques constatent systématiquement que ce sont les entreprises et secteurs privés qui investissent le plus dans la recherche-développement qui produisent le plus par unité de capital ou de main-d'œuvre investie<sup>16</sup>.

La trajectoire de l'innovation est intrinsèquement liée à l'allocation des ressources. Les domaines et secteurs qui investissent régulièrement dans la recherche-développement finissent par devancer sur le plan de la production scientifique, technologique et novatrice ceux qui investissent le moins. Par exemple, il y a un siècle, la virologie intéressait moins les scientifiques, et les investissements dans la production de vaccins contre les virus étaient nettement moins importants qu'aujourd'hui, même en termes relatifs (c'est-à-dire en tenant compte du niveau de connaissances différent à ce moment-là). La trajectoire de l'innovation ultérieure et l'accroissement des activités ne s'expliquent pas uniquement par les découvertes ultérieures dans ce domaine, mais aussi par la rapide réaffectation des ressources vers ces découvertes et les secteurs connexes. Les chaînes de valeur multinationales et complexes des industries automobile et aéronautique d'aujourd'hui ont leur origine dans les innovations à la limite de l'amateurisme qui ont été mises au point dans des ateliers indépendants et informels il y a de cela plus d'un siècle (les frères Wright, qui auraient fait voler le premier avion à moteur, ont commencé leur carrière dans un atelier de réparation de bicyclettes). Les téléphones portables et les applications Internet – qui n'existaient même pas jusqu'à une date relativement récente – sont devenus la norme pour le travail et les

## La production scientifique met désormais l'accent sur les sciences "exactes"

Figure 1.3 Parts des publications scientifiques par domaine scientifique, 1840-2019



loisirs. Ce sont là des exemples de possibilités scientifiques et technologiques dans le cas desquelles, en l'espace de seulement quelques décennies, les gouvernements et les entreprises, après avoir commencé par s'en désintéresser, ont alloué d'abondantes ressources humaines et financières.

Les données rétrospectives sur les publications scientifiques font d'ailleurs état d'une évolution rapide de l'allocation de ressources d'innovation (voir la figure 1.3). On constate que les parts des publications scientifiques par domaine scientifique correspondent aux préférences des acteurs scientifiques à l'œuvre dans ces domaines, indiquant la trajectoire effective de la science considérée et, en définitive, de l'innovation<sup>17</sup>. La proportion des publications dans les principaux domaines scientifiques a beaucoup changé entre le début du XIX<sup>e</sup> siècle et la seconde moitié du XX<sup>e</sup>. Au cours de cette période, la part globale de la recherche menée en sciences de la santé, ingénierie et sciences naturelles – souvent appelées les sciences "exactes" – a augmenté. Entre le début des années 1800 et les années 2010, la part des publications de sciences naturelles, dans des domaines tels que les mathématiques, la physique, la chimie ou la biologie, est passée de 16 à 36% de l'ensemble des publications scientifiques enregistrées. Durant la même période, la part des publications liées à l'ingénierie est passée de 7 à 24%, tandis que celle des sciences de la santé et médicales passait de 9 à 16%.

De même, il apparaît que les demandes de brevet par domaine technologique reflètent la trajectoire de l'innovation suivie par les acteurs. Le changement rapide de trajectoire apparaît clairement dans la répartition entre domaines techniques de l'ensemble des premiers dépôts de demande de brevet dans le monde (voir la figure 1.4). Il n'est pas surprenant qu'au cours du siècle

dernier, la part des domaines techniques liés aux TIC ait connu la plus forte progression. Au sein des TIC, la part des techniques informatiques a connu sa plus forte croissance en comptant pour plus de 10% de l'ensemble des demandes de brevet enregistrées entre 2010 et 2020. Les communications numériques, les télécommunications et les semiconducteurs suivent un schéma analogue. La concentration des brevets dans les TIC s'est principalement faite aux dépens des techniques "traditionnelles", en particulier celles liées à la mécanique (machines, outils et moteurs à combustion, par exemple).

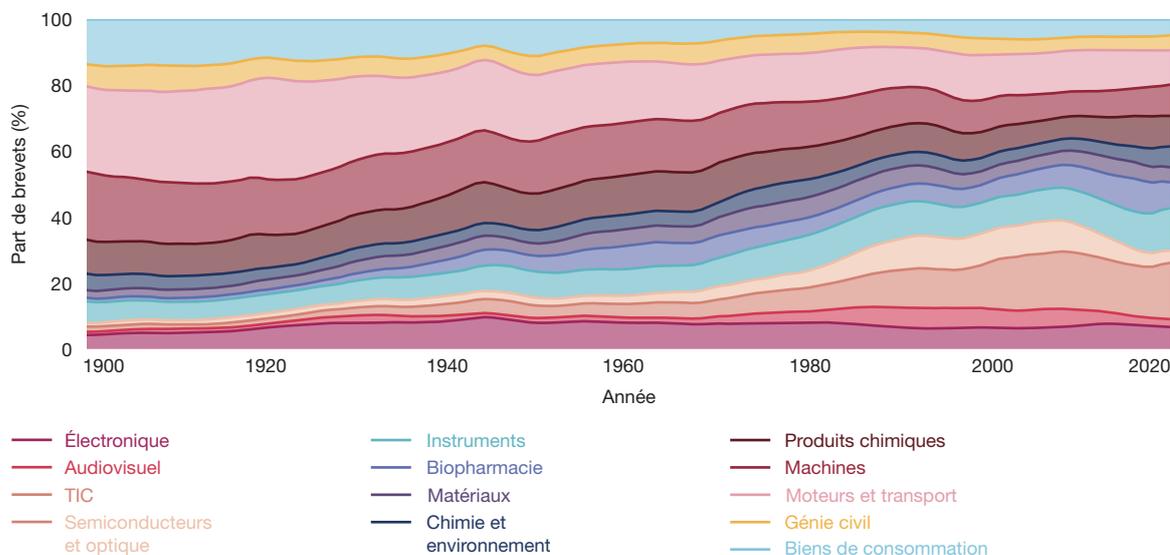
La dynamique du succès renforce la tendance à l'approfondissement. Les scientifiques et les techniciens choisissent rationnellement une carrière dans les domaines et secteurs scientifiques les plus productifs. Les entrepreneurs et les grandes entreprises donnent la priorité à des projets comme la création de nouvelles entreprises ou de nouveaux produits dans les secteurs d'avenir. Avec le temps, les ressources d'innovation – tant humaines que financières – sont naturellement attirées par les domaines et secteurs les plus productifs. Ce mécanisme renforce et approfondit les trajectoires de l'innovation des domaines et secteurs scientifiques performants.

### "Élargissement" de la trajectoire de l'innovation

Les interactions sont régulières entre les secteurs, entreprises et institutions scientifiques et techniques à l'œuvre dans un écosystème de l'innovation. Leurs activités d'innovation profitent des activités d'innovation et économiques menées autour d'eux. Les domaines scientifiques théoriques profitent de l'utilisation

## Un siècle de passage de l'innovation dans le domaine des moteurs à l'innovation dans le domaine des TIC

Figure 1.4 Parts des brevets par domaine technique, 1900-2020



Source: Base de données mondiale sur les statistiques en matière de brevets (PATSTAT, octobre 2021) de l'Office européen des brevets.  
Note: basé sur les domaines techniques de l'OMPI.

systématique et continue des techniques par les scientifiques praticiens et les ingénieurs. Il arrive souvent que les nouvelles découvertes scientifiques dans un domaine soient simplement la synthèse des connaissances accumulées dans des domaines différents. Les découvertes réalisées en physique ont un impact sur les secteurs des TIC tandis que les activités d'innovation menées par des entreprises privées dans le domaine de la puissance de calcul et du stockage augmentent la productivité scientifique des chercheurs et des instituts de physique. Les laboratoires de recherche biologique utilisent de plus en plus des imprimantes 3D sur mesure pour produire des outils et équipements de laboratoire adaptés à leurs recherches. Parallèlement, les techniciens d'impression 3D étudient des applications de "bio-impression", aux fins, notamment, de la construction d'organes à implanter, sur la base d'enseignements tirés des sciences biologiques<sup>18</sup>.

La distinction entre science et technique est de plus en plus floue, cette tendance ayant au reste été observée dès le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Les industries d'aujourd'hui inspirent les informations, techniques et méthodes nées dans les laboratoires scientifiques et en tirent profit<sup>19</sup>. C'est tout particulièrement le cas des industries de pointe, qui sont très marquées par la recherche fondamentale<sup>20</sup>. Les produits scientifiques des laboratoires de recherche-développement d'entreprises comme Apple, Google, Huawei, Samsung ou Tencent contribuent directement aux innovations que l'on doit à ces entreprises.

Il arrive que l'allocation de ressources plus importantes à l'innovation dans un domaine se traduise par une augmentation de la production dans un autre. L'histoire

regorge d'exemples où une innovation dans un secteur a débordé sur d'autres secteurs. Ainsi, par exemple, la machine à vapeur, conçue au départ pour évacuer l'eau d'une mine inondée, est devenue la principale source de puissance motrice pour le transport ferroviaire et maritime. Certaines sociétés de produits chimiques ayant participé à la mise au point du caoutchouc synthétique ont fini, poussées par la demande de pneus en caoutchouc des constructeurs automobiles, par changer de secteur d'activité pour faire partie intégrante de l'industrie automobile et ont complètement cessé d'être des sociétés de produits chimiques.

Les secteurs qui s'appuient sur les techniques audiovisuelles, biologiques ou de gestion ont profité de la révolution des TIC. Pendant longtemps, le secteur de l'audiovisuel a progressé en phase avec les innovations en matière d'objectifs ou de techniques d'enregistrement analogique. Mais au cours des trois dernières décennies, on a réorganisé l'ensemble du secteur en faisant appel aux technologies numériques d'enregistrement et de partage de contenu. Il en va de même de l'utilisation accrue des technologies numériques – matériel et logiciel – dans les laboratoires des entreprises du secteur pharmaceutique et les départements de la gestion de toutes les entreprises. Des domaines tels que les technologies audiovisuelles, les méthodes de traitement de données à des fins de gestion et, dans une moindre mesure, l'analyse de matériels biologiques ont augmenté leur part des demandes de brevet. Il ressort des données de brevet sous-jacentes que cette progression est due à l'adoption des TIC, comme le montre la figure 1.5.

La trajectoire de l'innovation est en grande partie fixée par les connaissances acquises par les secteurs grâce à l'expérience pratique ou aux chaînes d'approvisionnement<sup>21</sup>. C'est particulièrement marqué dans le cas des secteurs des machines-outils et des équipements mettant au point de nouveaux biens d'équipement pour d'autres secteurs<sup>22</sup>. L'introduction d'outils et équipements innovants est pour les autres secteurs le moyen le plus simple de devenir innovateurs et productifs. Par exemple, les innovations apportées en continu aux outils de tournage et de fraisage ont nettement augmenté la productivité de la plupart des industries manufacturières. De même, l'industrie alimentaire a largement profité des innovations apportées aux techniques de pasteurisation et au matériel frigorifique.

Les flux de savoirs et d'innovation entre domaines et secteurs incitent fortement les scientifiques, ingénieurs et entrepreneurs à embrasser un nouveau domaine ou secteur en appliquant les technologies qu'ils maîtrisent. Contrairement à l'"approfondissement", lorsqu'il s'agit d'"élargissement", les ressources de recherche-développement et d'innovation peuvent être efficacement

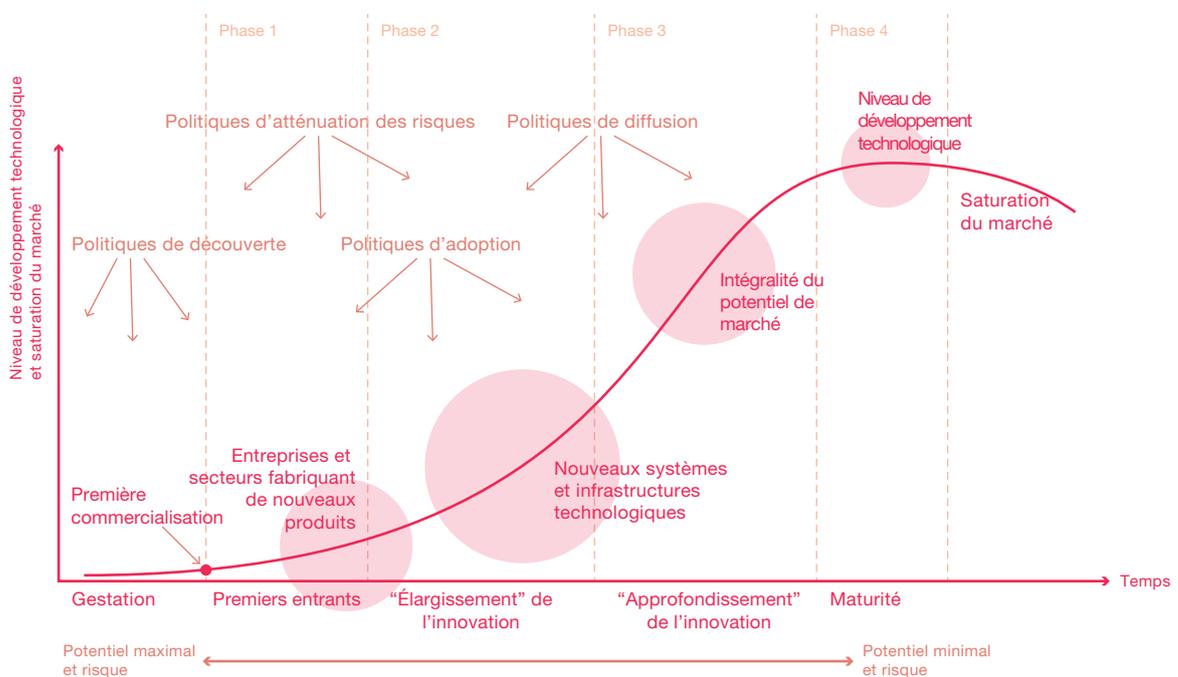
transférées vers des secteurs où la concurrence est moins vive et les perspectives meilleures. Ce mécanisme d'élargissement permet à une technologie donnée de se diffuser dans d'autres domaines et secteurs, réaffectant les ressources humaines et financières et influant en définitive sur la trajectoire de l'innovation.

### À niveau de développement technologique différent, dividendes différents

Une innovation – un nouveau produit ou un nouveau procédé – réussie progresse en fonction des améliorations apportées au fil du temps à la technologie sous-jacente. Différents acteurs entretiennent cette accumulation d'améliorations. Durant la gestation d'une innovation, seuls quelques entrepreneurs et un nombre encore plus faible de sociétés participent à l'élaboration et à l'amélioration de la technologie. Lentement, l'accumulation des améliorations s'accélère par étapes, les inventeurs, innovateurs et imitateurs faisant successivement leur apparition dans le domaine ou secteur concerné (voir la figure 1.5).

### Pour une innovation réussie, les acteurs et les risques de l'innovation diffèrent entre sa gestation et sa maturité

Figure 1.5 Résumé du concept d'écosystème de l'innovation en évolution autour d'une nouvelle technologie



Source: Adapté de Perez (2003).

L'entrée de nouveaux entrepreneurs et entreprises innovantes apporte un nouveau savoir-faire technologique et de nouvelles idées aux entreprises établies. Cette nouvelle entrée élargit l'envergure technologique et industrielle des entreprises qui utilisent l'innovation.

Des entreprises toujours plus diverses réfléchissent à la meilleure façon d'améliorer la technologie dans un cas donné. Au fil du temps, ces nouvelles entreprises remplacent souvent bon nombre des entreprises établies. C'est ce que l'on appelle une "destruction

créatrice” : les entreprises les plus innovantes – et les plus créatives et affichant les meilleurs résultats sur le plan commercial – prennent la place des anciennes<sup>23</sup>.

Les entreprises nouvelles et les entreprises toujours présentes fixent la trajectoire de l'innovation dans le secteur concerné durant cette phase et les phases suivantes. Dans les phases ultérieures, on assiste à un approfondissement d'une trajectoire technologique dès lors bien établie, lié principalement à une innovation cumulative et à l'imitation.

L'écosystème de l'innovation réagit différemment selon les phases concernées. Le niveau de développement d'une technologie donnée est susceptible de déterminer le degré de progressivité de l'innovation et, par conséquent, le ou les responsables de la trajectoire de celle-ci : ainsi, les entreprises plus petites et plus jeunes prescrivent cette trajectoire dans la phase d'élargissement initiale, tandis que les entreprises qui sont établies et dominent le marché le font durant la phase d'approfondissement<sup>24</sup>.

Comment cela est-il possible ? On relève des écarts très importants entre les dividendes privés et les dividendes sociaux pendant les vagues successives d'améliorations technologiques. Les perspectives de dividendes privés non seulement sont très différentes à chaque phase dans un secteur ou domaine donné, mais diffèrent également d'un secteur à l'autre selon la phase de développement technologique.

Durant la mise au point d'une nouvelle technologie, les dividendes privés de l'innovation sont généralement faibles, du fait d'un risque d'échec plus élevé que pour les technologies concurrentes existantes. Cependant, les dividendes sociaux du plein développement d'une technologie en gestation sont potentiellement élevés<sup>25</sup>. Quels que soient les coûts privés et sociaux de l'échec des entreprises pionnières – faillite, pertes d'emplois, etc. –, l'ensemble de la société pourrait encore profiter à long terme de la maturation et, par conséquent, de la stabilisation d'une nouvelle technologie et de l'établissement d'entreprises plus efficaces. Aux États-Unis d'Amérique, des centaines de petits constructeurs automobiles privés produisaient autant de modèles de voitures durant la première décennie du XX<sup>e</sup> siècle. Quelques décennies plus tard seulement, les consommateurs pouvaient acheter des modèles moins nombreux mais plus fiables produits pour l'essentiel par une poignée d'entreprises. Ces automobiles technologiquement plus développées sont devenues un matériel de transport standard dans un grand nombre de secteurs, profitant à la société et non pas seulement aux constructeurs et consommateurs d'automobiles.

Nul ne peut dire exactement quand une technologie donnera de brillants résultats ni même si cela arrivera. Il arrive qu'une promesse initiale de dividendes privés s'avère plus difficile ou prenne plus longtemps à tenir

que prévu. Par exemple, la technologie des panneaux solaires a été utilisée dans l'industrie spatiale longtemps avant de devenir une solution viable du point de vue commercial pour la production d'énergie domestique (voir le chapitre 3)<sup>26</sup>.

À mesure que se précisent les perspectives de rendements privés, les entreprises du secteur considéré devraient être plus nombreuses à entrer sur le marché, augmentant par là même le poids des entreprises privées dans la trajectoire de l'innovation. Dans les phases ultérieures, les dividendes privés sont souvent suffisamment élevés pour inciter un plus grand nombre d'entreprises à adopter des technologies parvenues à maturité et à entrer sur les marchés.

### Chocs systémiques et technologies génériques

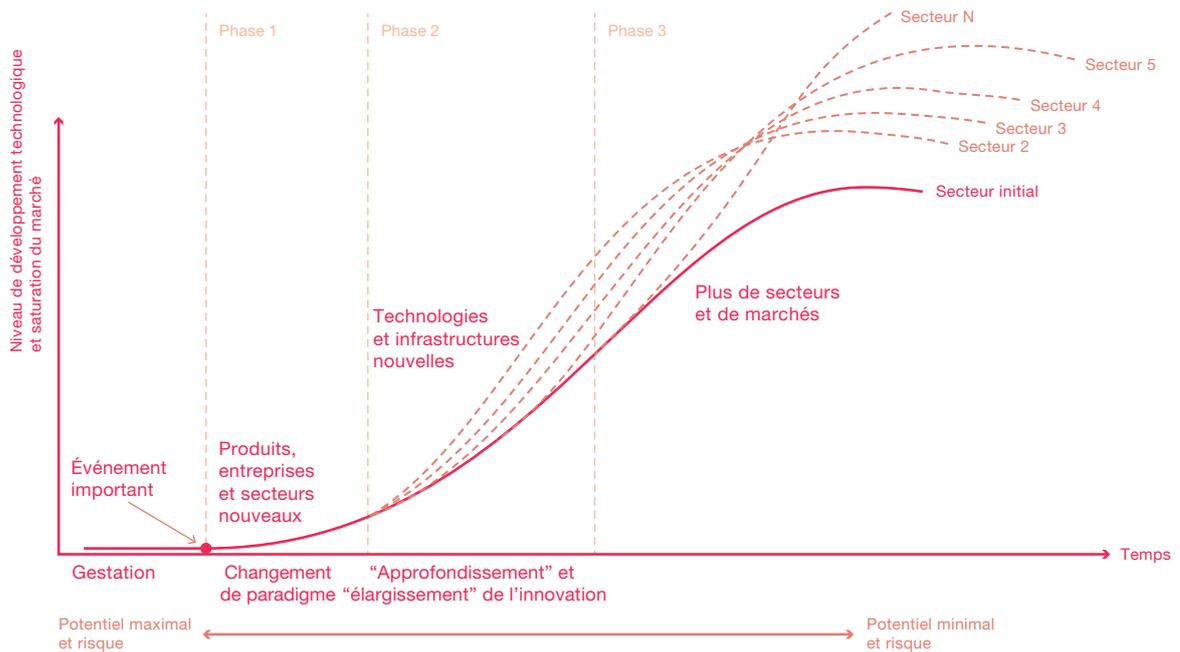
Il arrive que des chocs “systémiques” importants et imprévus – comme ceux liés à de nouvelles technologies révolutionnaires, à des crises épidémiologiques ou à des guerres – retentissent sur les préférences et les priorités des acteurs de l'écosystème de l'innovation. Ces chocs peuvent produire des changements à grande échelle qui ont un impact sur de multiples acteurs et modifient la façon dont sont perçus les dividendes privés et sociaux de l'innovation.

Très exceptionnellement, une nouvelle technologie révolutionnaire est largement adoptée dans un grand nombre de secteurs tout en se trouvant en phase de développement technique continu dans le domaine ou secteur initial. Elle devient ce que les publications économiques appellent une technologie générique, capable tout à la fois d'approfondir et d'élargir sa trajectoire. Elle permet de réaliser des innovations ultérieures dans d'autres domaines, tout en repoussant les frontières du savoir dans son secteur (voir la figure 1.6). De nouvelles entreprises et de nouveaux entrepreneurs adoptent successivement cette technologie générique, provoquant pour longtemps des vagues d'améliorations technologiques cumulatives<sup>27</sup>.

Divers moments de l'histoire sont généralement caractérisés par le développement et la diffusion d'ensembles spécifiques de technologies à peu près complémentaires. Celles-ci ont en commun la caractéristique de se répandre dans un large éventail de secteurs et d'être utilisées pour former des professionnels dans de nouveaux domaines relevant de l'ingénierie et d'autres sciences appliquées. Les exemples d'innovations révolutionnaires tirés de l'histoire dont il a déjà été question, comme la machine à vapeur, l'électricité, le moteur à combustion interne et, plus récemment, les TIC, ont tous eu un effet de ricochet dans tous les domaines scientifiques et technologiques, qui s'est également fait sentir dans les secteurs et sur les marchés.

## Les technologies génériques “approfondissent” et “élargissent” tout à la fois la trajectoire de l’innovation

Figure 1.6 Résumé conceptuel des cycles concernant les technologies génériques



Source: Adapté de Perez (2003).

Ces technologies génériques reconfigurent les principaux ensembles de technologies comme aucune autre technologie ne peut le faire<sup>28</sup>. Leur généralisation crée une rivalité pour les ressources financières et humaines entre le secteur qui les produit et les secteurs qui les appliquent. Tel est le cas, par exemple, des TIC utilisées dans d’autres domaines, comme la biotechnologie. Les technologies liées aux méthodes de traitement de données à des fins de gestion et à l’analyse de matériels biologiques sont des secteurs qui appliquent les TIC et qui ont continué de se développer parallèlement à l’augmentation de la part de dépôts de brevet des secteurs de la communication numérique et de l’informatique à l’origine des TIC. La forte demande de main-d’œuvre ayant des compétences en informatique et d’intrants à semi-conducteurs (comme les lingots, les plaquettes et les circuits intégrés) sont deux exemples des tensions concurrentielles pouvant exister entre les secteurs, tensions qui peuvent être résolues à l’aide de nouveaux programmes d’enseignement et des investissements dans de nouvelles capacités de production.

Les chocs systémiques transforment la principale base technologique d’un écosystème de l’innovation existant. Alors que la plupart des événements de ce genre trouvent leur origine dans un moment “Eurêka” – comme la découverte de la pénicilline, le transistor ou le système CRISPR-Cas9 pour la modification du génome<sup>29</sup> –, il faut des années de diffusion des connaissances et de légères améliorations en chaîne pour que les innovations importantes portent tous leurs fruits.

Il n’est pas nécessaire que les chocs systémiques aient un caractère scientifique ou technologique<sup>30</sup>. Les investissements nationaux importants dans la recherche-développement peuvent être réorientés dans certaines conditions, telles la pandémie de COVID-19 ou la Seconde Guerre mondiale. On voit que la trajectoire de l’activité technologique peut être tout à fait axée tant sur les besoins économiques que sur les impératifs non économiques.

Certains chocs sont causés par des catastrophes naturelles, comme les tremblements de terre, les tsunamis, les feux de forêt, les inondations ou les pandémies. Ces catastrophes naturelles peuvent modifier les préférences au sein d’une société quant à l’importance d’une technologie environnementale ou agricole donnée. Il y a des chocs qui affectent l’intérêt national d’un pays, comme un conflit armé, un bouleversement géopolitique ou une guerre commerciale. Ces chocs peuvent influencer sur le rang de priorité qu’une société accorde, par exemple, à l’innovation en matière de défense, y compris l’exploration spatiale. D’autres phénomènes sociaux – tels que les convictions culturelles et religieuses – peuvent également modifier l’orientation de l’innovation, en déterminant, par exemple, ce qui est considéré comme moralement acceptable en matière d’innovation médicale. Des événements économiques – comme les crises financières ou l’inflation – peuvent aussi aboutir à un changement de priorités en privilégiant les technologies de réduction des coûts ou l’innovation en matière d’assistance sociale.

Il est généralement demandé aux gouvernements et aux décideurs d'intervenir à la suite d'un choc susceptible de modifier les priorités. Les gouvernements se sont toujours employés à réorienter la recherche vers certains domaines tels que la santé, l'agriculture et, assurément, la défense. La guerre est l'un des exemples les plus explicites de choc systémique qui altère les préférences en matière d'innovation à travers un écosystème. Le Gouvernement des États-Unis d'Amérique a réagi à la Seconde Guerre mondiale en mobilisant l'écosystème de l'innovation en vue de mettre au point des technologies à usage militaire. Mais il a également favorisé la mise au point de technologies de la communication et médicales, qui ont eu des applications immédiates sur des marchés non militaires (voir le chapitre 2)<sup>31</sup>.

#### 1.4 Comment une politique peut-elle orienter la trajectoire de l'innovation ?

Les ressources économiques, limitées, ne sont pas affectées à parts égales aux différents domaines ou secteurs scientifiques. L'affectation des fonds et des

**Le responsable qui décide à quelles possibilités technologiques donner la priorité en matière d'affectation de ressources détermine en dernier ressort la trajectoire de l'innovation. Les politiques d'innovation sont conçues pour définir ces priorités**

talents régit la manière dont les écosystèmes orientent la trajectoire de l'innovation<sup>32</sup>. Le responsable qui décide à quelles possibilités technologiques donner la priorité en matière d'affectation de ressources détermine en dernier ressort la trajectoire de l'innovation. Les politiques d'innovation sont conçues pour définir ces priorités.

La présente section commence par passer en revue les grandes catégories d'instruments de politique générale disponibles pour favoriser l'innovation. Elle examine ensuite la question de la non-prise de position en matière d'innovation, en terminant par le rôle joué par les instruments en question pour stimuler la demande de certaines technologies.

#### Instruments de politique générale en matière d'innovation

Les décideurs qui veulent fixer la trajectoire de l'innovation ont à leur disposition tout un ensemble d'instruments de politique générale. La présente sous-section les passe en revue en termes généraux et les relie au cycle global de l'innovation – depuis la phase de gestation jusqu'à celle de la maturité – présenté dans la figure 1.5. Les instruments en question sont les politiques d'innovation conçues pour favoriser la découverte, atténuer les risques et encourager une adoption et une diffusion rapide.

#### Politiques favorisant la découverte

Les politiques favorisant la découverte scientifique et technologique sont le plus nécessaires lorsque l'incertitude en matière d'innovation et le risque associé sont maximaux. L'exemple le plus typique d'une politique de ce type est celui de la recherche publique menée dans les universités et les organismes de recherche publics. Un instrument de ce type permet aux gouvernements d'exercer une forte influence sur la trajectoire de l'innovation potentielle, en privilégiant un domaine par rapport à un autre. Mais les gouvernements peuvent devoir financer des programmes pendant des années avant de voir apparaître une découverte commercialement prometteuse. L'affectation des ressources doit être précédée d'un dialogue entre les décideurs et la communauté scientifique au sujet de la trajectoire à suivre.

Les marchés publics sont une approche plus directe. Par exemple, les gouvernements procèdent régulièrement à des achats directs pour encourager la mise au point de technologies de défense et aérospatiales. Les marchés peuvent être passés selon différentes modalités, de manière à permettre la concurrence ou la collaboration entre les divers acteurs de l'innovation. Dans ce dernier cas, des entreprises spécialisées et des universités, par exemple, créent un consortium pour livrer le produit innovant demandé. Cependant, cet instrument exige d'un gouvernement qu'il ait une connaissance technique

approfondie du produit à livrer et soit en mesure de gérer l'élaboration de contrats techniquement complexes, mais aussi le suivi de leur exécution.

Par ailleurs, les distinctions académiques – telles que les prix Nobel décernés dans différents domaines scientifiques – ou les brevets peuvent être des instruments indirects d'encouragement aux découvertes. Toutefois, étant donné qu'ils ne sont décernés qu'après une découverte ou une invention, les distinctions et les brevets ne peuvent guère influencer sur la trajectoire de la découverte.

Les instruments de politique générale évoqués ci-après peuvent également stimuler les découvertes, bien que leur impact se fasse généralement sentir davantage dans les phases ultérieures d'un cycle d'innovation.

### Politiques d'atténuation des risques et d'adoption rapide

Les politiques d'atténuation des risques peuvent sans doute être appliquées d'un bout à l'autre du cycle d'innovation. Mais elles sont probablement le plus efficaces dans les premières phases de la mise au point, après la découverte initiale. Les subventions pour la recherche-développement, les prêts à des conditions avantageuses – sans intérêt ou à taux d'intérêt inférieur à celui du marché – et les mesures d'incitation fiscale en faveur de la recherche-développement sont trois instruments classiques d'atténuation des risques. On en a un exemple avec les subventions accordées au titre de la recherche-développement aux entreprises mettant au point des vaccins contre la COVID-19 (voir le chapitre 3).

Les politiques d'adoption rapide visent non seulement à réduire le risque lié à l'innovation, mais aussi à accroître le nombre d'entreprises utilisant une technologie donnée. Même lorsqu'une technologie est suffisamment prometteuse pour être utilisée – c'est-à-dire que le risque lié à son adoption est faible –, son coût du moment peut en empêcher l'adoption. Au cours des premières phases, les nouvelles technologies sont généralement produites à une échelle réduite et d'une façon insuffisamment efficace, ce qui augmente les coûts et réduit l'éventuel bénéfice de ceux qui les adoptent. Les gouvernements peuvent intervenir pour doper la production d'une technologie donnée et, ce faisant, lui permettre d'atteindre une échelle suffisante pour que cette dernière devienne rentable. Par exemple, pendant la Seconde Guerre mondiale, le Gouvernement des États-Unis d'Amérique a fourni les subventions et les prêts à des conditions avantageuses nécessaires pour développer les capacités de production de pénicilline des entreprises pharmaceutiques qui hésitaient à investir dans ce qui était alors un médicament antibiotique novateur (voir le chapitre 2). Les subventions, les prêts à des conditions avantageuses et les mesures d'incitation fiscale sont aussi des exemples de politiques d'adoption qui

peuvent être appliquées du côté de l'offre pour inciter directement les entreprises à adopter une nouvelle technologie à utiliser en recherche-développement ou en tant qu'équipement.

D'un autre côté, les gouvernements peuvent décider de réduire le risque ou d'encourager l'adoption d'une façon indirecte, en stimulant la consommation des biens et services qui incorporent une innovation souhaitée. Au nombre de ces politiques d'adoption indirectes figurent les subventions publiques versées aux producteurs pour contenir la hausse des prix de vente au détail et les subventions versées aux consommateurs pour les inciter à acheter. Dans le premier cas, on peut citer l'exemple de l'aide fournie par le Gouvernement allemand aux fabricants de panneaux solaires; dans le second cas, un grand nombre de gouvernements ont subventionné l'achat de véhicules électriques pour attirer davantage de clients (voir le chapitre 3).

De plus, les gouvernements peuvent influencer l'acceptation au moyen de programmes d'enseignement financés par des fonds publics et dispensés dans les universités et les instituts de formation technique. Ces programmes ont des incidences sur le coût et la disponibilité de la main-d'œuvre qualifiée et promeuvent l'initiative privée dans certains domaines. Les écoles d'informatique de Californie ont fourni aux secteurs de la Silicon Valley des informaticiens et des ingénieurs en informatique qualifiés – et moins chers. En outre, ces écoles ont poussé une génération d'entrepreneurs de la Silicon Valley à fonder un grand nombre des géants de l'informatique d'aujourd'hui.

Les instruments de propriété intellectuelle peuvent également faire partie intégrante d'une stratégie de politique d'adoption. Les brevets permettent de dissocier la découverte d'une innovation de son adoption. Les inventeurs n'ont pas besoin de créer une entreprise pour appliquer la technologie: ils peuvent laisser ce soin à autrui. L'innovation donne ainsi lieu à une spécialisation, les inventeurs pouvant continuer de faire ce qu'ils font bien et vendre leurs inventions à des entrepreneurs plus expérimentés.

Les gouvernements élaborent différents instruments de politique générale pour stimuler la découverte et, de manière complémentaire, encourager l'adoption en fournissant des modèles de licences à différents utilisateurs potentiels. Par exemple, les organismes de recherche publics – travaillant sous contrat avec l'État – peuvent appliquer différents modèles de licences à des secteurs ou des entreprises spécifiques afin de réduire le coût de l'adoption pour ceux et celles qui sont ciblés. L'Agence spatiale des États-Unis d'Amérique, la NASA, offre des conditions de licence différentes selon les entrepreneurs, y compris une série différente de redevances de licence; par exemple, elle accorde souvent des licences d'exploitation gratuites à des jeunes pousses auxquelles des projets de la NASA ont donné naissance.

Les marques et les dessins et modèles industriels peuvent également inciter à l'adoption en donnant à ceux qui sont les premiers à le faire la possibilité de monnayer leur avantage<sup>33</sup>. Tel a été le cas du secteur des smartphones, dans lequel des entreprises comme Apple ou Samsung comptent sur leurs dessins et sur la connaissance de leur marque par le public, en même temps que sur l'innovation du produit, pour préserver leur position sur le marché.

### Politiques de diffusion

Le succès de la diffusion d'une technologie se mesure au fait que la plupart des entreprises l'adoptent comme norme sectorielle. Dans le cas d'une technologie générique, plusieurs autres secteurs commencent également à l'adopter. Les gouvernements peuvent influencer sur la diffusion en recourant à la formation du personnel, aux subventions, aux prêts, aux crédits d'impôt et aux marchés directs. La diffusion de technologies ayant fait leurs preuves dans le secteur d'origine devrait généralement être moins risquée et les coûts afférents à leur adoption devraient être plus faibles. Aussi peut-on s'attendre à une participation financière plus importante de la part des acteurs privés.

### Les politiques d'innovation peuvent-elles être sans incidence sur le marché ?

Le débat sur les politiques d'innovation a été largement nourri par l'analyse économique selon laquelle la production de connaissances a les caractéristiques d'un bien public, dans la mesure où ces connaissances peuvent être reproduites facilement et à peu de frais<sup>34</sup>. Cela implique toutefois que les entreprises privées et les particuliers peuvent avoir du mal à tirer des dividendes de leurs innovations, car d'autres peuvent profiter des connaissances acquises sans avoir eu à participer financièrement à leur production.

Ainsi, les entreprises innovantes devraient pouvoir profiter de l'écosystème global de l'innovation du fait que les connaissances qu'elles créent se diffusent dans d'autres entreprises, y compris les fournisseurs et les concurrents. Mais elles doivent faire face à une concurrence accrue de la part de rivales qui n'ont pas eu à supporter le coût de la mise au point d'une nouvelle technologie ayant fait ses preuves et risquent même d'être distancées par elles. Bien des économistes considèrent qu'une telle situation supprime l'incitation économique à l'investissement dans une innovation, créant de ce fait ce qu'ils appellent une "défaillance du marché" qui appelle une intervention au niveau de la politique générale destinée à y remédier.

L'idée selon laquelle il convient de remédier aux "défaillances du marché" liées à l'innovation a largement dominé la recherche et le débat concernant les politiques

en matière d'innovation. Or, les débats de politique économique n'ont abouti qu'à un très petit nombre de propositions concernant la destination des investissements dans l'innovation. Pour d'autres économistes, au contraire, la trajectoire de l'innovation n'est pas l'affaire des politiques publiques; ils estiment que celles-ci ne devraient pas avoir d'incidence sur le marché<sup>35</sup>.

Une politique d'innovation sans incidence sur le marché vise à stimuler la production de nouvelles connaissances et technologies sans altérer la structure actuelle du marché – c'est-à-dire sans modifier le statu quo sur le marché ou favoriser un participant par rapport à un autre<sup>36</sup>. Par exemple, de nombreuses politiques en matière d'innovation s'appliquent à maintenir ce statu quo en appuyant la recherche scientifique et technique menée dans les universités et les organismes de recherche publics, tout en refusant de faire de même pour les entreprises privées. Il convient, en effet, de laisser chaque entreprise libre de décider de la possibilité technologique à exploiter. Dans la pratique, toutefois, il est très difficile pour une politique publique d'être totalement sans incidence sur le marché. Les changements d'orientation de la recherche scientifique et technique pourraient modifier la trajectoire de l'innovation.

De plus, les politiques d'innovation "sans incidence sur le marché" présentent une distorsion implicite. Laissées à elles-mêmes, les entreprises privées choisiront très probablement les projets d'innovation dont elles pourront tirer des gains financiers plus sûrs et plus rapides. Comme on l'a vu plus haut, il est peu probable que le marché choisisse des technologies nouvelles potentiellement perturbatrices qui comportent plus d'incertitudes et de risques plutôt que des technologies bien établies et ayant fait leurs preuves. Les politiques d'innovation sans incidence sur le marché risquent de réduire la diversité et l'horizon des investissements à un niveau peu souhaitable du point de vue de la société. Cette même distorsion favorise l'innovation ultérieure dans les filières technologiques déjà rentables et décourage l'innovation ultérieure dans des filières nouvelles, renforçant de ce fait une dynamique sans prise de risque<sup>37</sup>.

En conclusion, les politiques d'innovation sans incidence sur le marché semblent être en contradiction avec la pratique générale. Plusieurs pays parmi les plus industrialisés – les États-Unis d'Amérique, les pays d'Europe occidentale, le Japon et la Chine, pour ne citer qu'eux – ont toujours voulu qu'une partie importante de leurs investissements publics en matière de recherche-développement serve à créer ou à stimuler certaines technologies et leurs marchés complémentaires dans des domaines tels que la défense nationale, la santé publique ou l'agriculture<sup>38</sup>. De même, les décideurs sont depuis quelques années davantage portés à fournir un appui financier direct aux secteurs à forte intensité de recherche-développement essentiels pour la sécurité nationale, tels que les semiconducteurs<sup>39</sup>.

Il s'ensuit que les spécialistes sont de plus en plus nombreux à considérer que les politiques en matière d'innovation doivent servir à créer ou façonner le marché, et non simplement à remédier à ses défaillances<sup>40</sup>. Cela étant, des informations peu fiables – des données inexactes, incomplètes ou erronées, par exemple – et le fait qu'une innovation reste entourée d'une grande incertitude ne peuvent que limiter la mesure dans laquelle les gouvernements peuvent orienter l'innovation dans un sens socialement souhaitable.

### Politiques axées sur la demande et sur une mission

Les politiques d'innovation axées sur la demande sont souvent appelées en termes généraux "politiques axées sur une mission". Elles se caractérisent essentiellement par une centralisation de la prise de décision et la concentration des ressources sur la réalisation d'un seul objectif. En d'autres termes, la trajectoire de l'innovation est fixée par le gouvernement, qui est la principale source de la demande pour une innovation ciblée<sup>41</sup>.

La recherche médicale menée par l'Office of Scientific Research and Development (OSRD) des États-Unis d'Amérique, créé pour mobiliser la science civile pendant la Seconde Guerre mondiale, et le programme d'alunissage de la NASA sont deux des meilleurs exemples de programmes axés sur une mission. Ces études de cas – dont il sera question plus en détail au chapitre 2 – montrent comment des programmes axés sur une mission élaborés par un gouvernement peuvent favoriser et orienter l'innovation vers la mise au point de solutions technologiques spécifiques. Ces programmes avaient des objectifs clairs et réalisables, avaient une portée nationale et impliquaient un sous-ensemble de secteurs. Par exemple, le rôle du gouvernement a consisté à résoudre le problème du coût extrêmement élevé de la mise au point des technologies nécessaire à l'exploration de l'espace. Ce coût tenait à l'échelle et à la durée des activités à entreprendre pour mettre au point des technologies sans précédent dont l'application était circonscrite et extrêmement spécialisée<sup>42</sup>.

Selon certains économistes, les instruments des politiques axées sur la demande pourraient également servir à remédier aux grands problèmes sociaux, environnementaux et économiques complexes auxquels le monde doit faire face, ceux que l'on appelle parfois "les grands défis"<sup>43</sup>. Ils sont classés comme grands et complexes parce qu'ils sont extrêmement imbriqués et omniprésents, mais, surtout, parce qu'ils appellent des mesures urgentes et coordonnées<sup>44</sup>. Par exemple, il n'est pas possible de régler les problèmes environnementaux mondiaux sans coordination entre les États, les secteurs et les disciplines.

Les gouvernements doivent adopter d'un commun accord des solutions mondiales, les entreprises doivent définir des normes et des pratiques optimales pour l'ensemble de leurs chaînes de valeur mondiales, et les scientifiques et techniciens spécialisés dans différents domaines – énergie, diversité biologique ou météorologie, pour ne citer que ceux-là – doivent collaborer à la production de solutions nouvelles (voir le chapitre 3).

Dans une certaine mesure, il convient de dépasser les politiques publiques si l'on veut relever les grands défis<sup>45</sup>. Plusieurs économistes spécialistes de l'innovation estiment que les politiques axées sur une mission n'y suffiront pas<sup>46</sup>. Ce qu'il faut, ce sont des programmes ambitieux et pouvant compter sur des ressources financières importantes qui fassent des politiques publiques l'un des éléments d'une solution, tout en prenant acte de la nécessité d'une concertation des différents acteurs au sein de l'écosystème de l'innovation<sup>47</sup>. Cela suppose inévitablement la participation des entreprises privées, des universités et des instituts de recherche, des sociétés civiles, des particuliers et de la communauté internationale aux changements à apporter à l'échelle mondiale. Pour que tous ces éléments puissent collaborer, il faut mettre en place un mécanisme (ou plusieurs) capable de coordonner les priorités et les dotations en ressources des différents programmes. Malheureusement, on ne peut pas encore citer d'exemple d'un grand défi qui aurait été complètement relevé à l'aide des seules politiques en matière d'innovation. Néanmoins, les mesures prises dans le cadre de la coopération et des accords internationaux soulignent la nécessité d'efforts concertés à l'échelle mondiale pour relever ces défis. Par exemple, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques ou les initiatives relatives au carburant durable d'aviation de l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) montrent que la communauté internationale est déterminée à atteindre les objectifs de réduction des émissions de carbone et de lutte contre les changements climatiques.

### 1.5 Les pays en développement et la trajectoire de l'innovation

On peut avancer que les pays en développement à faible revenu et à revenu intermédiaire appliquent, comme n'importe quel autre pays, deux méthodes principales en matière d'innovation, à savoir l'adaptation de technologies étrangères ou la mise au point de technologies locales. Pourtant, les pays en développement, en particulier les plus pauvres d'entre eux, ne ressemblent pas aux pays développés. Les problèmes à résoudre par l'innovation sont très différents. L'aptitude des pays en développement à absorber ou produire des solutions technologiques qui leur permettent de répondre à leurs besoins socioéconomiques propres dépend de leur écosystème de l'innovation et de la

# L'aptitude des pays en développement à absorber ou produire des solutions technologiques qui leur permettent de répondre à leurs besoins socioéconomiques propres dépend de leur écosystème de l'innovation et de la mesure dans laquelle celui-ci est connecté aux réseaux d'innovation mondiaux

mesure dans laquelle celui-ci est connecté aux réseaux d'innovation mondiaux<sup>48</sup>.

Dans certains cas, les acteurs du marché et autres acteurs peuvent disposer en interne d'une capacité locale d'innovation pour recenser, assimiler et exploiter les nouvelles technologies mises au point ailleurs ou produire les innovations eux-mêmes. En raison de leur faible pouvoir d'achat, ils peuvent avoir du mal à accéder aux innovations mondiales pour répondre à leurs besoins. Les infrastructures de base, telles que les routes, l'électricité ou les soins médicaux, et d'importantes institutions comme un secteur financier efficace peuvent laisser à désirer ou être inexistantes, rendant certaines technologies étrangères moins bien adaptées à leurs besoins. L'innovation peut alors devoir impliquer un faible niveau de qualification et une échelle généralement petite, et cibler certaines communautés ou régions.

Dans d'autres cas, les acteurs de l'écosystème de l'innovation peuvent avoir accès à différents niveaux

de capacité d'innovation. Ces pays – appartenant généralement à la catégorie des pays à revenu intermédiaire – peuvent tirer parti de leurs capacités scientifiques, de leur capital technologique et de leur main-d'œuvre qualifiée pour combler l'écart technologique entre eux et les pays les plus avancés. Tel a été le cas du secteur de l'informatique dans les nombreux pays d'Asie de l'Est qui – comme on le verra plus en détail au chapitre 2 – ont réussi à s'intégrer pleinement à l'économie mondiale et devenir des participants actifs et essentiels des chaînes de valeur mondiales<sup>49</sup>. Un petit nombre d'entre eux – dont la Chine et l'Inde – sont devenus des sources d'innovation dans plusieurs domaines technologiques et participent activement aux réseaux d'innovation mondiaux en fournissant des connaissances scientifiques, des technologies et des biens et équipements faisant appel à des technologies avancées<sup>50</sup>.

## Adaptation des technologies étrangères

L'adaptation des technologies étrangères aux besoins des marchés des pays en développement est généralement limitée à certaines améliorations venant s'ajouter à la technologie initiale. Mais toutes les technologies étrangères ne sont pas facilement transposables dans les pays en développement.

Les innovations venues d'ailleurs ne répondent pas nécessairement toutes aux besoins des pays en développement. Les innovations de pays très innovants – essentiellement des pays d'Europe occidentale, d'Amérique du Nord et d'Asie de l'Est – sont conçues pour des pays dont les industries sont généralement à forte intensité capitaliste du fait de salaires relativement élevés; qui disposent de la main-d'œuvre qualifiée nécessaire pour mettre en œuvre et exploiter les innovations; qui ont des processus de production à grande échelle utilisant des infrastructures de qualité, et dont les consommateurs ont un pouvoir d'achat plus élevé<sup>51</sup>. En revanche, comme il a déjà été indiqué, les pays en développement disposent généralement d'une main-d'œuvre relativement abondante, mais moins qualifiée; leur économie est segmentée en secteurs aux besoins différents; leurs infrastructures laissent à désirer ou sont inexistantes, et le pouvoir d'achat de leurs consommateurs est relativement faible. Ces différences font souvent que les technologies de pointe sont moins adaptées aux besoins des pays pauvres<sup>52</sup>.

La question de l'adoption de l'automatisation de l'industrie de l'habillement en Afrique du Sud en fournit un exemple. Les entreprises de vêtements sud-africaines se sont orientées vers une production grosse consommatrice de capitaux, mais l'adoption des technologies d'automatisation a été limitée. La difficulté d'accéder au capital, l'irrégularité des volumes de commandes, l'absence d'aide de l'État, la faiblesse des marges et la faible rentabilité de ce secteur en

général sont quelques-uns des facteurs qui expliquent l'absence d'automatisation<sup>53</sup>.

Même lorsqu'elle est adaptée aux besoins locaux, l'innovation de pointe est souvent onéreuse. L'adaptation des technologies de pointe pour les rendre abordables exige des connaissances techniques très poussées. Le prix étant l'une des principales difficultés, la plupart des activités d'innovation visent à réduire les coûts, soit en utilisant des intrants moins onéreux, par exemple en remplaçant les matières premières initiales par des matières locales, soit en supprimant certaines caractéristiques d'une technologie donnée pour ne laisser que l'essentiel. Les économistes qualifient souvent ces innovations de "frugales" "jugaad" (terme indien désignant une innovation non conventionnelle) ou "du bas de la pyramide", car leur production tient compte des besoins et du pouvoir d'achat locaux<sup>54</sup>.

Un exemple d'innovation "frugale" est fourni par Transsion – fabricant de téléphones portables et fournisseur de services de téléphonie mobile chinois basé à Shenzhen –, qui a adapté des téléphones portables pour le marché africain. Relativement peu connu en Chine, Transsion a conquis plus de 40% du marché de la téléphonie mobile en Afrique, devant le pion aux Apple, Huawei, Nokia, Samsung et Xiaomi, en particulier pour le segment du marché à faible coût<sup>55</sup>. Cette entreprise chinoise a compris qu'un grand nombre de consommateurs africains demandaient des téléphones portables à faible coût, mais aussi une technologie qui remédie aux problèmes tels que la faiblesse du signal et la faible extension du réseau, ainsi que l'instabilité de l'accès à l'électricité. Elle a produit des téléphones accessibles offrant une bonne réception du signal, une autonomie importante et des applications conçues spécifiquement en fonction des préférences du marché local<sup>56</sup>.

Par ailleurs, les pays en développement sont très hétérogènes : il existe un large fossé entre les pays émergents à forte croissance et les pays les moins avancés. Les technologies des pays en développement peuvent être transférées à d'autres, mais ce transfert ne peut réussir que si les besoins et les compétences du pays de destination sont similaires à ceux de la source.

Par exemple, en tant que pays émergent connu pour sa production et ses innovations agricoles, le Brésil a mis au point des techniques agricoles pouvant être considérées comme utiles à d'autres pays en développement et conformes à leurs besoins. Plusieurs décideurs et groupements d'intérêts industriels africains espéraient utiliser des tracteurs brésiliens, qui sont particulièrement bien adaptés aux grandes surfaces agricoles labourées, et des planteuses manuelles simples appelées matracas, qui peuvent être utilisées sur des terres non labourées et sur des surfaces plus petites et dispersées. Toutefois, l'adoption des tracteurs, qui demandent un important

effort d'entretien et de formation, a échoué – mais les matracas ont donné d'assez bons résultats. Les caractéristiques de l'agriculture africaine expliquent en partie ces résultats. Elle se distingue, en effet, par ses petites surfaces et utilise une main-d'œuvre peu qualifiée et abondante et des matières, ressources et connaissances locales<sup>57</sup>.

### Les solutions doivent tenir compte de la dimension locale

Il existe un point commun entre les exemples susmentionnés : les problèmes locaux exigent des solutions conformes aux situations locales. Ces situations sont souvent la difficulté d'accéder à un financement ; l'insuffisance des infrastructures de fourniture d'énergie, de transport et de télécommunications, et une pénurie de main-d'œuvre qualifiée, pour ne citer que celles-là. De plus, dans les pays en développement, l'innovation doit, si elle entend répondre aux besoins locaux, associer les acteurs autres que les acteurs du marché, tels que les instituts de recherche, les organismes publics et les organisations non gouvernementales (ONG).

Un exemple d'innovation adaptée aux besoins sociaux locaux réussie est dû à M-PESA, qui est un service kényan de paiement par téléphone mobile s'adressant aux personnes n'ayant pas accès à un système bancaire et travaillant généralement dans le secteur non structuré<sup>58</sup>. Il exploite la technologie de téléphonie mobile des services de minimessages (SMS) pour assurer en toute sécurité un transfert électronique de fonds sur presque tous les téléphones portables. L'adoption de M-PESA a été rapide parce que cette innovation était adaptée aux besoins d'un marché local qui tenait beaucoup à accéder à un système financier<sup>59</sup>. Ce partenariat public-privé – qui associait une entreprise étrangère, une filiale locale, une institution de microfinancement locale et une importante banque d'Afrique de l'Est – a été conclu en consultation avec des acteurs du marché et autres acteurs, tels que des institutions de microfinancement, des ONG et les organes chargés de la réglementation des secteurs concernés. L'Autorité des communications du Kenya, qui est l'organisme de réglementation des TIC, a joué un rôle déterminant pour légitimer la plateforme et en promouvoir la diffusion<sup>60</sup>.

Par ailleurs, il est fréquent que les pays en développement ne soient pas dotés d'institutions pouvant faciliter et appuyer l'innovation, laissant cette activité au secteur non structuré<sup>61</sup>. Mais les innovations produites dans ce dernier secteur peuvent ne pas se prêter à une application sur une plus grande échelle. Souvent, les innovations de ce type ne sont pas étayées par des articles scientifiques, des bulletins techniques ou des brevets, ce qui rend extrêmement difficiles leur reproduction et leur diffusion. Elles échappent souvent

à l'attention des décideurs intéressés par l'innovation, car il est difficile de leur appliquer les indicateurs d'innovation habituels, tels que les investissements en recherche-développement, le recensement de la main-d'œuvre qualifiée ou les publications scientifiques et les brevets. C'est la raison pour laquelle ces innovations locales sont souvent désignées sous l'appellation d'innovations "invisibles"<sup>62</sup>.

Il ne faudrait pas considérer l'adaptation aux besoins locaux comme une innovation de qualité inférieure. L'adaptation locale de technologies étrangères peut déboucher sur des innovations qui sont tout aussi utiles pour les pays industrialisés. On parle alors souvent d'"innovation inverse". Lorsqu'il s'est agi d'adapter ses électrocardiographes et ses appareils à ultrasons pour les consommateurs ruraux en Inde et en Chine, l'entreprise américaine GE a fait reconfigurer les technologies par ses filiales indienne et chinoise pour produire des appareils plus petits et moins chers. Les résultats ont été si bons que GE s'est mise à vendre également ces appareils adaptés aux consommateurs des pays à revenu élevé<sup>63</sup>. On peut aussi citer les exemples du modèle de voiture Dacia Logan de Renault, qui avait été conçu pour les marchés des pays à faible revenu d'Europe de l'Est et qui a ensuite très bien marché en France, ou des nouilles séchées à bas prix et à faible teneur en matières grasses Maggi de Nestlé, qui étaient destinées à être vendues dans les zones rurales du Pakistan et de l'Inde, mais qui se sont également très bien vendues en Nouvelle-Zélande et en Australie.

Il est de plus en plus manifeste que les technologies numériques s'avéreront être une nouvelle technologie générique, et c'est là une source d'espoir. Une quatrième révolution industrielle basée sur ces technologies est susceptible de produire des gains de productivité de toutes sortes dans un très grand nombre de secteurs. Elles pourraient inciter les secteurs privé et public à fournir des solutions techniques pour relever les défis liés à la santé, à l'éducation et aux changements climatiques. Elles devraient également transformer la manière dont les gouvernements conçoivent les politiques d'innovation et fournissent des services publics dans ces domaines. Ces questions sont examinées plus avant au chapitre 3.

## 1.6 La trajectoire de l'innovation future

L'innovation peut assurément aider à résoudre ou, tout au moins, à atténuer les grands défis du monde actuel, que ce soit les changements climatiques, l'inégalité, la nécessité d'augmenter la production alimentaire ou celle d'améliorer l'accès à l'eau, aux soins de santé et à l'éducation. Néanmoins, on ne pourrait sans doute pas se contenter d'élever le rythme du progrès technique. Plusieurs de ces défis ressemblant à des biens publics, il ne faut pas s'attendre à ce que le secteur privé alloue des ressources d'innovation suffisantes pour y remédier. Certains de ces défis, notamment les changements climatiques, ne sauraient être relevés par les secteurs privé et public d'un seul pays. Les politiques d'innovation visant à lutter contre les changements climatiques pourraient bénéficier à tous les pays, mais nul n'en bénéficiera si elles ne sont mises en œuvre que par quelques-uns. On peut avancer que la même logique s'applique aux investissements liés à l'innovation dans l'un quelconque des grands défis. Il semble donc qu'il y aurait de bonnes raisons d'élaborer des politiques d'innovation internationales et multilatérales qui énoncent les principales orientations<sup>64</sup>.

## Notes

- 1 Selon le modèle d'Acemoglu (2011), le progrès technologique est probablement trop peu diversifié, car les entreprises n'investissent pas dans les technologies de substitution, même lorsque l'on peut prévoir que le succès sera au rendez-vous. Ses recherches théoriques lui ont permis de constater que, si elles tirent parti d'innovations en vue d'un gain à court terme, les entreprises n'internalisent pas pleinement les avantages futurs à tirer de ces innovations de substitution, car les innovations actuelles arrivées à maturité seront probablement approfondies avant que les technologies de substitution ne puissent être commercialisées avec profit.
- 2 Le rôle joué par les gouvernements est très variable selon les secteurs dont il s'agit. Pour une analyse de la question, voir Nelson (2011).
- 3 Voir Agarwal et Gaule (2021).
- 4 Cohen et Levinthal (1990) examinent la dualité de la recherche-développement des entreprises privées en termes d'intrants d'innovation et de capacité d'absorption. Crepon *et al.* (1998) étudient de façon empirique les liens entre la capacité d'absorption, les intrants et extrants de recherche-développement, et la productivité.
- 5 Il s'agit là de cadres largement compatibles renvoyant à un environnement complexe d'acteurs de l'innovation. Edquist (1997), Carlsson *et al.* (2002), Bikar *et al.* (2006), Godin (2006) et Sharif (2006) procèdent à des revues détaillées de la littérature concernant les environnements d'innovation. Les principaux cadres conceptuels sont les suivants : "National Innovation System" (Pavitt, 1984; Freeman, 1995; Lundvall, 1988; Nelson, 1993); "Knowledge-based Economy" (David et Foray, 1995; Foray, 2018); "New Production of Knowledge" (Gibbons *et al.*, 1994), et "Triple Helix" (Leydesdorff et Etzkowitz, 1996). Les fondateurs des cadres "National Innovation System" et "Knowledge-based Economy" se sont découvert beaucoup de points communs (Foray et Lundvall, 1996), une fois mise de côté l'analyse sur les savoirs implicites et les savoirs codifiés (Cowan *et al.*, 2000; Cowan et Foray, 1997; Johnson *et al.*, 2002). Les fondateurs du cadre "Triple Helix" ont émis l'idée de l'existence de similitudes d'analyse avec les cadres "National Innovation System" et "Knowledge-based Economy", tout en revendiquant l'adoption d'une approche plus générale (Etzkowitz et Leydesdorff, 2000; Leydesdorff et Meyer, 2006).
- 6 Le Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2019 (OMPI, 2019, chapitre 1) donne un aperçu de l'interaction entre la géographie et l'innovation. Les cadres conceptuels "Regional Innovation system" (Cooke, 1992) et "Local Innovation System" (Breschi et Lissoni, 2001) reconceptualisent un environnement de l'innovation géographiquement limité aux niveaux infranationaux.
- 7 Les cadres conceptuels "Sectoral Innovation System" (Breschi et Malerba, 1997; Malerba, 2002) et "Technological Innovation System" (Carlsson, 1997; Carlsson et Jacobsson, 1997) reconceptualisent l'environnement de l'innovation pour les mêmes secteurs – y compris les chaînes d'approvisionnement internationales – ou les ensembles de technologies connexes. Dans le même esprit, le Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2017 (OMPI, 2017) examine la circulation des actifs incorporels (notamment les connaissances et l'innovation) au sein des chaînes de valeur mondiales.
- 8 Le Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2019 de l'OMPI passe en revue les réseaux d'innovation mondiaux qui relient entre eux les pôles de concentration de l'innovation les plus denses du monde (OMPI, 2019, chapitre 1). Plusieurs cadres conceptuels englobent explicitement la dimension internationale de l'innovation (voir Amable *et al.*, 1997; Barnard et Chaminade, 2012; Carlsson, 2006).
- 9 Kline et Rosenberg (1986) le définissent comme "les connaissances accumulées", en y incluant la "science connue" et les "connaissances mémorisées". Ce dernier terme englobe "les connaissances déjà assimilées par les membres de l'entité considérée". Schmookler (1962a) va plus loin en indiquant que "[l']"état de la connaissance" comprend non seulement la science et la technique, mais aussi n'importe quel autre aspect de la pensée, comme l'art et la religion, qui affecte la perception qu'a l'homme de l'univers matériel".
- 10 Hedy Lamarr a mis au point plusieurs inventions tout en étant une célèbre actrice d'Hollywood. En 1941, elle a déposé une demande de brevet pour l'une d'elles en tant que Markey Hedy Kiesler, brevet qui lui a été délivré en 1942.
- 11 Acemoglu (2010) fait référence à l'argument d'Habakkuk concernant le lien entre la pénurie de main-d'œuvre et les technologies permettant d'économiser la main-d'œuvre au XIX<sup>e</sup> siècle. Hicks et Marx considéraient tous deux que le coût du travail et du capital – le coût des facteurs – peut favoriser l'innovation (Antonelli, 2009; Dosi et Nelson, 2010).
- 12 Voir Scherer (1982) et Schmookler (1962a, 1962b).
- 13 Voir Schmookler (1962a).
- 14 Voir une analyse dans Nelson (2011).

- 15 Voir également Sampat (2015), et Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2015 (OMPI, 2015, chapitre 2).
- 16 Griliches (1980) a constaté une corrélation étroite et systématique entre les investissements des entreprises américaines dans la recherche-développement et divers indicateurs de productivité des entreprises. Griliches et Lichtenberg (1984) ont obtenu un résultat similaire pour 193 secteurs des États-Unis d'Amérique.
- 17 S'imposent ici les mises en garde habituelles concernant l'évaluation de l'orientation de la science à l'aide de vastes ensembles numérisés de publications scientifiques, tels que le Microsoft Academic Graph. En particulier, ces ensembles sont dépourvus d'une parfaite représentation géographique, linguistique ou concernant les différents domaines scientifiques. Pour ces derniers, il convient d'indiquer que les distinctions entre les différents domaines n'étaient pas aussi nettes il y a 200 ans. Dans les années 1800, les publications des savants amalgamaient sans problème des concepts issus des sciences exactes modernes et des sciences humaines. Les chiffres doivent donc être interprétés comme des tendances générales et être utilisés avec prudence.
- 18 Pour une présentation de l'innovation de l'impression 3D, voir le chapitre 3 du Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2015 (OMPI, 2015).
- 19 Voir les réflexions de Kuhn concernant Siegel (1962) et Multhauf (1959) au sujet du degré de proximité sans précédent et de plus en plus marqué entre la science et la technique depuis les années 1860.
- 20 Voir Dosi et Nelson (2010), Kline et Rosenberg (1986) et Pavitt (1984).
- 21 Voir Pavitt (1984).
- 22 Carlsson (1984) atteste l'incidence majeure des secteurs de ce type sur la productivité de l'industrie manufacturière.
- 23 Joseph Schumpeter (1942) examine de manière approfondie le concept de "destruction créatrice".
- 24 Le processus d'élargissement correspond aux premières impressions de Joseph Schumpeter selon lesquelles les nouveaux secteurs se composaient d'entreprises plus petites et plus jeunes. Tel a été le cas dans les premiers temps de l'industrie automobile, lorsqu'un secteur naissant reposait sur des ateliers de petite taille, presque artisanaux, qui rivalisaient pour promouvoir leurs produits. L'approfondissement correspond à ses impressions ultérieures concernant les mêmes secteurs, lorsque, par exemple, la même industrie automobile était caractérisée par de grandes entreprises bien établies. Malerba caractérise ces deux processus comme Schumpeter I et Schumpeter II (voir Breschi et Malerba, 1997; Malerba et Orsenigo, 1993).
- 25 "[L]a production de nouvelles connaissances implique d'importantes externalités qu'il est difficile de s'approprier, ce qui crée un large hiatus entre les taux de rendement social et privé des activités inventives. Ce hiatus, auquel s'ajoutent le grave risque et le spectre de l'aléa moral attachés au financement de la recherche-développement, se traduit par un sous-investissement systémique dans cette dernière, des taux d'innovation plus faibles que ceux qui sont socialement souhaitables et, de ce fait, un ralentissement de la croissance économique" (Trajtenberg, 2011).
- 26 Pour une analyse de la question des panneaux solaires dans l'industrie spatiale, voir le chapitre 2.
- 27 Perez (2003) examine la manière dont, sur le plan économique, les trajectoires technologiques prennent la forme d'ondes de "Kondratiev", c'est-à-dire d'ondes longues de technologie cumulative.
- 28 Pour approfondir la question des technologies génériques, voir Bresnahan (2010).
- 29 Les recherches menées par Jennifer Doudna et Emmanuelle Charpentier sur les séquences d'ADN en utilisant le système CRISPR (courtes répétitions en palindrome regroupées et régulièrement espacées)-Cas9 ont offert à la modification du génome une plateforme qui a révolutionné la recherche biologique. Leur découverte a valu à ces deux chercheuses le prix Nobel de chimie en 2020.
- 30 Schumpeter (1939) a étudié la complexité des facteurs externes influant sur les interactions entre les systèmes industriels et les cycles économiques. Ses réflexions se situent dans la perspective des chocs systémiques décrits dans la présente section.
- 31 Voir Gross et Sampat (2020).
- 32 La quantité et la qualité des ressources de recherche-développement investies dans différentes activités sont des dimensions du fonctionnement d'un système d'innovation. Les modalités d'organisation et d'administration des ressources allouées à la promotion du savoir-faire font partie intégrante du concept de système d'innovation (Nelson, 2011).
- 33 Ce mécanisme de stimulation de l'adoption est naturellement beaucoup moins direct et certain. Pour une analyse de la question, voir le Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2013 (OMPI, 2013).
- 34 Pour une analyse de la question de l'innovation en tant que bien public, voir Arrow (1962) et le Rapport sur la propriété intellectuelle dans le monde 2011 (OMPI, 2011).
- 35 "[D]ans le domaine de la recherche et des débats relatifs aux politiques, les trois décennies écoulées ont été dominées par l'argument selon lequel il doit être remédié aux défaillances du marché afin de parvenir au niveau souhaitable d'investissements,

- mais les politiques ne devraient pas aborder la question de la destination de ces investissements. Il est nettement préférable de laisser cette question au chaos magique de l'“horloger aveugle”. La notion même de politique de spécialisation ou d'initiative stratégique descendante est devenue un sujet tabou dans les débats relatifs aux politiques, en particulier dans les grandes réunions internationales définissant les politiques et à la Commission européenne” (Foray, 2011).
- 36 Ergas (1987) caractérise ces politiques sans incidence sur le marché comme “axées sur la diffusion”, à la différence des politiques “axées sur une mission” examinées dans la sous-section suivante.
- 37 Ergas (1987: 1).
- 38 Voir Foray (2011), Foray *et al.* (2012), Mowery et Nelson (1996) et Ergas (1987).
- 39 Voir, par exemple, la loi de 2021 sur l'innovation et la concurrence des États-Unis d'Amérique (*United States Innovation and Competition Act of 2021*) (USICA) et la loi de 2021 sur la création d'incitations efficaces à la production de semi-conducteurs pour l'Amérique (*Creating Helpful Incentives to Produce Semiconductors (CHIPS) for America Act of 2021*).
- 40 Mazzucato (2018) propose un outil d'aide à l'élaboration d'autres politiques en matière d'innovation qui prévoit que les programmes axés sur une mission remédient moins aux marchés existants qu'ils ne les façonnent, et “cocréent” des marchés complémentaires.
- 41 Ergas (1987).
- 42 Hertzfeld (2002).
- 43 Mazzucato (2018) tire les enseignements des politiques d'innovation axées sur une mission. Edquist et coauteurs (Edquist et Hommen, 1999; Edquist et Zabala-Iturriagoitia, 2012) soulignent l'importance des marchés publics de technologie.
- Acemoglu (2011) prévoit qu'un décideur optimisant les dividendes sociaux de l'innovation devra encourager la constitution d'un portefeuille d'innovations plus divers afin de générer un taux de croissance supérieur à celui qui est tiré du partage des marchés.
- 44 Voir Mazzucato (2018).
- 45 Les différents courants de pensée économique parviennent à une conclusion similaire lorsqu'ils traitent des questions relatives aux grands défis. Mais ils diffèrent quant à la manière d'aborder ces questions. Voir Aiginger et Rodrik (2020), Rodrik et Stantcheva (2021), Mowery (2012), Schot et Steinmueller (2018) et Mazzucato (2018).
- 46 Voir Diercks *et al.* (2019), Mowery (2012), Mowery *et al.* (2010), et Schot et Steinmueller (2018).
- 47 Voir Mowery *et al.* (2010).
- 48 Archibugi et ses coauteurs (1999) font valoir que les concepts de système d'innovation national et de mondialisation des activités innovantes devraient être analysés ensemble, même s'ils ont été élaborés de façon indépendante. Voir également OMPI (2019).
- 49 Voir aussi OMPI (2017) et Kaplinsky (2011) pour un aperçu de la manière dont ces pays moins avancés ont pu mettre en place des capacités d'absorption et d'innovation.
- 50 Voir Fu et Gong (2011), Kaplinsky (2011) et OMPI (2019, chapitre 2).
- 51 Voir Eckaus (1987), Emmanuel (1982), Kaplinsky (2011) et Stewart (1978).
- 52 Voir Acemoglu *et al.* (2002) et Stewart (1978).
- 53 Parschau et Hauge (2020).
- 54 Les concepts d'innovations “frugales”, “jugaad” et “du bas de la pyramide” ont tendance à se chevaucher. Mais les définitions de ces types d'innovation font apparaître de subtiles différences. Les spécialistes appellent “frugales” les innovations produites à l'aide d'intrants locaux et moins onéreux, “jugaad” les innovations répondant aux besoins les plus essentiels des pauvres et “du bas de la pyramide” les innovations adaptées au pouvoir d'achat inférieur des consommateurs des pays en développement. Une innovation “jugaad” est en substance une innovation “frugale” dans laquelle une dimension sociale est présente. Pour d'autres renseignements, voir Fu (2020), Kaplinsky (2011) et Martin (2016).
- 55 Voir IDC (2020) et Deck (2020).
- 56 Qumer et Purkayastha (2019).
- 57 Voir Cabral *et al.* (2016).
- 58 Dans M-PESA, on trouve le mot swahili *pesa* (espèces) et “M” signifie “mobile”.
- 59 M-PESA a été lancé en mars 2007 au Kenya. Le premier mois, il a enregistré plus de 20 000 clients. Deux ans plus tard, il comptait huit millions d'abonnés et disposait d'un réseau de 13 000 agents. Ces deux années-là, la plateforme a transféré plus de 3,7 milliards de dollars des États-Unis d'Amérique.
- 60 M-PESA a été créé à l'initiative du programme de responsabilité sociale des entreprises de la société de télécommunications britannique Vodafone, en vue de la réalisation des objectifs du Millénaire pour le développement. Le financement initial de cette initiative a été fourni sous la forme d'une subvention défilé de l'État, à savoir le Financing Deepening Challenge Fund du Ministère du développement international (DFID) du Royaume-Uni en 2003. Vodafone a versé au titre des coûts indirects afférents au personnel l'équivalent de la subvention d'un million de livres sterling. Pour d'autres renseignements, voir Hughes et Lonie (2007) et Onsongo (2019).
- 61 L'OIT (2018) estime que le secteur non structuré représente plus de 85% des emplois en Afrique.
- 62 Fu (2020).
- 63 Voir Chandran Govindaraju et Wong (2011) et Immelt *et al.* (2009).
- 64 Voir Foray (2011).

## Bibliographie

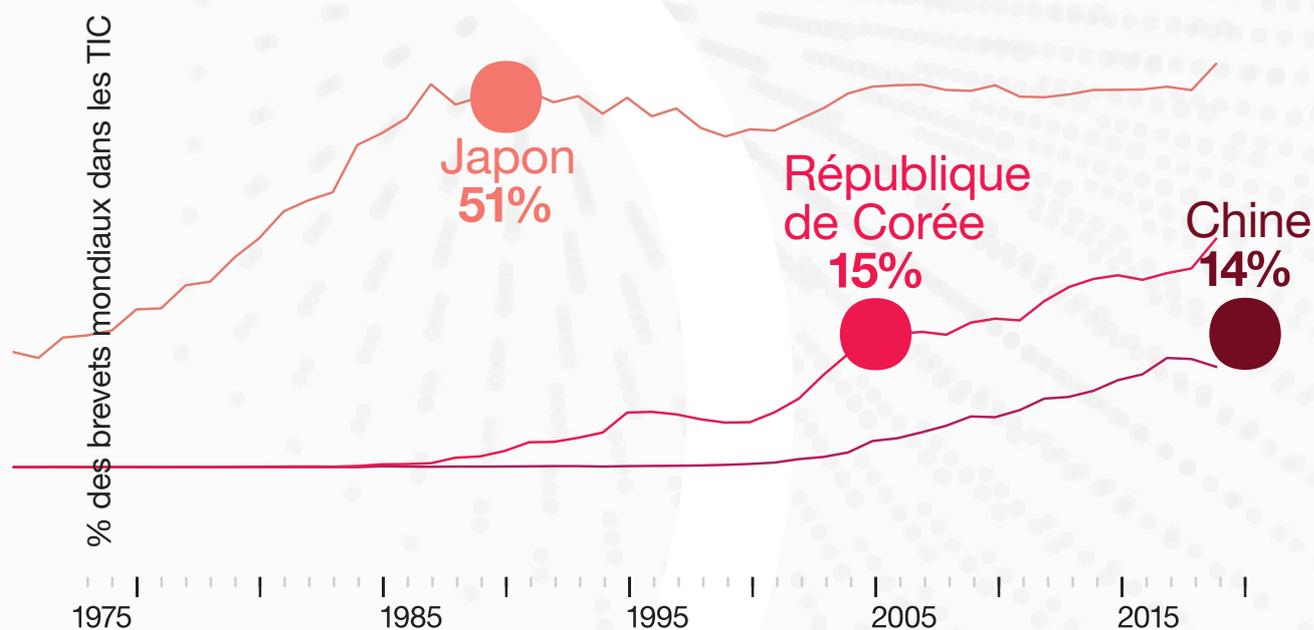
- Acemoglu, D. (2010). When does labor scarcity encourage innovation? *Journal of Political Economy*, 118(6), 1037–1078. DOI: <https://doi.org/10.1086/658160>.
- Acemoglu, D., Aghion, P. and F. Zilibotti (2002). Distance to frontier, selection, and economic growth. *Working Paper no. w9066*. National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w9066>.
- Acemoglu, D. (2011). Diversity and technological progress. In Lerner, J. and S. Stern (eds), *The Rate and Direction of Inventive Activity Revisited*. University of Chicago Press, 319–356. Available at: <http://www.nber.org/chapters/c12358>.
- Agarwal, R. and P. Gaule (2021). What Drives Innovation? Lessons from COVID-19 R&D. *IZA Discussion Paper*, no. 14069. Institute of Labor Economics (IZA). Available at: <https://ftp.iza.org/dp14079.pdf>.
- Aiginger, K. and D. Rodrik (2020). Rebirth of industrial policy and an agenda for the twenty-first century. *Journal of Industry, Competition and Trade*, 20, 189–207. DOI: <https://doi.org/10/ghbtcc>.
- Amable, B., R. Barré and R. Boyer (1997). *Les systèmes d'innovation à l'ère de la globalisation*. Paris: Economica.
- Antonelli, C. (2009). The economics of innovation: From the classical legacies to the economics of complexity. *Economics of Innovation and New Technology*, 18(7), 611–646.
- Archibugi, D., Howells, J. and J. Michie (1999). Innovation systems in a global economy. *Technology Analysis & Strategic Management*, 11(4), 527–539. <https://doi.org/10/cfhphh>.
- Arrow, K.J. (1962). The economic implications of learning by doing. *The Review of Economic Studies*, 29(3), 155–173. DOI: <https://doi.org/10.2307/2295952>.
- Barnard, H. and C. Chaminade (2012). Global Innovation Networks: Towards a taxonomy. *CIRCLE Working Papers*, no. 2011/04. Lund University.
- Bikar, V., H. Capron and M. Cincera (2006). An integrated evaluation scheme of innovation systems from an institutional perspective. In *DULBEA Working Papers*, no. 06-09.RS. ULB – Université Libre de Bruxelles. Available at: <https://ideas.repec.org/p/dul/wpaper/06-09rs.html>.
- Breschi, S. and F. Lissoni (2001). Knowledge spillovers and local innovation systems: A critical survey. *Industrial and Corporate Change*, 10(4), 975–1005.
- Breschi, S. and F. Malerba (1997). Sectoral innovation systems: Technological regimes, Schumpeterian dynamics, and spatial boundaries. In Edquist, C. (ed.), *Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations*, 130–156.
- Bresnahan, T. (2010). General purpose technologies. In Hall, B.H. and N. Rosenberg (eds), *Handbook of the Economics of Innovation: Volume 2*. North-Holland, 761–791. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169721810020022>.
- Cabral, L., A. Favareto, L. Mukwereza and K. Amanor (2016). Brazil's agricultural politics in Africa: More food international and the disputed meanings of “family farming”. *World Development*, 81, 47–60. DOI: <https://doi.org/10/gmprks>.
- Carlsson, B. (1984). The development and use of machine tools in historical perspective. *Journal of Economic Behavior & Organization*, 5(1), 91–114. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-2681\(84\)90028-3](https://doi.org/10.1016/0167-2681(84)90028-3).
- Carlsson, B. (1997). *Technological Systems and Industrial Dynamics*. Springer.
- Carlsson, B. (2006). Internationalization of innovation systems: A survey of the literature. *Research Policy*, 35(1), 56–67.
- Carlsson, B. and S. Jacobsson (1997). Diversity creation and technological systems: A technology policy perspective. In Edquist, C. (ed.), *Systems of Innovation: Technologies, Institutions and Organizations*, 266–294.
- Carlsson, B., S. Jacobsson, M. Holmen and A. Rickne (2002). Innovation systems: Analytical and methodological issues. *Research Policy*, 31(2), 233–245.
- Chandran Govindaraju, V.G.R. and C.-Y. Wong (2011). Patenting activities by developing countries: The case of Malaysia. *World Patent Information*, 33(1), 51–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2010.01.001>.
- Cohen, W.M. and D.A. Levinthal (1990). Absorptive capacity: A new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128–152.
- Cooke, P. (1992). Regional innovation systems: Competitive regulation in the new Europe. *Geoforum*, 23, 365–365.
- Cowan, R. and D. Foray (1997). The economics of codification and the diffusion of knowledge. *Industrial and Corporate Change*, 6(3), 595–622.
- Cowan, R., P.A. David and D. Foray (2000). The explicit economics of knowledge codification and tacitness. *Industrial and Corporate Change*, 9(2), 211–253.
- Crepon, B., E. Duguet and J. Mairesse (1998). Research, innovation and productivity: An econometric analysis at the firm level. *Economics of Innovation and New Technology*, 7(2), 115. DOI: <https://doi.org/10.1080/10438599800000031>.

- David, P.A. and D. Foray (1995). Assessing and expanding the science and technology knowledge base. *STI Review*, 16. Paris: OECD.
- Deck, A. (2020, June 23). Africa's phone phenom: Your guide to Transsion. *Rest of World*. Available at: <https://restofworld.org/2020/transsion-from-china-to-africa>.
- Diercks, G., H. Larsen and F. Steward (2019). Transformative innovation policy: Addressing variety in an emerging policy paradigm – ScienceDirect. *Research Policy*, 48(4), 880–894. DOI: <https://doi.org/10/ggpsk2>.
- Dosi, G. and R.R. Nelson (2010). Technical change and industrial dynamics as evolutionary processes. In Hall, B.H. and N. Rosenberg (eds), *Handbook of the Economics of Innovation: Volume 1*. North-Holland, 51–127. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-7218\(10\)01003-8](https://doi.org/10.1016/S0169-7218(10)01003-8).
- Eckaus, R.S. (1987). Appropriate technology: The movement has only a few clothes on. *Issues in Science and Technology*, 3(2), 62–71.
- Edquist, C. (ed.) (1997). *Systems of Innovation*. Routledge.
- Edquist, C. and L. Hommen (1999). Systems of innovation: Theory and policy for the demand side. *Technology in Society*, 21(1), 63–79. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0160-791X\(98\)00037-2](https://doi.org/10.1016/S0160-791X(98)00037-2).
- Edquist, C. and J.M. Zabala-Iturriagoitia (2012). Public procurement for innovation as mission-oriented innovation policy. *Research Policy*, 41(10), 1757–1769. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.04.022>.
- Emmanuel, A. (1982). *Appropriate or Underdeveloped Technology?* J. Wiley.
- Ergas, H. (1987). Does technology policy matter. In Guile, B.R. and H. Brooks (eds), *Technology and Global Industry: Companies and Nations in the World Economy*. Washington D.C.: National Academies Press, 191–245.
- Etzkowitz, H. and L. Leydesdorff (2000). The dynamics of innovation: From National Systems and “Mode 2” to a Triple Helix of university–industry–government relations. *Research Policy*, 29(2), 109–123.
- Fink, C. (2022). Calculating private and social returns to COVID-19 vaccine innovation. *WIPO Economic Research Working Paper No. 68*. World Intellectual Property Organization.
- Foray, D. (2011). Why is it so difficult to translate innovation economics into useful and applicable policy prescriptions? In Lerner, J. and S. Stern (eds), *The Rate and Direction of Inventive Activity Revisited*. University of Chicago Press, 673–678. Available at: <http://www.nber.org/chapters/c12378>.
- Foray, D. (2018). *L'économie de la connaissance: Vol. 3<sup>e</sup> éd. La Découverte*. DOI: <https://doi.org/10.3917/dec.foray.2018.01>.
- Foray, D. and B.A. Lundvall (1996). The Knowledge-Based Economy: From the Economics of Knowledge to the Learning Economy. In Neef, D. et al. (eds), *The Economic Impact of Knowledge*, 115–122.
- Foray, D., D.C. Mowery and R.R. Nelson (2012). Public R&D and social challenges: What lessons from mission R&D programs? *Research Policy*, 41(10), 1697–1702.
- Freeman, C. (1995). The ‘national system of innovation’ in historical perspective. *Cambridge Journal of Economics*, 19(1), 5–24. <https://doi.org/10/gdk2vr>.
- Fu, X. (2020). *Innovation under the radar: The nature and sources of innovation in Africa*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI:10.1017/9781316869482.
- Fu, X. and Y. Gong (2011). Indigenous and foreign innovation efforts and drivers of technological upgrading: Evidence from China – ScienceDirect. *World Development*, 39(7), 1213–1225.
- Gibbons, M.R., C. Limoges, H. Nowotny, S. Schwartzman, P. Scott and M. Trow (1994). *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*. Sage Publications Ltd.
- Godin, B. (2006). The knowledge-based economy: Conceptual framework or buzzword? *Journal of Technology Transfer*, 31(1), 17–30.
- Griliches, Z. (1980). Returns to research and development expenditures in the private sector. In Kendrick, J.W. and B.N. Vaccara (eds), *New Developments in Productivity Measurement and Analysis*. University of Chicago Press (for the National Bureau of Economic Research), 419–462. Available at: <http://www.nber.org/books/kend80-1>.
- Griliches, Z. and F. Lichtenberg (1984). R&D and productivity growth at the industry level: Is there still a relationship? In Griliches, Z. (ed.), *R&D, Patents, and Productivity*. University of Chicago Press, 465–502. Available at: <http://www.nber.org/chapters/c10062>.
- Gross, D.P. and B.N. Sampat (2020). Organizing Crisis Innovation: Lessons from World War II. *Working Paper no. 27909*. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w27909>.
- Hertzfeld, H.R. (2002). Measuring the economic returns from successful NASA life sciences technology transfers. *The Journal of Technology Transfer*, 27(4), 311–320. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1020207506064>.
- Hughes, N. and S. Lonie (2007). M-PESA: Mobile money for the “unbanked” turning cellphones into 24-Hour tellers in Kenya. *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, 2(1–2), 63–81. DOI: <https://doi.org/10/bknh2f>.

- IDC (2020, March 16). East Africa smartphone market records strong growth but global COVID-19 outbreak looks set to hit shipments. *IDC: The Premier Global Market Intelligence Company*. Available at: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prMETA46136320>.
- ILO (2018). *Women and men in the informal economy: A statistical picture, third edition*. Geneva: ILO. Available at [www.ilo.org/global/publications/books/WCMS\\_626831/lang--en/index.htm](http://www.ilo.org/global/publications/books/WCMS_626831/lang--en/index.htm).
- Immelt, J.R., V. Govindarajan and C. Trimble (2009, October 1). How GE is disrupting itself. *Harvard Business Review*. Available at: <https://hbr.org/2009/10/how-ge-is-disrupting-itself>.
- Johnson, B., E. Lorenz and B.A. Lundvall (2002). Why all this fuss about codified and tacit knowledge? *Industrial and Corporate Change*, 11(2), 245–262.
- Kaplinsky, R. (2011). Schumacher meets Schumpeter: Appropriate technology below the radar. *Research Policy*, 40(2), 193–203. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.02.007>.
- Kline, S.J. and N. Rosenberg (1986). An overview of innovation. In Landau, R. and N. Rosenberg (eds), *The Positive Sum Strategy: Harnessing Technology for Economic Growth*. National Academies Press, 275–305.
- Leydesdorff, L. and H. Etzkowitz (1996). Emergence of a Triple Helix of university–industry–government relations. *Science and Public Policy*, 23(5), 279–286.
- Leydesdorff, L. and M. Meyer (2006). Triple Helix indicators of knowledge-based innovation systems: Introduction to the special issue. *Research Policy*, 35(10), 1441–1449.
- Lundvall, B. A. (1988). Innovation as an interactive process: From user-producer interaction to the national system of innovation. In G. Dosi (ed.), *Technical Change and Economic Theory*, 349–369.
- Malerba, F. (2002). Sectoral systems of innovation and production. *Research Policy*, 31(2), 247–264.
- Malerba, F. and L. Orsenigo (1993). Technological regimes and firm behavior. *Industrial and Corporate Change*, 2(1), 45–71. DOI: <https://doi.org/10.1093/icc/2.1.45>.
- Martin, A. (2016). Concepts of Innovation for and from Emerging Markets. *Working Papers of the Chair for Innovation Research and Technology Management*, no. 9-1. Technische Universität Chemnitz. Available at: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/148341/1/87292632X.pdf>.
- Mazzucato, M. (2018). Mission-oriented innovation policies: Challenges and opportunities. *Industrial and Corporate Change*, 27(5), 803–815. DOI: <https://doi.org/10.1093/icc/dty034>.
- Mowery, D.C. (2012). Defense-related R&D as a model for “Grand Challenges” technology policies. *Research Policy*, 41(10), 1703–1715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2012.08.007>.
- Mowery, D.C. and R.R. Nelson (1996). The US corporation and technical progress. In Kaysen, C. (ed.), *The American Corporation Today*. Cambridge, MA: MIT Press, 187–241.
- Mowery, D.C., R.R. Nelson and B.R. Martin (2010). Technology policy and global warming: Why new policy models are needed (or why putting new wine in old bottles won’t work). *Research Policy*, 39(8), 1011–1023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2010.07.007>.
- Multhauf, R.P. (1959). The scientist and the “improver” of technology. *Technology and Culture*, 1(1), 38–47. DOI: <https://doi.org/10.2307/3100786>.
- Nelson, R. R. (1993). *National Innovation Systems: A Comparative Analysis*. USA: Oxford University Press.
- Nelson, R.R. (2011). The Moon and the Ghetto revisited. *Science and Public Policy*, 38(9), 681–690. DOI: <https://doi.org/10.3152/030234211X13070021633404>.
- Onsongo, E. (2019). Institutional entrepreneurship and social innovation at the base of the pyramid: The case of M-Pesa in Kenya. *Industry and Innovation*, 26(4), 369–390. DOI: <https://doi.org/10.1080/10634269.2019.1644444>.
- Parschau, C. and J. Hauge (2020). Is automation stealing manufacturing jobs? Evidence from South Africa’s apparel industry. *Geoforum*, 115, 120–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.05.014>.
- Pavitt, K. (1984). Sectoral patterns of technical change: Towards a taxonomy and a theory. *Research Policy*, 13(6), 343–373. DOI: [https://doi.org/10.1016/0048-7333\(84\)90018-0](https://doi.org/10.1016/0048-7333(84)90018-0).
- Perez, C. (2003). *Technological Revolutions and Financial Capital*. Edward Elgar Publishing.
- Qumer, S.M. and D. Purkayastha (2019). TECNO Mobile’s growth strategies in Africa. In CEIBS Case Center (ed.), *China-Focused Cases: Selected Winners of the CEIBS Global Case Contest*. Springer Singapore, 81–102.
- Rodrik, D. and S. Stantcheva (2021). Economic Inequality and Insecurity: Policies for an Inclusive Economy. *Report prepared for Commission Chaired by Olivier Blanchard and Jean Tirole on Major Future Economic Challenges, Republic of France*. Available at: <https://drodrik.scholar.harvard.edu/publications/economic-inequality-and-insecurity-policies-inclusive-economy>.
- Sampat, B.N. (2015). Intellectual property rights and pharmaceuticals: The case of antibiotics. *WIPO Economic Research Working Papers No. 26*. World Intellectual Property Organization – Economics and Statistics Division. Available at: <https://ideas.repec.org/p/wip/wpaper/26.html>.
- Scherer, F.M. (1982). Demand-pull and technological invention: Schmookler revisited. *The Journal of Industrial Economics*, 30(3), 225–237. DOI: <https://doi.org/10.2307/2098216>.

- Schmookler, J. (1962a). Changes in industry and in the state of knowledge as determinants of industrial invention. In *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors*. Princeton University Press, 195–232.
- Schmookler, J. (1962b). Economic sources of inventive activity. *The Journal of Economic History*, 22(1), 1–20.
- Schot, J. and W.E. Steinmueller (2018). Three frames for innovation policy: R&D, systems of innovation and transformative change. *Research Policy*, 47(9), 1554–1567. DOI: <https://doi.org/10/gd56ww>.
- Schumpeter, J.A. (1939). *Business Cycles* (Vol. 1). Cambridge University Press. Available at: <http://journals.cambridge.org/production/action/cjoGetFulltext?fulltextid=5262972>.
- Schumpeter, J.A. (1942). *Capitalism, Socialism and Democracy*. Routledge.
- Sharif, N. (2006). Emergence and development of the National Innovation Systems concept. *Research Policy*, 35(5), 745–766.
- Siegel, I.H. (1962). Scientific discovery and the rate of invention. In *The Rate and Direction of Inventive Activity*. Princeton University Press, 441–458. DOI: <https://doi.org/10.2307/j.ctt183pshc.20>.
- Stewart, F. (1978). *Technology and Underdevelopment* (2<sup>nd</sup> ed.). UK: Palgrave Macmillan. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-349-15932-1>.
- Trajtenberg, M. (2011). Can the Nelson-Arrow Paradigm still be the beacon of innovation policy? In Lerner, J. and S. Stern (eds), *The Rate and Direction of Inventive Activity Revisited*. University of Chicago Press, 679–684. Available at: <http://www.nber.org/chapters/c12379>.
- WIPO (World Intellectual Property Organization) (2011). *World Intellectual Property Report 2011: The Changing Face of Innovation* [WIPO Economics & Statistics Series]. Geneva: WIPO. Available at: <http://ideas.repec.org/b/wip/report/2011944.html>.
- WIPO (2013). *World Intellectual Property Report 2013: Brands, Reputation and Image in the Global Marketplace*. Geneva: WIPO – Economics and Statistics Division. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=384>.
- WIPO (2015). *World Intellectual Property Report 2015: Breakthrough Innovation and Economic Growth*. Geneva: WIPO. Available at: <https://ideas.repec.org/b/wip/report/2015944.html>.
- WIPO (2017). *World Intellectual Property Report 2017: Intangible Capital in Global Value Chains*. Geneva: WIPO. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4225&plang=EN>.
- WIPO (2019). *World Intellectual Property Report 2019: The Geography of Innovation: Local Networks, Global Hotspots*. Geneva: WIPO. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4467&plang=EN>.

# Les nouvelles technologies peuvent stimuler le développement en tirant parti des écosystèmes d'innovation locaux



# La trajectoire de l'innovation dans l'histoire

**Au cours du siècle dernier, et en particulier après la Seconde Guerre mondiale, le monde a vu la trajectoire de l'innovation bifurquer souvent et parfois brutalement. Le présent chapitre met un coup de projecteur sur trois études de cas qui symbolisent ces périodes de changement et portent sur la recherche médicale pendant la Seconde Guerre mondiale, la course à l'espace et l'essor initial de l'industrie informatique en Asie de l'Est.**

L'abondance de données détaillées dont on dispose pour ces trois études et le laps de temps important qui s'est écoulé permettent une comparaison de la trajectoire de l'innovation avant et après les périodes en question. Mieux encore, la prévisibilité de cette trajectoire peut être étudiée. Alors que les chercheurs travaillant sur la pénicilline dans les années 1930 auraient pu imaginer son potentiel extraordinaire, il aurait été plus difficile pour les scientifiques mettant au point les panneaux photovoltaïques pour les programmes de vol spatial habité des années 1960 de prévoir la généralisation future de leur utilisation.

Comme on l'a vu au chapitre 1, les forces économiques peuvent définir la trajectoire de l'innovation. Le développement et la solidité de la curiosité humaine et des connaissances scientifiques sont la boussole qui permet d'entrevoir des voies prometteuses. La demande du marché joue elle aussi un rôle essentiel d'encouragement à l'exploration de certaines filières technologiques. Toutes ces forces peuvent orienter les décisions à prendre en matière de financement et d'affectation des ressources.

Les forces esquissées ci-dessus sont à l'œuvre dans chacune des études de cas qui vont suivre, même si leur poids relatif peut varier. Le présent chapitre décrit le contexte historique de ces études, leurs écosystèmes de l'innovation et la contribution des différents acteurs – gouvernements, entreprises, particuliers et universités – à l'orientation de l'innovation. Comme le montrent les études de cas historiques (la Seconde Guerre mondiale et la course à l'espace) examinées ici, certaines innovations, en dépit de leur très fort impact, n'étaient pas nécessairement protégées par des droits de propriété intellectuelle, ce pour diverses raisons, tenant par exemple aux normes de l'époque, à la sécurité et à la confidentialité. La première étude de cas porte sur l'innovation au cours de la Seconde

Guerre mondiale, en particulier dans le domaine médical, et son impact ultérieur. La deuxième examine l'évolution de l'industrie spatiale depuis la Seconde Guerre mondiale. Enfin, la troisième se penche sur l'essor des technologies de l'information dans certains pays d'Asie de l'Est.

Il importe de signaler que ces études de cas diffèrent par la portée et l'ampleur des innovations dont elles rendent compte. Mais elles sont autant d'exemples historiques du riche ensemble de facteurs – et de leurs interactions – qui influent sur la trajectoire de l'innovation.

## 2.1 Seconde Guerre mondiale<sup>1</sup>

### Les États-Unis d'Amérique ont mis la science sur le pied de guerre

Plus de 70 ans après la fin de la Seconde Guerre mondiale, un grand nombre d'innovations médicales mises au point pour répondre aux besoins des soldats sur le champ de bataille sont utilisées de manière habituelle dans la pratique hospitalière un peu partout dans le monde. La pénicilline (voir l'encadré 2.1), les médicaments antipaludiques et les transfusions sanguines sont des exemples d'innovations médicales stimulées par les besoins des forces armées mais qui, avec le temps, ont été mises à la disposition de la population civile et ont sauvé des millions de vies.

L'innovation ne peut certes pas résoudre toutes les crises, mais les aléas naturels, les guerres et les pandémies sont des exemples de cas où elle peut souvent apporter des solutions<sup>2</sup>. La vitesse à laquelle ces solutions sont découvertes est également de la plus haute importance. S'il n'y est pas remédié rapidement, les

crises et leurs conséquences peuvent échapper à tout contrôle<sup>3</sup>. Les intenses efforts des chercheurs visant à trouver des réponses, à quoi s'ajoute la nécessité d'agir vite qui permet de prendre de plus grands risques, créent un terrain fertile pour le progrès scientifique et technique dans les domaines liés aux situations de crise, voire pour la naissance des nouvelles technologies. Mais il convient également de noter que ces situations d'urgence peuvent entraîner l'éviction des domaines non liés aux situations de crise pour ce qui est de la prise en charge et des ressources allouées et, de ce fait, perturber les voies de développement technologique dans ces domaines.

La présente étude de cas examine la manière dont le Gouvernement des États-Unis d'Amérique a mobilisé la science civile pour répondre aux besoins induits par la guerre en créant et finançant le Bureau de recherches et de développement scientifiques (OSRD). En particulier, elle met en vedette les activités d'une subdivision de l'OSRD – le Committee on Medical Research (CMR) (Comité de la recherche en santé). L'OSRD a été dissous en décembre 1947, mais il a imprimé profondément sa marque sur la politique américaine en matière d'innovation. La création et l'expansion de plusieurs institutions actuelles, telles que la National Science Foundation (NSF) et les National Institutes of Health (NIH), trouvent leur origine dans l'effort de recherche consenti durant la Seconde Guerre mondiale. Ces recherches ont débouché sur tout un éventail d'avancées technologiques, notamment le radar, la bombe atomique, la fuséologie, la propulsion par réaction et les communications radio. Enfin, l'étude de cas s'efforce de tirer des enseignements généraux de ces activités d'innovation en période de crise.

### La guerre a exigé une technologie de pointe

Pour le Gouvernement des États-Unis d'Amérique, il était évident que la Seconde Guerre mondiale était une bataille technologique et que les États-Unis d'Amérique et les puissances alliées n'avaient aucune chance de la gagner sans technologies militaires de pointe. L'OSRD a été mis sur pied en juin 1941 – plusieurs mois avant que les États-Unis d'Amérique n'entrent officiellement dans la guerre – pour mobiliser les secteurs public et privé et la communauté scientifique afin que l'armée ait accès à ces technologies et connaissances de pointe<sup>4</sup>.

Vannevar Bush<sup>5</sup>, président de l'Institut Carnegie de Washington et ancien vice-président et doyen de l'École d'ingénieurs du Massachusetts Institute of Technology (MIT), a été affecté à la direction de l'OSRD. Il a constitué un petit groupe de scientifiques de très haut niveau pour mener des recherches visant à résoudre les problèmes soulevés par la

mise au point, la production et l'utilisation de "mécanismes et dispositifs" de guerre. À la fin de la guerre, ce groupe restreint avait considérablement élargi ses centres d'intérêt, et son budget était passé de 6,2 millions de dollars des États-Unis d'Amérique (en dollars de 1945) en 1940 et 1941 à entre 160 et 170 millions de dollars en 1944 et 1945<sup>6</sup>. Ce budget semble aujourd'hui très modeste, mais il était sans précédent à l'époque: il était près de 100 fois supérieur à ce que le Gouvernement des États-Unis d'Amérique avait jusqu'alors investi dans la science. À la fin de la guerre, l'OSRD avait consacré plus de 536 millions de dollars à la recherche-développement, ces fonds ayant servi à financer plus de 2500 contrats<sup>7</sup>.

#### Encadré 2.1 Pénicilline

La production de masse de la pénicilline est la réussite la plus célèbre de la recherche en santé menée au cours de la Seconde Guerre mondiale. Au départ, le CMR a assumé le rôle particulièrement crucial de coordonnateur. Il a convaincu les entreprises sceptiques possédant les capacités requises de s'atteler à la mise en place d'un processus commercial de production, organisé des rencontres entre entreprises et chercheurs au Northern Regional Research Laboratory (NRRL) du Département de l'agriculture des États-Unis d'Amérique, l'un des principaux acteurs de la mise au point de la pénicilline, facilité le partage d'informations et arbitré les conflits<sup>8</sup>. Il a ensuite joué un rôle important de coordination des essais cliniques et sur le terrain. Il a dépensé près de deux millions de dollars, soit environ 8% de son budget total, pour acheter de la pénicilline aux fins d'essais. Dans certains cas, le gouvernement a construit les installations de production nécessaires; dans d'autres cas, des entreprises privées s'en sont chargées, convaincues de l'existence de débouchés certains. Des organismes publics, comme le War Production Board (WPB), créé pour superviser la production de guerre des États-Unis d'Amérique, ont favorisé le partage d'informations et aidé à régler les points de blocage techniques en matière de production<sup>9</sup>. Après la guerre, les antibiotiques seraient les médicaments les plus vendus pendant un quart de siècle<sup>10</sup> et feraient l'objet de dizaines d'innovations ultérieures. Tout au long de la guerre, le CMR a financé un programme parallèle de synthèse chimique de la pénicilline, qui aurait permis de ne pas être tributaire d'une production organique, dont les rendements étaient très faibles. Ses efforts n'ont pas été couronnés de succès, mais, comme Swann (1983) l'indique, les connaissances produites "ont ouvert la voie, dans les années 1950, à la synthèse

générale de la pénicilline, qui a débouché sur la mise au point d'une pénicilline semi-synthétique d'une utilité thérapeutique inestimable"<sup>11</sup>.

---

Au départ, le CMR ne faisait pas partie de l'OSRD. Il s'y est agrégé par la suite et, bien que son budget ait été le dixième du budget global du Bureau, il y a joué un rôle central. Il se composait d'un petit nombre de subdivisions, s'occupant par exemple de médecine, de chirurgie, de médecine aéronautique, de physiologie, de chimie et du paludisme (voir l'encadré 2.2), qui s'était avéré un ennemi imprévu pendant la Première Guerre mondiale, en infectant un très grand nombre de combattants et de civils<sup>12</sup>. Le comité était chargé de déterminer "la nécessité et la nature des contrats à passer avec les universités, les hôpitaux et d'autres entités menant des activités de recherche en santé" et de les recommander aux fins d'un financement<sup>13</sup>.

Accorder une aide fédérale massive à la recherche en santé était à l'époque une idée radicale. Chester Keefer, auquel son travail de rationnement de ce médicament à distribuer aux civils pendant la guerre a valu d'être appelé le "tsar de la pénicilline", a présenté le CMR comme une "expérience inédite pour la médecine américaine, car jamais auparavant la recherche en santé n'avait été planifiée et coordonnée à une telle échelle". Le comité a facilité et appuyé la production de masse de la pénicilline, la création et la production de vaccins (voir l'encadré 2.3) et la mise au point de succédanés du sang (voir l'encadré 2.4), ainsi que la recherche sur les hormones (voir l'encadré 2.5) et bien d'autres technologies médicales. Ces activités ont ouvert à la recherche et au progrès de la médecine de nouvelles voies qui étaient encore explorées longtemps après la fin de la Seconde Guerre mondiale.

---

### Encadré 2.2 Antipaludiques

Le CMR a investi la plus grosse part de son budget dans la recherche de médicaments contre le paludisme, lequel, comme au cours de la Première Guerre mondiale, a fait peser une sérieuse menace dans maintes zones de combat, mais plus particulièrement, cette fois, dans le Pacifique Sud. La Fondation Rockefeller et le Conseil national de la recherche (NRC), qui conseillent le Gouvernement des États-Unis d'Amérique pour les questions liées à la science et à la technique, avaient mené des recherches sur le paludisme dans les années 1930. Les États-Unis d'Amérique s'étaient concentrés sur la recherche d'un produit pouvant remplacer l'antipaludique allemand Atabrine, car les efforts qu'ils avaient déployés pour le recréer avaient produit

divers effets secondaires, comme les nausées et la diarrhée. Le Board for the Coordination of Malarial Studies, créé en 1942, comprenait des représentants militaires et des scientifiques civils. Étant donné qu'il y avait des milliers de composés à étudier, le CMR a dû coordonner les activités de recherche des entreprises et des laboratoires universitaires en veillant à réduire autant que faire se pouvait la répétition des efforts tout en s'assurant de l'absence de graves lacunes. Comme pour la pénicilline, il s'est employé à promouvoir le partage d'informations et la collaboration sans porter atteinte aux droits exclusifs. Chose surprenante, le médicament qui a finalement été utilisé a été l'Atabrine. La recherche avait montré qu'après tout, elle était "relativement non toxique". La percée concernant l'une des molécules étudiées, la chloroquine, est venue trop tard pour être utile pendant la guerre, mais la chloroquine devait devenir un traitement antipaludique révolutionnaire dans la période qui a immédiatement suivi. Les recherches menées sur ce composé et d'autres composés prometteurs détectés pendant la guerre se sont poursuivies<sup>14</sup>. Les autres composés liés aux efforts du temps de guerre sont notamment la primaquine, la méfloquine et la Malarone. La demande de médicaments de l'armée américaine s'est maintenue à un niveau élevé pendant les conflits de Corée et du Viet Nam, même si le paludisme n'était plus un grave problème de santé au plan national.

---

### L'innovation pilotée par l'armée s'est avérée durable

#### Rôle du gouvernement

En cas de crise soudaine, les gouvernements peuvent jouer un rôle déterminant en mobilisant des forces, en réorientant le financement et en coordonnant les efforts des secteurs public et privé. Ils peuvent formuler une politique d'innovation pour répondre à un besoin précis, mais les incidences de cette politique peuvent se prolonger bien après la résolution de la crise. L'OSRD, par exemple, a financé certains secteurs afin d'en retirer un avantage technologique et militaire. Toutefois, les résultats de ces innovations profitent encore aux civils vivant aux États-Unis d'Amérique et ailleurs.

La promptitude avec laquelle un gouvernement réagit à une situation de crise qui apparaît dépend généralement de son degré de préparation pour y faire face. La politique d'innovation, l'état de préparation des institutions et l'existence de moyens de communication et de coordination entre les différents organismes – publics, privés et universitaires – sont quelques-unes des conditions qui, réunies avant la crise, peuvent

modifier l'orientation et l'efficacité de toute intervention. Avant la Seconde Guerre mondiale, le gouvernement ne s'était pas doté d'une politique d'innovation systématique. Les NIH existaient depuis les années 1930, mais leur budget et leurs axes de recherche étaient limités. À l'exception de l'agriculture, la recherche universitaire n'était guère financée par l'État fédéral. Cela étant, et assez curieusement, le caractère de nouveauté et la petite taille de l'OSRD ont joué en sa faveur, en lui épargnant les lenteurs bureaucratiques. Le gouvernement lui a laissé carte blanche pour affecter le capital financier et humain et coordonner les efforts déployés, au niveau local, entre l'armée et les entreprises et universités américaines, et, au niveau international, avec les scientifiques travaillant dans les pays alliés. L'approche centralisée et coordonnée a permis de déposer directement sur les paillasse de laboratoire les besoins existant sur le champ de bataille et d'informer immédiatement les scientifiques de l'efficacité de leurs produits.

Pour résumer, l'OSRD avait pour principales caractéristiques le financement d'activités de recherche pour une large part appliquée et axée sur la résolution d'une crise, la fixation de priorités en coopération étroite avec l'armée et l'élaboration de politiques (notamment pour les brevets) de recrutement des meilleurs chercheurs. Mérite également de retenir l'attention le désir du Bureau de financer une multiplicité d'activités de recherche rivales dans les cas où il ne savait pas d'où la solution à un problème pourrait venir. Tel a été le cas, par exemple, des recherches menées sur le paludisme et la pénicilline. Il ne s'est pas contenté d'offrir des achats garantis et des contrats conclus par avance. Il a également coordonné la décentralisation de la recherche-développement, en appuyant non seulement la recherche, mais aussi la production en aval et l'adoption des produits, et en privilégiant d'une manière générale la durée (résolution rapide de la crise) par rapport à l'argent. En plus de coiffer les activités de recherche nationales, il était chargé de la collaboration internationale, notamment, par exemple, la coopération entre les scientifiques britanniques et américains dans le domaine des recherches sur la pénicilline.

Comme indiqué plus haut, l'OSRD a continué d'influencer l'innovation américaine bien après la fin de la Seconde Guerre mondiale. Les études montrent que, après la guerre, le nombre total de brevets déposés par des inventeurs américains a été de 50 à 60% supérieur dans les principales catégories technologiques soutenues par le Bureau par rapport à celles qui ne l'ont pas été. Les catégories soutenues ont notamment été l'atome, la radiographie, les communications (p. ex., les systèmes radar ou de radionavigation), les dispositifs à semi-conducteurs (p. ex., les transistors) et les matériels et logiciels informatiques<sup>15</sup>. En revanche, on ne constate aucune tendance de ce type après la guerre en ce qui concerne les brevets déposés en France ou au Royaume-Uni, pays où les pouvoirs publics n'ont

pas apporté de soutien comparable. Manifestement, la Seconde Guerre mondiale a marqué un véritable tournant dans la trajectoire de l'innovation aux États-Unis d'Amérique.

---

### Encadré 2.3

#### Vaccins

Dès avant la Seconde Guerre mondiale, le Gouvernement des États-Unis d'Amérique (par l'intermédiaire du Bureau du Directeur général de la santé de l'Armée des États-Unis d'Amérique et d'autres départements) avait commencé à mener des recherches sur des vaccins contre diverses maladies infectieuses, dont la grippe. Une souche de grippe particulièrement virulente avait tué des millions de soldats et de civils à travers le monde à la fin de la Première Guerre mondiale, faisant davantage de victimes que les quatre années de combats. L'armée a mené une recherche fondamentale et des travaux préparatoires portant sur plusieurs vaccins, notamment contre les infections à pneumocoque, bactérie qui peut être responsable de pneumonies, de septicémies ou de méningites, et contre la grippe. La Fondation Rockefeller a financé les travaux universitaires sur les vaccins. Au moment de la création de l'OSRD, la faisabilité scientifique de plusieurs éventuels vaccins avait été établie. Il restait à trouver des méthodes permettant de les produire sur une plus grande échelle et d'en évaluer l'innocuité et l'efficacité<sup>16</sup>. Le CMR a passé des contrats avec des universitaires et des entreprises aux fins d'améliorer les rendements, d'uniformiser les concentrations et d'augmenter la production. Il a collaboré avec les entreprises en vue de produire suffisamment de doses de vaccins pour les essais, puis a financé les essais cliniques et les essais sur le terrain. Le rôle du gouvernement a principalement consisté à coordonner les travaux pour identifier les sérotypes les plus répandus dans la population militaire et mettre au point, développer et tester un vaccin contenant ces sérotypes. Les systèmes d'enregistrement avancés de l'armée et son important taux de morbidité dans une population témoin ont offert un bon terrain d'essai pour des vaccins. Hoyt<sup>17</sup> a établi que les efforts du temps de guerre avaient aidé à mettre au point des vaccins nouveaux ou améliorés pour 10 des 28 maladies évitables par la vaccination recensées au XX<sup>e</sup> siècle, dont celles causées par l'anatoxine tétanique et la toxoïde botulique, ainsi que l'encéphalite japonaise et la fièvre jaune. Toutefois, certains de ces vaccins, comme celui mis au point contre l'encéphalite japonaise (une infection virale du cerveau), ne se sont pas révélés rentables d'un point de vue commercial du fait du faible taux d'incidence des maladies en question en Amérique du Nord.

---

## Rôle du secteur privé

Dès le départ, les entreprises privées, en particulier celles des secteurs de la production d'électricité et de produits chimiques et pharmaceutiques, ont été pleinement impliquées dans l'innovation au service de l'effort de guerre. L'OSRD et le CMR ont adopté des politiques et conçu des contrats avantageux pour ces entreprises, en leur fournissant des financements, en réduisant les risques liés à leur investissement et en assurant des liaisons de communication entre elles. Concernant les projets qui n'ont pas été jugés trop sensibles pour être rendus publics, l'OSRD a autorisé les entreprises à enregistrer et détenir des brevets, étant toutefois entendu, souvent, que ces brevets devaient être concédés sous licence à des organismes publics en cas de besoin.

Cela étant, en temps de crise, et surtout dans les premières phases, la portée et la délimitation des problèmes peuvent être vagues et évoluer rapidement. Des niveaux d'incertitude élevés peuvent dissuader des acteurs privés de s'impliquer. Ces derniers peuvent hésiter à prendre en charge les coûts afférents à des activités de recherche-développement avancées et le coût matériel et humain s'ils n'obtiennent pas l'assurance que leur investissement sera rentable. Toutefois, le secteur privé peut également être motivé par des facteurs tels que l'altruisme ou les avantages sur le plan de la réputation. Pendant la Seconde Guerre mondiale, certaines entreprises se sont attachées activement à contribuer à l'effort de guerre par patriotisme<sup>18</sup>.

La participation aux efforts déployés en matière d'innovation en temps de guerre pouvait s'avérer très profitable pour le secteur privé. Les entreprises se sont créées des savoirs tacites lorsqu'elles ont pu conserver ou acquérir des droits de propriété intellectuelle, et ces avantages et d'autres encore se sont perpétués longtemps après la guerre. La production de masse de la pénicilline aurait été impossible sans les processus de production innovants adoptés par des entreprises telles que Merck, Squibb, Lilly et Pfizer<sup>19</sup>.

Les recherches sur la pénicilline ont servi de base à la mise au point d'antibiotiques par les entreprises pharmaceutiques dans les décennies qui ont suivi la guerre. Avant la Seconde Guerre mondiale, Pfizer était un fabricant de produits chimiques qui, dans les années 1910 et 1920, avait mis au point une méthode de fermentation de l'acide citrique, l'un des principaux ingrédients des boissons non alcoolisées. Dans les années 1940, l'entreprise a été engagée par contrat pour contribuer à augmenter la production de pénicilline en utilisant cette méthode de fermentation. Son implication réussie dans le programme l'a amenée à découvrir, en 1950, l'oxytétracycline, l'un des premiers

antibiotiques<sup>20</sup>. Le développement à grande échelle des antibiotiques a permis de réduire sensiblement la mortalité due à des maladies infectieuses et d'accroître globalement l'espérance de vie<sup>21</sup>. La découverte de l'oxytétracycline, accompagnée par un changement stratégique d'orientation interne, a transformé Pfizer en une entreprise pharmaceutique de premier plan. En 2020, elle a été l'une des entreprises à la pointe de la recherche menée pour mettre au point un vaccin contre la COVID-19 destiné à juguler la pandémie due au coronavirus.

## Le processus de recrutement de l'OSRD a été très sélectif

**Tableau 2.1 10 premières universités avec lesquelles l'OSRD a passé des contrats, classées selon la valeur totale des contrats, 1941-1947**

Université	Valeur totale (dollars É.-U.)	%
Massachusetts Institute of Technology	106,8	23,1
California Institute of Technology	76,6	16,6
Harvard University	29,1	6,3
Columbia University	27,1	5,9
University of California	14,6	3,2
Johns Hopkins University	10,8	2,3
George Washington University	6,9	1,5
University of Chicago	5,7	1,2
Princeton University	3,6	0,8
University of Pennsylvania	2,9	0,6
<b>Total</b>	<b>284,0</b>	<b>61,5</b>

Source: Gross et Sampat (2020b).

Notes: Les pourcentages correspondent à la part des dépenses de recherche totales de l'OSRD revenant à chaque université.

## Rôle des milieux universitaires

Pour l'essentiel, les activités scientifiques menées pendant la Seconde Guerre mondiale ont été axées sur la recherche appliquée – la recherche visant à résoudre des problèmes spécifiques. Toutefois, les découvertes faites pendant la guerre n'auraient pas été possibles sans la recherche fondamentale effectuée antérieurement dans les universités, les laboratoires de recherche et les hôpitaux. Par exemple, c'est l'absence de recherche antérieure qui a limité la capacité du CMR en ce qui concerne la mise au point d'un vaccin efficace contre l'anthrax, dont l'agent pathogène, craignait-on, pourrait être utilisé comme arme biologique. Au contraire, lorsque la guerre a éclaté en 1939, le bactériologiste britannique Alexander Fleming, avec une équipe de chercheurs de l'Université d'Oxford, menait depuis des années des recherches sur la pénicilline. Il a découvert la

pénicilline en 1929. Si les tentatives faites par l'équipe pour purifier la molécule de pénicilline de façon à disposer de quantités suffisantes pour réaliser des essais sur l'homme n'ont pas abouti pendant les années 1930, elles ont rendu possible le succès pendant la guerre. En fait, Howard Florey, l'un des membres de l'équipe d'Oxford, s'est rendu aux États-Unis d'Amérique et a uni ses forces à celles du CMR<sup>22</sup>. On en a un autre exemple avec l'équipe de chercheurs dirigée par Edwin Cohen, physico-chimiste de la Harvard Medical School qui a été le fer de lance de la recherche sur la transfusion sanguine (voir l'encadré 2.4).

#### Encadré 2.4

##### Succédanés du sang

La guerre a créé un autre besoin crucial, celui de disposer de sang ou de succédanés du sang pour remplacer les pertes de sang dues aux blessures, aux hémorragies, aux brûlures ou aux opérations chirurgicales<sup>23</sup>. Les succédanés devaient pouvoir être faciles à stocker et à transporter sur de longues distances<sup>24</sup>. Une équipe dirigée par le chimiste Edwin Cohen a mené les recherches sur la transfusion sanguine. Le laboratoire de Cohen a isolé l'albumine sérique humaine et l'a testée au début de 1941. Au moment de l'attaque de Pearl Harbor, en décembre de cette année-là, l'albumine a été utilisée pour soigner les blessés<sup>25</sup>. Les techniques perfectionnées pendant la guerre sont devenues importantes lors du rétablissement postopératoire, s'agissant de maintenir le volume sanguin pendant le choc opératoire, lorsque la tension sanguine baisse fortement, et de remédier aux problèmes de coagulation et à bien d'autres pathologies, notamment de traiter la rougeole.

Charles Drew, chercheur en médecine américain, a été une autre personnalité de premier plan dans ce domaine. Il a mis au point et amélioré des techniques de conservation du sang, qui ont mené à la création en 1940 de vastes banques du sang en Grande-Bretagne.

Le processus de recrutement de l'OSRD a été très sélectif et s'est concentré sur les meilleures universités. Par exemple, il a investi plus d'un tiers des fonds mis à sa disposition dans deux institutions seulement, le MIT et le California Institute of Technology (Caltech) (voir le tableau 2.1). De même, le CMR, en matière de collaboration avec les milieux universitaires, s'est lui aussi principalement tourné vers une poignée d'universités d'élite (voir le tableau 2.2).

### La collaboration du CMR avec les milieux universitaires s'est concentrée sur un petit nombre d'universités d'élite

**Tableau 2.2 Meilleures universités et meilleurs hôpitaux avec lesquels des contrats ont été passés pour des projets relatifs à la pénicilline et au paludisme, 1941-1947**

Pénicilline	Paludisme
Massachusetts Memorial Hospital (66,6%)	University of Chicago (15,8%)
Cornell University (6,8%)	Columbia University (11,0%)
Johns Hopkins University (4,7%)	New York University (9,7%)
University of Michigan (4,1%)	Johns Hopkins University (8,7%)
University of Pennsylvania (3,67%)	

Source: Gross et Sampat (2020b).

Notes: Les pourcentages correspondent à la part des dépenses de recherche totales consacrées à des projets revenant à chaque université.

#### Encadré 2.5

##### Hormones

Dès avant la Seconde Guerre mondiale, les chercheurs avaient commencé à isoler, produire et administrer des hormones pour tout un éventail de maladies et d'affections allant de la constipation à l'obésité<sup>26</sup>. Le CMR a intensifié la recherche sur les hormones corticales, utilisées pour aider les aviateurs à surmonter le mal d'altitude, pour remédier à la fatigue au combat, pour traiter les traumatismes de guerre, ainsi qu'en chirurgie<sup>27</sup>. Après la guerre, le traitement hormonal a pris son essor et la cortisone est devenue un médicament "miracle" dans les décennies suivantes. Les recherches menées ultérieurement ont montré que les hormones corticales peuvent réduire une inflammation et soulager les douleurs arthritiques, et traiter les réactions allergiques.

### Conclusions de l'étude de cas

Les crises telles que les guerres, les pandémies et les aléas naturels peuvent être des catalyseurs qui induisent les forces technologiques, du marché ou politiques à stimuler l'innovation. Elles sont pour le système d'innovation autant de chocs qui ont des incidences sur les divers paramètres de l'écosystème technologique. L'innovation de crise peut avoir un impact durable lorsque la demande se maintient et que les solutions demeurent applicables. Dans le cas contraire, une fois la crise passée, l'impact ne se fait plus sentir.

L'histoire de l'OSRD relève de l'innovation de crise, mais avec une caractéristique particulière: le Bureau n'avait

qu'un seul client, l'armée. Il avait adopté une approche descendante et centralisée, et n'a recruté qu'un petit nombre de scientifiques, d'entreprises et d'universités d'élite. Dans le cas d'autres crises, comme les pandémies, il pourrait s'imposer de pourvoir aux besoins de clients très divers. Il pourrait alors être plus approprié d'adopter une approche plus décentralisée et de faire appel à un plus large éventail de collaborateurs<sup>28</sup>.

L'approche institutionnelle et administrative de l'OSRD à l'innovation s'est perpétuée dans le système d'innovation américain d'après-guerre. Par exemple, le style de passation des marchés de l'OSRD, qui a acheté de la recherche-développement et non pas tel ou tel produit – idée révolutionnaire pour l'époque –, a été repris par un nouveau programme de bourses de recherche extra-muros des NIH<sup>29</sup>. Le système d'examen collégial d'après-guerre des NIH s'est également inspiré de l'approche du CMR. Ce dernier a fait appel aux experts médicaux du NRC pour examiner les projets qui intéressaient l'armée et évaluer leur qualité, avant de financer ceux qui avaient obtenu un score très élevé<sup>30</sup>.

Les découvertes médicales pilotées par le CMR ont bénéficié de la recherche d'avant-guerre. Les innovations médicales apportées dans les décennies suivantes ont repris le même cheminement scientifique, au gré des applications civiles de plus en plus nombreuses qui leur ont été trouvées. Si la mise au point de la pénicilline, des antibiotiques, du traitement hormonal et d'autres découvertes analogues a été révolutionnaire, la trajectoire de l'innovation qui a conduit à faire ces découvertes a été cumulative et, de ce fait, relativement prévisible (voir le chapitre 1).

## 2.2 Industrie spatiale<sup>31</sup>

### Un exemple classique d'innovation axée sur une mission

Les années 1950 et 1960 ont été caractérisées par une expansion économique rapide et dominées par les questions de sécurité nationale. Les tensions géopolitiques entre les États-Unis d'Amérique et l'Union soviétique ont donné lieu à une rivalité militaire et technologique. Les programmes spatiaux des deux pays ont découlé de l'ambition d'être le premier à envoyer un homme marcher sur la Lune en tant que symbole de pouvoir et de prééminence dans le domaine des technologies aéronautique et spatiale. La motivation était la même dans les deux pays, mais leurs écosystèmes de l'innovation étaient différents. La présente étude de cas porte sur l'écosystème américain. La guerre froide avait entraîné une expansion de la recherche-développement financée par le gouvernement fédéral, la recherche-développement "axée sur une mission" (comme la mission consistant à envoyer un homme

sur la Lune) occupant une place prépondérante dans le schéma de financement de l'innovation américain<sup>32</sup>. Mais le financement, certes crucial, n'était pas la seule composante indispensable de l'innovation dans le programme spatial américain. Les moyens techniques et la capacité organisationnelle, tout autant que la volonté politique et l'étroite collaboration entre les entités publiques, privées et universitaires, étaient également nécessaires.

L'innovation dans le secteur spatial avait deux objectifs. Il s'agissait d'abord d'aller dans l'espace, puis de pouvoir y fonctionner. Les technologies mises au point pour la mission Un homme sur la Lune devaient surmonter certains problèmes, trois en particulier. Il y avait d'abord la question de la réduction de masse (poids et volume) (voir l'encadré 2.6); ensuite, il fallait produire et stocker de l'énergie (voir l'encadré 2.7), et, enfin, il fallait protéger les hommes et le matériel dans un environnement hostile. Les technologies mises au point ont été nombreuses à avoir par la suite des applications civiles, lesquelles ont donné naissance à des technologies entièrement nouvelles. Ces technologies sont par exemple les panneaux solaires, l'intelligence artificielle (IA) et les matériels et logiciels informatiques (voir l'encadré 2.8). Elles découlent également d'une réorientation imprévue de la trajectoire de l'innovation (voir le chapitre 1). Ce sont les produits dérivés d'une innovation voulue (axée sur une mission) qui a ensuite évolué de façon inattendue.

La présente étude de cas examine les principales technologies de l'industrie spatiale et se demande comment leur maturation, à partir des années 1980, a permis au secteur privé de s'engager dans ce secteur. Elle donne quelques exemples d'innovation concernant le stockage de l'énergie, le traitement numérique, l'informatique, l'IA et les matériaux composites en fibres de carbone. Enfin, elle propose des pistes à suivre pour développer l'innovation.

---

#### Encadré 2.6 Fibres de carbone

L'industrie aérospatiale a été le fer de lance des fibres de carbone et de l'industrie des polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC). Les premiers essais de la fibre de carbone ont été effectués dans le cadre de la recherche-développement menée par le Département de la défense et la National Aeronautics and Space Administration (NASA), qui découlait pour l'essentiel de la nécessité de trouver des matériaux de masse (poids et volume) réduite pour fabriquer le corps des véhicules spatiaux. Étant donné qu'une énorme quantité d'énergie est nécessaire pour qu'un tel engin puisse échapper à l'attraction terrestre, les matériaux légers étaient – et sont toujours – une composante indispensable pour optimiser le système de propulsion de la fusée

disponible et emporter dans l'espace une charge utile aussi importante que possible.

Les extraordinaires propriétés mécaniques de la fibre de carbone (sa résistance, sa conductivité et sa légèreté) étaient suffisamment précieuses pour justifier son prix élevé. Sa légèreté améliore l'efficacité énergétique. De plus, elle se prête au moulage, qui permet de lui donner pratiquement n'importe quelle forme. Chaque moule peut être conçu de manière à combiner plusieurs pièces différentes dans un même moule, ce qui réduit sensiblement le nombre de pièces nécessaires pour construire un véhicule spatial. Cette propriété a raccourci les délais de fabrication et de montage et amélioré les possibilités de réduction des coûts. Par ailleurs, la fibre de carbone a apporté d'autres avantages en matière d'exploration spatiale, tels qu'une protection thermique renforcée et une meilleure résistance aux rayonnements solaires<sup>33</sup>. La capsule Apollo lancée en 1969 utilisait une technologie des composites plus ancienne, reposant notamment sur la fibre de verre, sous la forme d'un bouclier thermique. Depuis Apollo, la technologie de la fibre de carbone a progressé et a été utilisée pour les lanceurs, la navette spatiale, les satellites, les télescopes spatiaux et la Station spatiale internationale<sup>34</sup>. Mais les fibres de carbone sont fragiles et non pliables, ce qui peut limiter leur utilisation, et le processus de fabrication est très spécialisé.

La demande de produits spécialisés de ce type est encore faible. La recherche se poursuit pour remplacer les traditionnelles pales en fibre de verre des turbines éoliennes par des pales en fibres de carbone optimisées. L'utilisation de la fibre de carbone permet d'obtenir des pales plus grandes mais dont la masse est réduite, et, de ce fait, de capter une plus grande quantité d'énergie. À mesure qu'augmentera le nombre des applications civiles devenues viables, l'utilisation de la fibre de carbone aura un meilleur rapport coût-efficacité.

## La course à l'espace

À l'issue de la Seconde Guerre mondiale, les États-Unis d'Amérique et l'Union soviétique ont commencé à se livrer une lutte acharnée pour le pouvoir. L'un des aspects de cette rivalité a été la conception de fusées à la pointe de la technologie, principalement à des fins militaires. À la fin de 1957, l'Union soviétique a surpris le reste du monde en étant le premier pays à lancer un satellite (Sputnik 1) en orbite terrestre basse. Consternés, les États-Unis d'Amérique ont réagi en créant la NASA un an plus tard. Ce nouvel organisme civil s'est vu confier l'exploration pacifique et scientifique de l'espace. Dans un célèbre discours

au Congrès prononcé en 1961, le Président John F. Kennedy a annoncé le lancement d'un programme destiné à envoyer un homme sur la Lune avant la fin de la décennie en cours. La ferveur de l'engagement politique et l'importance du budget, associées aux capacités techniques de la NASA et de la communauté des scientifiques et des ingénieurs, ont permis d'atteindre l'objectif en octobre 1969.

Mais une fois cette mission accomplie, les gouvernements des États-Unis d'Amérique ont commencé à réorienter vers d'autres fins les ressources consacrées aux programmes relatifs aux grandes missions d'exploration spatiale habitée et ont réduit le budget de la NASA. Celle-ci a alors été chargée de concevoir et de faire voler un nouveau véhicule spatial – la navette spatiale – qui pourrait être réutilisé pour envoyer des hommes et des robots dans l'espace. En 1972<sup>35</sup>, le Président Richard Nixon a approuvé le projet de navette. Le programme de vols habités a été maintenu en tant que symbole de la prééminence spatiale américaine et parce qu'il avait des utilisations de sécurité nationale. Mais la principale raison du soutien apporté à la navette a été qu'elle promettait des vols réguliers et un abaissement des coûts.

À la fin des années 1960 et dans les années 1970, d'autres pays ont développé des capacités spatiales. L'Organisation européenne de recherche spatiale a fusionné avec l'Organisation européenne pour la mise au point et la construction de lanceurs d'engins spatiaux pour créer l'Agence spatiale européenne (ASE) en 1975. Au milieu des années 1970, le Canada a de son côté commencé à coopérer avec le programme spatial américain, notamment en mettant au point le Canadarm, bras robotique servant à manipuler les charges utiles d'une fusée. Dans les années 1980, un grand nombre de pays avaient conçu des satellites de télécommunications et la plupart des pays participaient activement aux travaux d'Intelsat, organisation intergouvernementale s'occupant de développer dans le monde entier l'usage des télécommunications spatiales.

À la fin du siècle, les programmes spatiaux avaient donné naissance à des technologies de télécommunications satellitaires et avaient motivé la participation d'intérêts commerciaux aux activités spatiales. Un secteur spatial commercial dynamique, dans lequel évoluent de nouveaux acteurs commerciaux, devient une importante composante de tous les programmes spatiaux aux États-Unis d'Amérique et dans d'autres pays. Au cours de la première décennie du XXI<sup>e</sup> siècle, les entreprises et les industries ont commencé à investir dans les technologies spatiales et en font de plus en plus souvent usage, à commencer par les services de télécommunication. Les pays les plus industrialisés dépendent de plus en plus des systèmes spatiaux pour l'informatique, l'imagerie de télédétection, les données de positionnement, de navigation et de synchronisation, et d'autres applications.

## Qui est aux commandes ?

### Rôle du gouvernement

Depuis qu'ils existent, les programmes spatiaux de la quasi-totalité des pays sont principalement une question de sécurité nationale et un symbole du progrès technologique. Les gouvernements sont la principale force agissant sur deux des trois éléments caractéristiques qui ont fixé la trajectoire de l'innovation dans ce domaine, à savoir la volonté politique et le financement. Le troisième élément est la capacité technique des scientifiques et ingénieurs du secteur privé et des universités, et les progrès qu'ils ont rendus possibles. De multiples innovations ont été apportées à l'industrie spatiale par divers organismes publics, dont la NASA, le Département de la défense et le Département de l'énergie. Par exemple, le système mondial de localisation (GPS) par satellites, qui est utilisé par un très large éventail de dispositifs civils, est un système de positionnement, navigation et synchronisation

mis au point, détenu et géré par le Département de la défense. Alors que la NASA a été créée pour mener l'ensemble des activités spatiales non militaires, l'Advanced Research Projects Agency (ARPA), devenue la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), a été mise en place en février 1958 pour développer les technologies spatiales et autres technologies à usage militaire. Beaucoup d'autres produits spatiaux, comme les satellites de télé-détection, qui permettent, entre autres, de recueillir à distance des données sur la Terre, étaient au départ destinés à répondre à des besoins militaires. Les programmes spatiaux ont toujours eu le gouvernement comme principal client, mais il existe aussi depuis longtemps des clients privés. Par exemple, en 1962, un satellite de télécommunications privé appelé Telstar, détenu et géré par AT&T, a été lancé. Il a même pu compter sur une couverture d'assurance privée et, à cette époque, il était suffisamment connu pour que l'un des disques de pop les plus vendus soit fait à son sujet. Depuis quelques années, de nouveaux marchés privés et commerciaux ont émergé pour les produits spatiaux.

---

#### Encadré 2.7

##### Stockage de l'énergie

Les missions spatiales nécessitent des sources d'énergie fiables, constantes et sûres. Les technologies et innovations dans le domaine énergétique ont permis et renforcé l'exploration de l'espace lointain, les vols habités et les services terrestres exploitant l'information d'origine spatiale. On décrit brièvement ci-après deux technologies dans le domaine énergétique.

##### Le photovoltaïque

Les cellules solaires modernes qui peuvent capter l'énergie solaire ont été mises au point pour la première fois par des physiciens des laboratoires Bell aux États-Unis d'Amérique, en 1953. Toutefois, en raison de leur coût élevé, les cellules solaires à base de silicium n'ont eu aucune application pratique jusqu'à ce que l'armée américaine décide, en 1958, qu'elles fourniraient une source d'énergie idéale pour les satellites en orbite terrestre<sup>36</sup>. Depuis, plusieurs progrès marginaux ont permis d'augmenter la quantité de rayonnement solaire que les cellules peuvent convertir en énergie. Le rendement des cellules est le pourcentage de rayonnement solaire converti (voir le graphique plus loin).

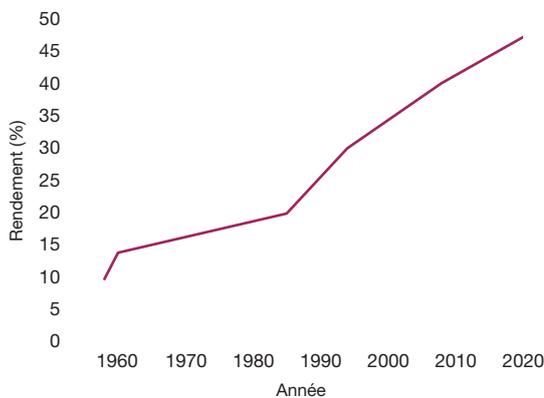
Malgré leur omniprésence dans les matériels d'équipement spatiaux, les cellules solaires présentent un certain nombre d'insuffisances.

Ces systèmes photovoltaïques ne produisent pas d'énergie lorsqu'ils sont dans l'ombre, et leur capacité de production diminue à mesure que s'accroît la distance qui les sépare du Soleil. Si une mission nécessite une alimentation ininterrompue en énergie, il peut être plus approprié de combiner plusieurs sources d'énergie. Toutefois, si des interruptions intermittentes et des mises en sommeil sont acceptables, les panneaux solaires peuvent être une excellente source d'énergie de longue durée. Lancé en 2003, le robot d'exploration Opportunity, l'un des programmes d'exploration de Mars ayant donné le plus de satisfaction à la NASA, devait avoir une durée de vie de 92 jours (terrestres). Il s'est arrêté de fonctionner à de multiples reprises à cause de la poussière qui s'accumulait sur ses panneaux solaires. Toutefois, les vents soufflant avec violence sur Mars ont régulièrement fait disparaître cette poussière, permettant au robot de fonctionner pendant plus de 14 ans, soit 57 fois sa durée de vie initiale<sup>37</sup>.

---

## Amélioration du photovoltaïque pendant l'ère spatiale

Figure 2.1 Rendement solaire, en pourcentage, 1960-2020



Source : Département de l'énergie.

Notes : Ces données représentent le rendement obtenu dans des conditions de laboratoire idéales. Dans l'espace, le rendement des cellules solaires de la dernière génération dans des conditions pratiques est d'environ 30%.

## L'énergie nucléaire

L'énergie nucléaire est considérée comme une source potentielle d'énergie au service de l'exploration spatiale depuis les années 1950. Ses résultats antérieurs et sa fiabilité semblaient fournir une base saine au développement d'utilisations futures. Toutefois, seul un petit nombre de technologies de l'énergie nucléaire a été exploité à fond. Il a été mis fin à plusieurs projets en raison de problèmes de budget ou de sécurité. Les générateurs radioisotopiques font exception : ils ont à leur actif des centaines d'applications spatiales depuis 1961<sup>38</sup>. Un générateur radioisotopique convertit la chaleur produite par la désintégration naturelle du plutonium-238 – un isotope radioactif – en électricité<sup>39</sup>. L'Agence spatiale européenne, la République populaire de Chine, la Fédération de Russie et les États-Unis d'Amérique ont continué d'innover dans le domaine de la technologie des générateurs radioisotopiques, en améliorant leur conception et les matériaux utilisés, pour obtenir un meilleur rendement énergétique et renforcer la sécurité<sup>40</sup>.

## Rôle du secteur privé

Aux États-Unis d'Amérique, les entreprises privées ont toujours été associées à l'innovation spatiale. Dès le départ, quelque 80% des crédits mis à la disposition de la NASA ont servi à financer des contrats passés avec elles. Toutefois, comme on l'a vu, ce n'est que récemment que les entreprises privées se sont mises à investir dans les systèmes spatiaux et miser beaucoup sur eux. Le financement privé a augmenté de façon spectaculaire au XXI<sup>e</sup> siècle (voir la figure 2.2), mais il

convient d'émettre une mise en garde importante au sujet de l'investissement et de l'innovation privés dans les technologies spatiales. Les "nouvelles" sociétés spatiales florissantes sont très peu nombreuses à opérer sur un marché qui soit véritablement fonction des prix. Si les gouvernements n'étaient pas leurs clients, nombre de ces sociétés n'existeraient pas. La Space Exploration Technologies Corp. (SpaceX), qui, à présent, conçoit, fabrique et lance des fusées et des véhicules spatiaux à la pointe de la technologie, a bénéficié au départ, au début des années 2000, d'un financement important au titre du programme des Services de transport commerciaux orbitaux de la NASA. Ce programme a affecté des centaines de millions de dollars pour un nouveau lanceur qui doit réapprovisionner l'ISS, la station spatiale internationale en orbite terrestre basse. SpaceX s'est vu adjudger de très importants marchés publics par la NASA et le Département de la défense. Cette société a également un grand nombre de clients privés. Mais sans les clients publics, on peut se demander si les opérations de lancement auraient été suffisantes pour financer des produits de ce type.

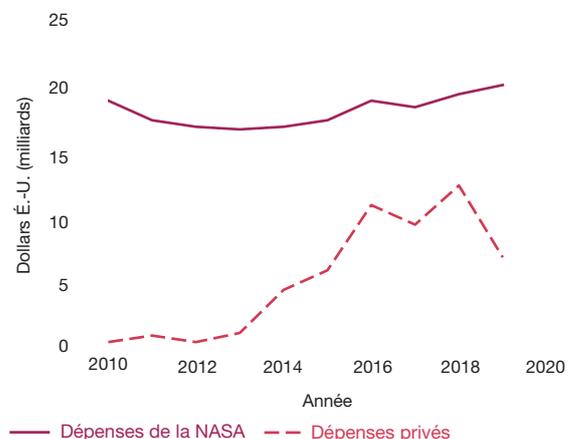
Dans l'hémisphère Nord, l'été 2021 a vu des sociétés comme SpaceX, Virgin Galactic et Blue Origin, toutes soutenues par des bailleurs de fonds milliardaires, organiser des tours dans l'espace. Malgré l'emballement médiatique, il est trop tôt pour parler d'aube du tourisme spatial, car le prix, monstrueux, réserve pour l'instant les tours de ce genre aux ultra-riches.

## Rôle des milieux universitaires

En décembre 1958, peu après sa création, la NASA a pris le contrôle du Laboratoire de recherche sur la

## L'investissement privé dans les activités spatiales est en expansion, mais reste surclassé par leur financement public

Figure 2.2 Dépenses de la NASA et investissements privés américains dans l'espace, 2010-2019



Source : OMPI sur la base du Rapport économique du Président (2021), figure 8.1, p. 229.

# Dans la plupart des cas, les innovations que l'on doit à la NASA n'ont pas donné immédiatement lieu à une demande commerciale et évolutive dans le secteur civil

propulsion par réaction (JPL), entreprise gérée par Caltech. Les laboratoires universitaires figurent depuis longtemps parmi les principaux collaborateurs de la NASA. On pourrait dire que les ordinateurs personnels d'aujourd'hui sont nés dans les laboratoires du MIT (voir l'encadré 2.8). Les universités sont également depuis longtemps les principales productrices d'astronautes de la NASA, une quarantaine d'entre eux étant diplômés du MIT ou des Universités Purdue et Stanford<sup>41</sup>.

---

## Encadré 2.8

### Traitement numérique, ordinateurs et intelligence artificielle (IA)

L'histoire des premiers ordinateurs est étroitement liée à celle des vols spatiaux. Le programme Apollo, lancé en 1961 pour réaliser l'objectif d'envoi d'un homme sur la Lune fixé par Kennedy, a été le point de départ de l'utilisation des ordinateurs, des puces et de l'automatisation aux fins de l'exploration spatiale.

#### Technologie des puces

S'inspirant des technologies aéronautiques, l'exploration spatiale a progressivement recouru à des systèmes informatisés pour exécuter des tâches telles que la navigation et le guidage. Le coût très élevé de l'accès à l'espace a rendu nécessaire d'utiliser des composants plus petits et plus légers pour les systèmes technologiques embarqués. Les circuits intégrés, communément appelés puces, ont présenté un intérêt particulier pour les véhicules spatiaux. En général, ils sont nettement plus petits que les circuits électriques traditionnels, consomment moins d'énergie, augmentent la

vitesse opérationnelle et permettent des réductions progressives des coûts par fonction électronique<sup>42</sup>.

#### L'ordinateur de guidage de vol Apollo

La NASA avait besoin d'un système plus autonome pour les missions Apollo afin de régler les problèmes de navigation, de guidage et de commande de vol pouvant survenir. Le laboratoire de l'instrumentation du MIT est devenu le principal prestataire extérieur pour la conception, la mise au point et la construction des matériels et logiciels de l'ordinateur de guidage Apollo (AGC)<sup>43</sup>. C'était la première fois qu'un programme de vol spatial habité utilisait des ordinateurs en continu dans toutes les phases d'une mission. Le laboratoire du MIT avait noué un partenariat avec Fairchild Semiconductor pour fournir des puces de silicium à l'AGC, lequel est devenu le premier ordinateur à les utiliser. La décision de recourir aux puces de silicium était hardie, car cette technologie n'avait pas encore fait l'objet d'une vaste expérimentation<sup>44</sup>. L'AGC a été utilisé avec succès pour les missions en orbite terrestre, toutes les missions d'alunissage, les missions Skylab et le projet conjoint États-Unis d'Amérique-Union soviétique Apollo-Soyouz (1975). Les multiples innovations technologiques apportées à l'AGC, notamment au matériel, au logiciel et aux puces, étaient appelées à révolutionner non seulement les ordinateurs embarqués à bord des véhicules spatiaux, mais aussi le marché des ordinateurs pendant les cinq décennies qui ont suivi.

#### Intelligence artificielle

L'IA peut être globalement décrite comme un ensemble d'algorithmes capables d'exécuter des tâches qui relèvent traditionnellement de l'intelligence humaine. La NASA a développé l'IA pour la substituer aux décisions prises par les contrôleurs de mission sur Terre car le temps de latence pour les télécommunications entre la Terre et Mars ne leur permet pas de prendre des décisions en temps réel pour les missions robotiques<sup>45</sup>. Les inventions qui se sont succédé ont accéléré le traitement informatique, allégé les puces et permis de mettre en place des logiciels intégrés plus spécialisés. Aujourd'hui, l'IA fait partie de notre mode de vie. Les applications de navigation l'utilisent pour analyser la vitesse de la circulation routière et les aspirateurs intelligents le font pour scanner une pièce, identifier les obstacles et déterminer les trajets de nettoyage les plus efficaces. L'IA est indispensable au fonctionnement des véhicules routiers autonomes<sup>46</sup>.

---

## Conclusions de l'étude de cas

L'histoire du programme spatial américain est un exemple classique d'innovation axée sur une mission<sup>47</sup>. Par ailleurs, les activités d'innovation ont eu leurs caractéristiques propres. Elles avaient un client principal, le gouvernement ou l'un de ses organismes. La NASA a fait fond efficacement sur les entreprises privées et les universités en alignant ses buts et objectifs sur leurs activités de recherche. L'approche qu'elle a adoptée a pu varier en ce qui concerne la participation des prestataires extérieurs et leur degré d'autonomie, mais elle est restée pour l'essentiel centralisée et a largement consisté à leur attribuer des tâches ciblées. Les programmes spatiaux sont des projets complexes qui touchent à différents domaines de la technologie. Le rôle de la NASA a consisté à coordonner l'activité de scientifiques et d'entreprises experts de différentes disciplines pour qu'ils partagent leurs connaissances et œuvrent à la réalisation d'un même objectif.

Les innovations axées sur une mission mobilisent des connaissances de pointe pour atteindre dans le délai fixé des objectifs bien définis<sup>48</sup>. L'envoi d'un homme sur la Lune peut être considéré comme une mission de la NASA qui a atteint son objectif dans le délai prévu<sup>49</sup>. La NASA s'est principalement employée à formuler et préciser les problèmes et points de blocage plutôt qu'à imposer des solutions à ses prestataires. De plus, en faisant appel à des spécialistes de disciplines très

diverses mais adaptées au problème posé, elle a pu trouver des solutions qui rapprochent des domaines de la technologie par ailleurs distincts. Un autre point fort de sa stratégie d'innovation a consisté à suivre en temps voulu l'harmonisation des actions et l'affectation des ressources, afin de ne pas s'écarter de l'objectif fixé au départ. Une stratégie similaire pourrait-elle permettre de relever certains des grands défis de l'heure ? Le chapitre 3 élargira la discussion sur les politiques d'innovation qu'il pourrait être nécessaire d'adopter.

Dans la plupart des cas, les innovations que l'on doit à la NASA n'ont pas donné immédiatement lieu à une demande commerciale et évolutive dans le secteur civil. Toutefois, elles ont donné naissance à plusieurs technologies et secteurs d'activité<sup>50</sup>. Avec des délais certes divers, nombre de ces technologies ont débouché sur des applications civiles pour la plupart imprévues et pourtant d'une importance cruciale. Les capteurs à dispositif à couplage de charge (CCD), qui contiennent des grilles de pixels, découlent de l'objectif de la NASA de concevoir et de construire le télescope spatial Hubble<sup>51</sup>, qui est un observatoire fonctionnant depuis l'espace lancé pour la première fois en 1990. Les capteurs à dispositif à couplage de charge de Hubble ont produit des images du ciel profond de très bonne qualité. Ils sont devenus un secteur qui pèse plusieurs milliards de dollars et ils sont omniprésents dans des produits d'usage courant tels que les webcams et les appareils photo de smartphone. C'est là un exemple de trajectoire de l'innovation ultérieure relevant du domaine civil qui est issue d'un programme de la NASA et qui n'était ni directe ni prévisible.

La géopolitique est à l'origine des programmes spatiaux américain et soviétique. Mais plusieurs programmes apparus plus tard dans d'autres pays poursuivaient des buts commerciaux plus terrestres, axés davantage sur des applications relevant des télécommunications, de la navigation et de l'industrie des satellites. Cela vaut pour l'ASE et constitue probablement la principale différence entre elle et la NASA. Au cours des dernières années, plusieurs autres pays grands et petits, dont plus de 20 pays africains<sup>52</sup>, se sont mis à participer à l'exploration de l'espace. La baisse des coûts des technologies satellitaires et le caractère "disruptif" de leur développement, qui implique, comme pour l'informatique, la possibilité de sauter certaines phases, permettant ainsi aux retardataires de prendre plus facilement pied dans le secteur, ont créé une conjoncture propice pour les petits pays en développement. L'étude de cas suivante développe ces concepts en examinant l'industrie informatique en Asie de l'Est.

Les principales agences spatiales, comme la NASA et l'ASE, reprogramment des missions vers la Lune.

**Le cycle de vie très court de l'innovation de haute technologie, conjuguant ses effets avec ceux des politiques interventionnistes des gouvernements, a ouvert une fenêtre de tir pour apprendre et rattraper son retard**

Les objectifs techniques peuvent être différents, mais la pression concurrentielle – créée cette fois par le programme spatial chinois – demeure. De plus, les projets envisagés, tels qu’une mission sur Mars, voire l’implantation de colonies humaines permanentes sur la planète rouge, imposent une étroite collaboration entre les gouvernements, les entreprises privées et les milieux universitaires. La coopération sera nécessaire pour développer des systèmes de propulsion, mettre au point les technologies de protection contre le rayonnement cosmique et trouver des solutions énergétiques durables. Il en va de même pour des projets tels que les cultures alimentaires sur la Lune et l’extraction des ressources lunaires. Les avis divergent sur la question de savoir si les programmes spatiaux sont un moyen efficace d’utiliser les ressources en matière de recherche-développement. Mais la nouvelle rivalité spatiale entre les États-Unis d’Amérique et la Chine pourrait donner naissance à des technologies innovantes – et imprévisibles – dans les décennies qui viennent.

### 2.3 Essor de l’informatique dans les pays d’Asie de l’Est

#### Sauter certaines étapes pour se hisser dans le peloton de tête

Depuis 60 ans, la trajectoire de l’innovation suivie dans les pays d’Asie de l’Est est intimement liée à leur historique de rattrapage en matière de développement et économique. Ces pays sortent du lot en ayant su favoriser la création de capacités technologiques de pointe dans plusieurs secteurs. Au cours des dernières décennies, l’apparition d’innovateurs de premier plan dans un secteur informatique défini au sens large a été un trait essentiel et récurrent du développement économique de cette région. Par exemple, l’essor industriel du Japon est étroitement lié à son industrie de l’électronique grand public qui a pris de l’ampleur dans les années 1970 et 1980. La République de Corée et la province chinoise de Taiwan se sont par la suite affirmées comme deux des plus grandes innovatrices et fournisseuses de semi-conducteurs et d’écrans d’ordinateur. La croissance plus récente de la Chine a accompagné l’essor de ses entreprises de communication et présentes sur l’Internet<sup>53</sup>.

C’est ailleurs qu’ont été faites un grand nombre de découvertes scientifiques ayant débouché sur les produits sur lesquels repose l’industrie informatique et que ces produits ont commencé à être commercialisés. Mais les pays d’Asie de l’Est sont parvenus à acquérir les connaissances à la base de ces technologies, à “brûler les étapes” pour accéder aux plus récents cycles applicables aux produits et à s’investir dans une activité d’innovation de produits parmi les plus avancées du monde. À tel point que cette région joue

actuellement un rôle important dans l’orientation de la trajectoire de l’innovation de l’industrie informatique à l’échelon mondial.

Le succès de la région de l’Asie de l’Est dans le secteur informatique tient en partie aux caractéristiques mêmes de ce dernier. En effet, il combine un changement technologique rapide avec un cycle de vie du produit court et promet un rendement de l’investissement rapide et élevé. La fréquence des innovations peut accélérer l’obsolescence des technologies en place et, ce faisant, permettre aux retardataires de prendre plus facilement pied dans ce secteur. Par ailleurs, les pays de la région doivent largement leur succès dans ce domaine au rôle de leurs gouvernements et aux politiques de développement qui y ont favorisé l’innovation dans le secteur de l’informatique.

La présente étude de cas s’ouvre sur un bref historique de la politique industrielle menée dans la région, en particulier en Chine continentale, en République de Corée et dans la province chinoise de Taiwan. Elle examine les mécanismes ayant présidé au développement technologique de l’industrie informatique de ces pays. Elle donne des précisions sur les occasions qui leur ont été offertes de prendre directement pied dans différents sous-secteurs de cette industrie. Enfin, elle expose la contribution de la propriété intellectuelle au développement technologique de l’Asie de l’Est.

#### Modernisation rapide et investissements dans la haute technologie

Au cours des dernières décennies, l’Asie de l’Est a enregistré une croissance accélérée, en particulier par rapport à d’autres régions, notamment l’Amérique latine et l’Afrique. La croissance régulière des pays de l’Asie de l’Est a démarré à des moments différents, mais ces pays la doivent tous à la rapidité de leur modernisation et à l’investissement dans la haute technologie. Au Japon, d’abord, dans les années 1960 et 1970, les principaux produits informatiques fabriqués et exportés par les pays de la région ont été des produits demandant beaucoup de main-d’œuvre, tels que les radios, les petites calculatrices (analogiques), les postes de télévision et les réfrigérateurs. Toutefois, le cycle de vie très court de l’innovation de haute technologie, conjuguant ses effets avec ceux des politiques interventionnistes des gouvernements, a ouvert une fenêtre de tir pour apprendre et rattraper son retard. Les années 1980 ont vu les populations des pays d’Asie de l’Est se positionner sur les marchés des ordinateurs personnels, les enregistreurs de cassettes vidéo, les lecteurs de cassette audio et le matériel de télécommunication, comme les commutateurs de téléphonie fixe et les télécopieurs. Ont suivi, dans les années 1990, les puces à mémoire et les téléphones cellulaires sans fil, et, dans les années 2000, divers produits numériques, parmi lesquels les télévisions numériques, les systèmes de télécommunication sans fil et les smartphones.

Les économistes et les historiens essaient depuis longtemps d'expliquer le succès de l'expérience asiatique à l'aide de différents modèles, les deux le plus fréquemment invoqués étant le modèle dit du "vol d'oies" et le modèle "Best (Beijing-Seoul-Tokyo)"<sup>54</sup>. Le décollage économique du Japon entre 1955 et 1975 a entraîné un décollage similaire en République de Corée et dans la province chinoise de Taiwan dans les années 1970 et 1980. Selon le modèle dit du "vol d'oies", le Japon est le pays qui donne l'exemple en ce qui concerne la politique économique et en tant que fournisseur de technologies et de capitaux pour l'industrialisation grosse consommatrice de main-d'œuvre et orientée vers l'exportation des pays asiatiques voisins. Toutefois, ce modèle n'explique pas l'essor de la Chine après 1980. La taille du marché chinois et la diversité des secteurs se situant à différents niveaux de développement, ainsi que la complexité des relations entre les administrations locales et le gouvernement central en Chine nécessitent au moins deux types de modèles.

En ce qui concerne les stratégies d'apprentissage et d'accès à une base de connaissances étrangère, par exemple, on relève l'existence de certains mécanismes propres à la Chine. En premier lieu, ce pays a mis l'accent sur ce que l'on appelle l'ingénierie directe (ou conception descendante), qui permet d'acquérir des connaissances scientifiques et technologiques nouvelles ou en gestation dans des laboratoires universitaires avant de les appliquer depuis le sommet à la mise au point de produits commerciaux. C'est particulièrement manifeste dans le cas de la création de sociétés dérivées autour de la recherche menée par des universités chinoises, dont il sera question plus en détail plus loin. À l'inverse, la République de Corée et la province chinoise de Taiwan ont opté pour la rétro-ingénierie<sup>55</sup>, qui a consisté à développer un savoir-faire selon une démarche ascendante, en "autopsiant" des produits importés<sup>56</sup>. Ensuite, la Chine a acquis des technologies et des marques au moyen d'opérations de fusion et de rachat d'entreprises internationales<sup>57</sup>. Enfin, elle a utilisé le mécanisme de l'apprentissage parallèle auprès d'investisseurs directs internationaux afin de promouvoir les entreprises nationales<sup>58</sup>. Ces trois mécanismes peuvent être considérés comme constitutifs du modèle de "Beijing", dans la mesure où ils n'ont été explicitement adoptés ni par la République de Corée ni par la province chinoise de Taiwan<sup>59</sup>.

Cette diversité n'empêche pas que le développement de tous les pays d'Asie de l'Est présente des éléments communs. Ce sont notamment le rattrapage économique, la promotion des capacités des entreprises et branches d'activité privées, et les mesures adoptées par les gouvernements pour réduire les risques que peuvent courir les entreprises qui s'impliquent dans de nouvelles branches d'activité. C'est le modèle "Best". Les gouvernements ont mis en œuvre quatre moyens

pour promouvoir le renforcement des capacités de leurs entreprises. Premièrement, ils ont organisé l'accès à la base de connaissances et aux possibilités d'apprentissage existantes en mettant à contribution, par exemple, les instituts et consortiums de recherche publics. Deuxièmement, ils ont encouragé une participation à l'économie mondiale axée sur l'exportation dans le but d'acquérir des connaissances supplémentaires. Troisièmement, ils ont choisi les secteurs et technologies à développer et ont favorisé la substitution aux importations pour rendre leurs marchés moins lucratifs pour les entreprises étrangères. Enfin, pour que les entreprises ne soient pas cantonnées dans la fabrication de produits à faible marge ou à faible valeur ajoutée, ils les ont encouragées à renouveler constamment leurs activités en termes de valeur ajoutée, soit dans la même branche, soit en passant à une branche nouvelle à plus forte valeur ajoutée. Par exemple, les entreprises taiwanaises ont délaissé les calculatrices électroniques pour se tourner vers les ordinateurs portables, car l'ancienne industrie était arrivée à maturité et se dégradait en une activité à faible valeur ajoutée.

### Suivre ou créer une trajectoire ?

Pour rattraper leur retard dans le secteur de l'informatique, les entreprises peuvent suivre différentes trajectoires. Un fabricant d'équipement d'origine (OEM) – qui fabrique des composants pour les produits d'une autre entreprise – peut se muer en un fabricant concepteur d'origine (ODM), qui s'occupe à la fois de la conception et de la production. Celui-ci peut enfin devenir un fabricant de produits de marque d'origine (OBM)<sup>60</sup>. Au stade initial, un client – qui est le plus souvent une multinationale étrangère – fait fabriquer par contrat à des OEM un produit fini conformément à un certain cahier des charges. Technologiquement plus avancés, les ODM peuvent fabriquer un produit et se charger de l'essentiel du processus de conception, l'entreprise cliente s'occupant de la commercialisation. Dans l'industrie de la télévision de la fin des années 1960 et des années 1970, les entreprises taiwanaises étaient pour la plupart des OEM. À mesure que les ingénieurs taiwanais employés par ces entreprises maîtrisaient les techniques de conception, on les a vus quitter leur employeur pour créer leurs propres entreprises de fabrication et de conception d'origine.

Les OBM ont lancé leur propre marque; ils conçoivent et fabriquent de nouveaux produits, mènent une activité de recherche-développement et gèrent les ventes et la distribution. Toutefois, le passage du statut d'OEM à celui d'ODM, puis d'OBM n'est ni simple ni dénué de complications, et il n'est pas nécessairement linéaire. Les entreprises peuvent sauter une étape en commençant directement par l'étape suivante. C'est ainsi, par exemple, que nombre d'entreprises informatiques coréennes ont décidé de lancer d'emblée leur propre marque.

La transition et le rattrapage peuvent se faire selon l'une des trois manières indiquées ci-après<sup>61</sup>. Il y a d'abord le rattrapage qui "suit une trajectoire", l'entreprise retardataire suivant alors la même trajectoire linéaire que celles qui l'ont précédée, mais dans un délai plus court. Il y a aussi le rattrapage aux fins duquel des étapes sont sautées : les retardataires suivent la trajectoire tout en sautant certaines étapes. Il y a enfin un rattrapage avec création de trajectoire; en d'autres termes, les entreprises retardataires créent leur propre trajectoire de développement technologique. Par exemple, dans les années 1980, lorsque Samsung envisageait de produire des puces de mémoire vive dynamique (D-RAM) de 16K-bit, la technologie se trouvait en phase de transition. L'entreprise en a profité pour passer directement à la production de D-RAM de 64K-bit. Ce faisant, elle a pris une longueur d'avance sur les autres entreprises qui, par inertie, n'avaient pas encore commencé à produire des puces de 64K-bit.

D'une manière générale, les processus de rattrapage industriel peuvent être étroitement liés aux caractéristiques d'un secteur donné. Dans les secteurs où les innovations sont peu fréquentes et hautement prévisibles – ce qui n'est pas le cas de celui de l'informatique –, les stratégies des entreprises privées consistant à suivre une trajectoire ou à sauter certaines étapes peuvent suffire. Mais dans les secteurs comme l'informatique, où les technologies sont très fluides, impliquent des risques élevés et exigent des capitaux importants, le succès du rattrapage peut dépendre d'une collaboration entre les secteurs public et privé et d'une stratégie de création de trajectoire.

### Rôle du gouvernement

Dans le contexte de l'Asie de l'Est, le rôle des gouvernements pour ce qui est de définir la trajectoire de l'innovation est centré sur la phase de développement et de rattrapage. Les politiques gouvernementales ont visé à permettre aux entreprises privées locales d'accéder aux connaissances existantes et de travailler dans des conditions moins incertaines. Par exemple, en République de Corée, les instituts de recherche publics ont aidé au départ les entreprises privées en leur donnant accès gratuitement ou peu s'en faut à leurs résultats de recherche-développement. Ces entreprises ont également pu participer à des consortiums de recherche-développement public-privé pour leurs projets à grande échelle et à risque élevé. En 1989, le Gouvernement coréen a créé un comité de développement de la télévision haute définition, où 17 institutions, dont des entreprises privées, des instituts de recherche publics et des universités, se sont fait représenter.

De plus, les gouvernements de la région ont accordé aux entreprises privées locales des subventions à

l'exportation pour faciliter leur intégration dans l'économie mondiale et leur permettre d'acquérir des connaissances. Il est également à noter qu'ils sont intervenus en ciblant les secteurs ou technologies à développer et en favorisant la substitution aux importations. Ils ont obtenu ce résultat en limitant le nombre de nouveaux venus dans un secteur donné afin d'assurer à celui-ci des bénéfices stables. Cette limitation a été l'un des principaux éléments de la politique industrielle japonaise<sup>62</sup>.

### Rôle du secteur privé

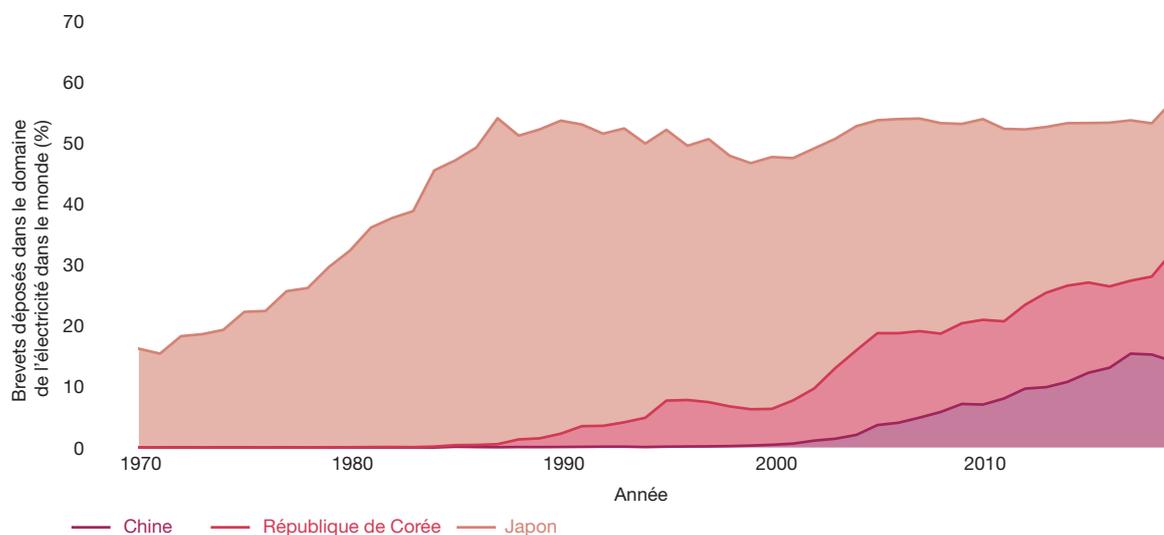
Le secteur privé a de son côté très largement contribué à définir la trajectoire de l'innovation en Asie de l'Est. La chronologie a été différente d'un pays à l'autre, mais l'industrie informatique nationale est parvenue à rattraper et dépasser les entreprises informatiques occidentales. Le passage des petites et moyennes entreprises (PME) privées taiwanaises du statut d'OEM à celui d'ODM a culminé dans les années 1980 à l'ère des calculatrices électroniques. Des entreprises comme Acer, société taiwanaise, et d'autres ont alors été incitées à entrer sur les marchés des ordinateurs portables et des téléphones mobiles (voir plus haut)<sup>63</sup>.

Les sociétés coréennes Samsung et LG sont deux des principales entreprises de technologie mondiales. Spécialisée au départ dans la fabrication de textiles et de sucre raffiné, Samsung n'est entrée sur le marché de l'électronique qu'en 1969. Toutefois, en privilégiant les économies d'échelle, l'intégration verticale et des investissements importants dans la recherche-développement, elle est devenue non seulement une grande OEM, mais aussi l'une des premières OBM du monde.

Une tendance similaire s'est manifestée en Chine vers la fin du vingtième siècle : des entreprises comme Huawei et ZTE ont rejoint les premières entreprises OBM du monde. Plus récemment, la Chine a produit trois géants dans le secteur des plateformes, dans lequel des entreprises exploitent et créent de vastes réseaux en ligne d'utilisateurs et de ressources accessibles à la demande. Ces entreprises – Baidu, Alibaba et Tencent – vont faire entrer la Chine dans l'ère de la quatrième révolution industrielle, et leur statut et leurs activités sont considérés comme faisant jeu égal avec Google, Amazon et Facebook<sup>64</sup>. Leur remarquable réussite dans le domaine des activités de plateforme et de commerce électronique découle du fait qu'elles ont su allier une capacité technique et une connaissance approfondie du vaste marché chinois. En d'autres termes, elles font preuve d'une grande souplesse tant pour développer une technologie de pointe que pour l'adapter au contexte chinois.

## Il n'a fallu aux pays asiatiques que quelques décennies pour dominer l'innovation mondiale dans les technologies fondées sur l'électricité

Figure 2.3 Part mondiale de brevets déposés dans le domaine de l'électricité, certains pays asiatiques, 1970-2018



Source : Base de données mondiale sur les statistiques en matière de brevets (PATSTAT) de l'Office européen des brevets (OEB) (PATSTAT, octobre 2021).

Notes : Basé sur les domaines technologiques de l'OMPI appliqués uniquement aux premiers dépôts. L'activité mondiale en matière de brevets dans le domaine de l'électricité renvoie à l'activité de dépôt de brevets à travers le monde dans les secteurs suivants : techniques audiovisuelles, techniques de communication de base, informatique, machines et appareils électriques, énergie électrique, méthodes de traitement des données à des fins de gestion, semi-conducteurs et télécommunications.

### Rôle des milieux universitaires

Le renforcement des systèmes éducatifs, depuis l'école primaire jusqu'à l'université, a permis aux gouvernements des pays d'Asie de l'Est d'obtenir de remarquables succès au fil des ans dans ce domaine, l'industrie pouvant ainsi compter sur une vaste réserve de main-d'œuvre qualifiée. Dans les premiers temps de l'essor technologique, ces gouvernements ont aidé leurs étudiants à faire des études d'ingénierie et de sciences à l'étranger, mais se sont de plus en plus employés à développer eux-mêmes de solides systèmes universitaires. Ils ont dû y consacrer des investissements publics importants et constants. La Chine, par exemple, a mis très fortement l'accent sur les universités et la production de connaissances scientifiques fondamentales. Elle a également pu compter sur une inversion de la fuite des cerveaux, de nombreux Chinois titulaires de diplômes décernés par les meilleures universités occidentales retournant dans leur pays pour devenir professeurs ou créer leur propre entreprise<sup>65</sup>.

Un grand nombre d'universités chinoises dirigent leurs propres entreprises, qui diffèrent des sociétés dérivées ordinaires. Elles les créent, mais elles s'occupent aussi de les doter en personnel, de les financer et d'en contrôler la gestion<sup>66</sup>. Parmi les entreprises nées de la recherche universitaire, on peut citer l'exemple de Lenovo, entreprise multinationale de technologie

fondée en 1984 à Beijing par une équipe de 11 ingénieurs de l'Institut de technologie informatique de l'Académie chinoise des sciences. La première société de logiciels cotée en bourse en Chine est également née de la recherche universitaire; il s'agit de Dongruan, qui est dirigée par l'Université Dongbei de Shenyang. Les universités et l'industrie sont en relation assez étroite en Chine, ce qui contraste avec la situation au Japon et en République de Corée, où les universités ont toujours eu des liens faibles et indirects avec l'industrie. D'une façon générale, les universités et les instituts de recherche scientifique n'ont pas joué, au moins dans les premiers temps du développement des pays d'Asie de l'Est, un rôle aussi central que celui des ministères et du secteur privé dans le développement économique de ces pays.

### Rôle des droits de propriété intellectuelle

L'importance des droits de propriété intellectuelle en informatique tient au fait que les produits se composent souvent d'un très grand nombre d'éléments qui utilisent un large éventail de technologies complexes. Ces technologies sont cumulatives, évoluent rapidement et ont une durée d'existence courte. Les technologies mises en œuvre dans un smartphone, qui comprend environ 2000 pièces physiques, vont des semi-conducteurs, batteries, mémoire et storage, appareils

photo et capteurs à l'informatique ou aux techniques de communication<sup>67</sup>.

Aucune entreprise n'est propriétaire de tous les brevets associés à ces technologies. Toutefois, les entreprises informatiques bénéficiaires détiennent généralement d'importants portefeuilles de brevets afin de moins dépendre de brevets de tiers et d'accroître les redevances que leur versent les entreprises dont la technologie peut utiliser les leurs<sup>68</sup>. Les pays d'Asie de l'Est l'ont compris de bonne heure et ont favorisé le dépôt de brevets par leurs entreprises nationales à mesure qu'elles prenaient pied sur le marché mondial de l'informatique. Par exemple, la procédure ayant opposé Texas Instruments et Samsung au sujet des semi-conducteurs dans les années 1980 a incité le Gouvernement coréen et Samsung à investir massivement dans les brevets. La figure 2.3 décrit l'envolée des dépôts de brevets dans le domaine de l'informatique dans les pays d'Asie de l'Est.

De plus, au cours des deux dernières décennies, la géographie de la titularité des brevets essentiels à une norme (SEP) s'est progressivement modifiée avec l'apparition de nouvelles technologies et le développement des plateformes communes, comme l'Internet. Un SEP est un brevet qu'un fabricant doit utiliser pour fabriquer un produit conforme à une norme. Les titulaires de SEP s'engagent à octroyer des licences sur leurs brevets selon des conditions équitables, raisonnables et non discriminatoires (FRAND). Il arrive également que les titulaires de SEP fabriquent le produit conforme à une norme auquel l'un de leurs SEP est incorporé<sup>69</sup>.

Les pays d'Asie de l'Est en sont venus à détenir le plus grand nombre de SEP dans plusieurs technologies informatiques nouvelles, comme dans le cas de la technologie sans fil. Plusieurs technologies actuelles et futures utilisent la 5G – la cinquième génération de réseau mobile. Ce sont, par exemple, les véhicules autonomes, les maisons intelligentes et les appareils de contrôle de la santé portables, qui figurent parmi les dispositifs et objets connus collectivement sous le nom d'Internet des objets (IoT). Les SEP nécessaires à l'utilisation des technologies IoT et 5G sont détenus pour la plupart par des entreprises de pays d'Asie de l'Est (par exemple, LG, Samsung, Panasonic, ZTE, Huawei, Haier et NEC), suivies par des entreprises américaines (comme Cisco, Microsoft, Google/Alphabet, Microsoft, Qualcomm, Apple et IBM) et européennes (Ericsson et Nokia).

## Conclusions de l'étude de cas

Les autres pays en développement peuvent tirer des enseignements précieux de la trajectoire de l'innovation que les pays d'Asie de l'Est ont suivie. Aussi important-il d'en comprendre également les particularités. Tout

d'abord, en dépit de la rivalité ayant opposé ces pays et de différenciations d'ordre historique, l'évolution technologique de l'un d'eux a fini par gagner les pays voisins. Ensuite, une corrélation étroite a été observée entre leur rattrapage technologique et une expansion de l'industrie informatique dans la région. Les progrès technologiques de cette industrie présentent des caractéristiques spécifiques qui facilitent ce processus. Les gouvernements ont adapté leurs politiques à ces caractéristiques afin de mettre en place et de renforcer des capacités dans le secteur privé. La simple reproduction de ces politiques dans des contextes différents et dans d'autres secteurs pourrait ne pas produire les mêmes résultats. Le chapitre 1 développe ces concepts en examinant les besoins actuels des pays en développement.

Par ailleurs, le modèle de développement de l'Asie de l'Est a eu des incidences très importantes sur la trajectoire mondiale d'innovation. Les pays de cette région ont alimenté le marché mondial en produits informatiques bon marché. En fabriquant ces produits bon marché, ils ont également apporté leur contribution à diverses innovations progressives de procédé et de produit. Toutefois, leur contribution à l'innovation ne se limite pas à ces aspects. En développant des technologies de pointe, ces pays contribuent aussi à définir la future trajectoire de l'innovation dans le cadre des troisième et quatrième révolutions industrielles.

## 2.4 Résumé et conclusions du chapitre

La trajectoire de l'innovation a beaucoup évolué, surtout depuis la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Le chapitre 1 a examiné les différents éléments conceptuels expliquant les changements d'orientation. Le présent chapitre donne à voir trois exemples tirés de l'histoire qui illustrent ces éléments conceptuels : la Seconde Guerre mondiale, la course à l'espace et l'essor de l'industrie informatique en Asie de l'Est.

Les innovations découlant de l'activité de l'OSRD et du CMR sont des cas d'école en matière d'innovation de crise (tout en englobant certains éléments de l'innovation axée sur une mission), tandis que le programme consistant à envoyer un homme sur la Lune est l'exemple par excellence de l'innovation axée sur une mission. L'essor de l'informatique en Asie de l'Est est un cas classique de développement. Les stratégies et les méthodes adoptées dans chaque cas présentent certaines similitudes et certaines différences. L'OSRD et la NASA ont tous les deux mis en œuvre une approche descendante et centralisée de la formulation des problèmes. Ils ont fait appel au concours des universités et des entreprises privées pour atteindre leurs objectifs. En plus de fournir le capital humain, matériel et politique, ils

ont apporté une contribution décisive en rassemblant, organisant et gérant les divers éléments à leur disposition. On ne saurait trop insister sur l'importance de cette fonction. Dans les deux cas, le principal rôle du gouvernement a consisté à faciliter l'échange de connaissances, en d'autres termes à établir des voies de communication et de coordination directes entre les participants, ce qui a réduit les doubles emplois et accru l'efficacité.

Une différence fondamentale entre les trois études de cas était la nature de la demande connexe. Pendant la Seconde Guerre mondiale et la course à l'espace, le Gouvernement des États-Unis d'Amérique a stimulé la demande en tant que client initial et principal. Dans le cas du développement de l'informatique en Asie de l'Est, la demande a été pilotée par les grands marchés commerciaux, aussi bien nationaux qu'étrangers. Le rôle des gouvernements des pays de cette région a consisté à soutenir les entreprises privées nationales en adoptant des politiques qui réduisaient le risque et facilitaient leur accès à des connaissances de pointe. Les trois cas se distinguent également par la vitesse à laquelle il a fallu répondre à la demande. La situation d'urgence créée par la guerre a entraîné la nécessité de développer rapidement l'innovation. Si la vitesse a également eu son importance dans le cas de la rivalité "astropolitique" entre les États-Unis d'Amérique et l'Union soviétique, la course à l'espace et les innovations de l'Asie de l'Est dans le domaine de l'informatique se sont étalées sur une plus longue période. La nature et le décalage dans le temps des innovations et industries ultérieures ont également été différents. Nombre d'innovations découlant des activités de l'OSRD et du CMR, comme les vaccins et la pénicilline, ont trouvé des marchés civils immédiatement après la Seconde Guerre mondiale. Les innovations consécutives aux programmes spatiaux, comme l'IA et les panneaux solaires, qui relevaient alors de la science d'avant-garde, ont été plus lentes à décoller. Mais lorsqu'elles l'ont fait, elles ont eu d'immenses répercussions. Beaucoup d'autres innovations créées pour le programme spatial étaient très spécifiques à ce programme et n'ont eu pratiquement aucune application commerciale directe (ce qui reste vrai aujourd'hui). Toutefois, les applications des innovations étaient souvent suffisamment génériques pour avoir des incidences à long terme sur différents produits et services commerciaux.

L'humanité devant faire face à de grands défis mondiaux, tels que les changements climatiques, qu'elle ne pourra relever qu'en générant de nouvelles idées et innovations, il est important d'appréhender les moments de l'histoire où la société a donné une impulsion à des changements technologiques accélérés. Comme le montrent les trois études de cas, l'interaction entre les gouvernements et les marchés peuvent prendre bien des formes, qui peuvent elles-mêmes influencer à court et à long terme la trajectoire de l'innovation.

## Notes

- 1 Cette étude de cas s'inspire de Sampat (2022).
- 2 Voir Gross et Sampat (2020b).
- 3 Voir Gross et Sampat (2020b).
- 4 L'entité ayant précédé l'OSRD, la Commission nationale de recherche pour la défense (NDRC), a été créée en juillet 1940.
- 5 Voir Bush (1970).
- 6 Voir Gross et Sampat (2021).
- 7 Voir Gross et Sampat (2021).
- 8 Voir Neushul (1993).
- 9 Voir Neushul (1993).
- 10 Voir Achilladelis (1993) et OMPI (2015).
- 11 Voir Swann (1983).
- 12 Voir Brabin (2014).
- 13 Voir Andrus (1948).
- 14 Voir Slater (2009).
- 15 Gross et Sampat (2020a).
- 16 Voir Hoyt (2006).
- 17 Voir Hoyt (2006).
- 18 Voir Gross et Sampat (2021).
- 19 Voir Agarwal *et al.* (2021).
- 20 Voir Gross et Sampat (2021).
- 21 Voir OMPI (2015).
- 22 Voir Gross et Sampat (2021).
- 23 Voir Andrus (1948).
- 24 Voir Creager (1999).
- 25 Voir Creager (1999).
- 26 Voir Rasmussen (2002).
- 27 Voir Rasmussen (2002).
- 28 Voir Gross et Sampat (2021).
- 29 Voir Swain (1962) et Fox (1987).
- 30 Voir Fox (1987).
- 31 Cette étude de cas s'inspire de Hertzfeld *et al.* (2022).
- 32 Voir Smith (2011).
- 33 Consulter le site <https://technology.nasa.gov/patent/TOP2-226>.
- 34 Consulter le site [https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-space\(2\)](https://www.compositesworld.com/articles/composites-in-space(2)).
- 35 Consulter le site <https://www.nasa.gov/feature/50-years-ago-president-nixon-directs-nasa-to-build-the-space-shuttle>.
- 36 Voir Perlin (1999).
- 37 Voir O'Neill (2014) et consulter le site [https://en.wikipedia.org/wiki/Opportunity\\_\(rover\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Opportunity_(rover)).
- 38 Voir Bennett (2021).
- 39 Consulter le site <https://www.energy.gov/ne/office-nuclear-energy>.
- 40 Voir Cataldo and Bennett (2011).
- 41 Consulter le site <https://www.usnews.com/education/best-colleges/slideshows/12-colleges-that-have-produced-the-most-astronauts>.
- 42 Voir Mathematica, Inc. (1976).
- 43 Voir "MIT chosen as hardware and software contractor" au chapitre 2 de Computers in Spacelight: The NASA Experience, disponible sur le site: <https://history.nasa.gov/computers/contents.html>.
- 44 Voir Ceruzzi (2015).
- 45 Voir Bluck (2004).
- 46 Voir OMPI (2019).
- 47 Voir Mazzucato (2018).
- 48 Voir Ergas (1987).
- 49 Voir Agarwal *et al.* (2021).
- 50 Voir Moeen et Agarwal (2017).
- 51 Voir Roy *et al.* (2019).
- 52 Consulter le site <https://www.economist.com/middle-east-and-africa/2021/06/17/africa-is-blasting-its-way-into-the-space-race>.
- 53 Voir Lee (2021).
- 54 Voir Lee et Mathews (2010).
- 55 Voir Eun *et al.* (2006).
- 56 Voir Kim (1997).
- 57 Voir Huang et Sharif (2015).
- 58 Voir Mu et Lee (2005).
- 59 Voir Lee *et al.* (2011).
- 60 Voir Hobday (1994).
- 61 Voir Lee et Lim (2001).
- 62 Voir Johnson (1982).
- 63 Voir Amsden et Chu (2003).
- 64 Voir Wang (2012).
- 65 Voir OMPI (2017).
- 66 Voir Eun *et al.* (2006).
- 67 Voir OMPI (2017).
- 68 Voir Hall et Ziedonis (2001).
- 69 Consulter le site [https://www.wipo.int/wipo\\_magazine/en/2015/03/article\\_0003.html](https://www.wipo.int/wipo_magazine/en/2015/03/article_0003.html).

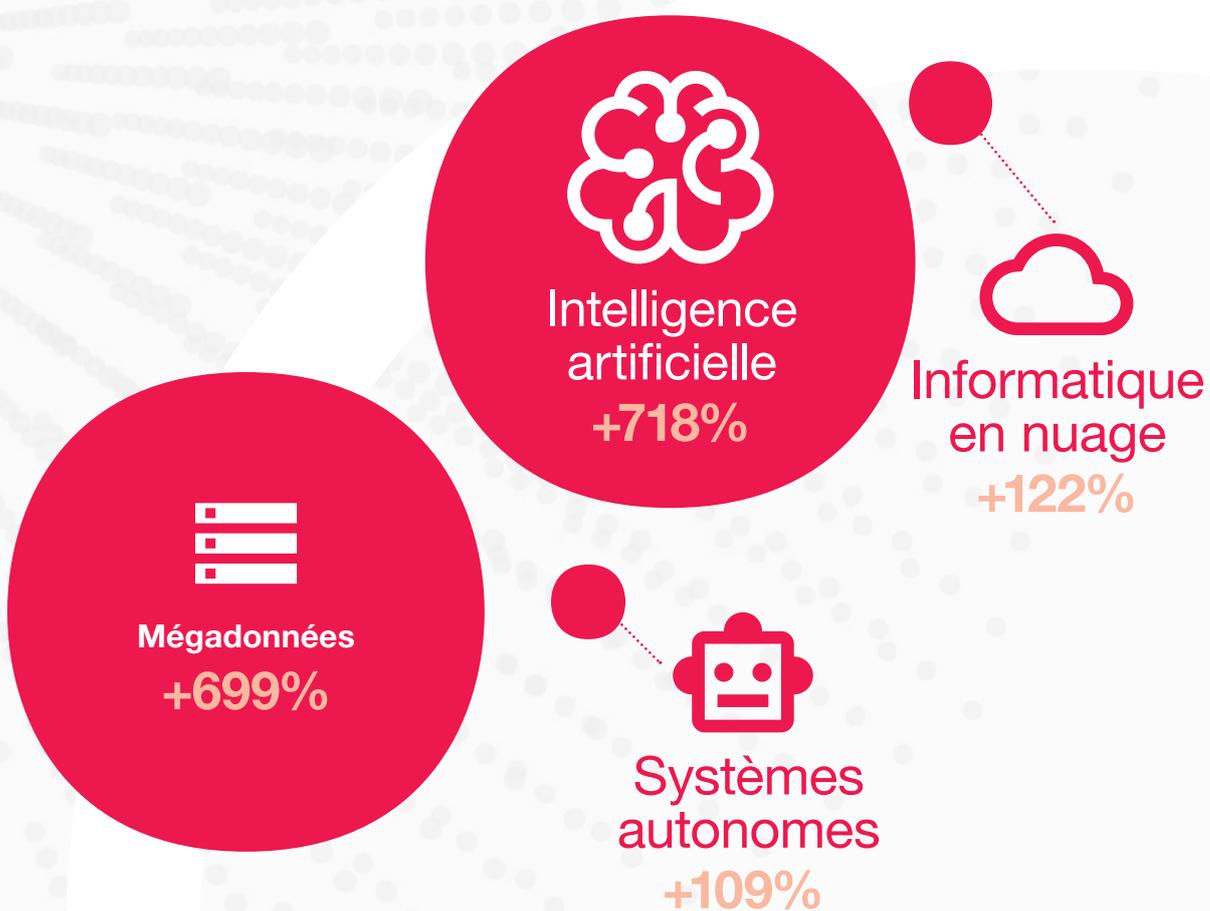
## Bibliographie

- Achilladelis, B. (1993). The dynamics of technological innovation: The sector of antibacterial medicines. *Research Policy*, 22(4), 279–308.
- Agarwal, R., S. Kim and M. Moeen (2021). Leveraging private enterprise: Incubation of new industries to address the public sector's mission-oriented grand challenges. *Strategy Science*, 6(4).
- Amsden, A. and W.-W. Chu (2003). *Beyond Late Development: Taiwan's Upgrading Policies*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Andrus, E.C. (1948). *Advances in Military Medicine, Made by American Investigators*. Little, Brown and Company.
- Bennett, L.G. (2021). Radioisotope power: Historical review. *Encyclopedia of Nuclear Energy*, 174–190. Amsterdam: Elsevier.
- Bluck, J. (2004). NASA develops robust artificial intelligence for planetary rovers. NASA. Available at: [https://www.nasa.gov/vision/universe/roboticexplorers/robust\\_artificial\\_intelligence\\_jb.html](https://www.nasa.gov/vision/universe/roboticexplorers/robust_artificial_intelligence_jb.html).
- Brabin, B.J. (2014). Malaria's contribution to World War One – The unexpected adversary. *Malaria Journal*, 13(1), 1–22.
- Bush, V. (1970). *Pieces of the Action*. Morrow.
- Cataldo, R.L. and G.L. Bennett (2011). US space radioisotope power systems and applications: Past, present and future. In Singh, N. (ed.) *Radioisotopes: Applications in Physical Sciences*. IntechOpen, 473–496.
- Ceruzzi, P. (2015). Apollo guidance computer and the first silicon chips. Smithsonian National Air and Space Museum. Available at: <https://airandspace.si.edu/stories/editorial/apollo-guidance-computer-and-first-silicon-chips>.
- Creager, A.N. (1999). What blood told Dr Cohn: World War II, plasma fractionation, and the growth of human blood research. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 30(3), 377–405.
- Ergas, H. (1987). Does technology policy matter. In Guile, B.R. and H. Brooks (eds), *Technology and Global Industry: Companies and Nations in the World Economy*. Washington D.C.: National Academies Press, 191–245.
- Eun, J-H, K. Lee and G. Wu (2006). Explaining the “university-run enterprises” in China: A theoretical framework for university–industry relationship in developing countries and its application to China. *Research Policy*, 35(9), 1329–1346.
- Fox, D.M. (1987). The politics of the NIH extramural program, 1937–1950. *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, 42(4), 447–466.
- Gross, D.P. and B.N. Sampat (2020a). *Inventing the Endless Frontier: The Effects of the World War II Research Effort on Post-war Innovation*. Working Paper Series, no. 27375. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w27375>.
- Gross, D.P. and B.N. Sampat (2020b). *Organizing Crisis Innovation: Lessons from World War II*. Working Paper Series, no. 27909. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w27909>.
- Gross, D.P. and B.N. Sampat (2021). *Crisis Innovation Policy from World War II to COVID-19*. Working Paper Series, no. 28915. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w28915>.
- Hall, B.H. and R.H. Ziedonis (2001). The patent paradox revisited: An empirical study of patenting in the US semiconductor industry, 1979–1995. *Rand Journal of Economics*, 32(1), 101–128.
- Hertzfeld, H.R., B. Staats and G. Leaua (2022). *Innovations in the Exploration of Outer Space*, WIPO Working Paper No. 71, World Intellectual Property Organization
- Hobday, M. (1994). Export-led technology development in the four Dragons. *Development and Change*, 25(2), 333–361.
- Hoyt, K. (2006). Vaccine innovation: Lessons from World War II. *Journal of Public Health Policy*, 27(1), 38–57.
- Huang, C. and N. Sharif (2015). Global technology leadership: The case of China. *Science and Public Policy*, 43(1), 62–73.
- Johnson, C. (1982). *MITI and the Japanese Miracle: The Growth of Industrial Policy, 1925–1975*. Stanford University Press.
- Kim, L.S. (1997). *Imitation to Innovation: The Dynamics of Korea's Technological Learning*. Boston, MA: Harvard Business School Press.
- Lee, K. (2021). (forthcoming), *China's Technological Leapfrogging and Economic Catch-up*. Oxford University Press.
- Lee, K. (2022). Unpublished background research commissioned for the World Intellectual Property Report 2022. Geneva: World Intellectual Property Organization
- Lee, K. and C. Lim (2001). Technological regimes, catching-up and leapfrogging: Findings from the Korean industries. *Research Policy*, 30(3), 459–483.

- Lee, K. and J. Mathews (2010). From the Washington Consensus to the BeST Consensus for world development. *Asian-Pacific Economic Literature*, 24(1), 86–103.
- Lee, K., M. Jee and J.H. Eun (2011). Assessing China's economic catch-up at the firm level and beyond: Washington consensus, East Asian consensus and the Beijing model. *Industry and Innovation*, 18(5), 487–507.
- Mathematica, Inc. (1976). Quantifying the Benefits to the National Economy from Secondary Applications of NASA Technology. US National Aeronautics and Space Administration.
- Mazzucato, M. (2018). Mission-oriented innovation policies: Challenges and opportunities. *Industrial and Corporate Change*, 27(5), 803–815. DOI: <https://doi.org/10.1093/icc/dty034>.
- Moeen, M. and R. Agarwal (2017). Incubation of an industry: Heterogeneous knowledge bases and modes of value capture. *Strategic Management Journal*, 38(3), 566–587.
- Mu, Q. and K. Lee (2005). Knowledge diffusion, market segmentation and technological catch-up: The case of the telecommunication industry in China. *Research policy*, 34(6), 759–783.
- Neushul, P. (1993). Science, government and the mass production of penicillin. *Journal of the History of Medicine and Allied Sciences*, 48(4), 371–395.
- O'Neill, I. (2014). Opportunity: The amazing self-cleaning Mars Rover. *Space*, April 2014. Available at: <https://www.space.com/25577-mars-rover-opportunity-solar-panels-clean.html>.
- Perlin, J. (1999). From Space to Earth: The Story of Solar Electricity. Earthscan.
- Rasmussen, N. (2002). Steroids in arms: Science, government, industry, and the hormones of the adrenal cortex in the United States, 1930–1950. *Medical History*, 46(3), 299–324.
- Roy, R., C.M. Lampert and M.B. Sarkar (2019). The pre-commercialization emergence of the combination of product features in the charge-coupled device image sensor. *Strategic Entrepreneurship Journal*, 13(4), 448–477.
- Sampat, B. (2022). World War II and The Direction of Medical Innovation, WIPO Working Paper No. 70, World Intellectual Property Organization
- Slater, L. (2009). *War and Disease*. Rutgers University Press.
- Smith, B.L.R. (2011). American Science Policy since World War II. Washington D.C.: Brookings Institution Press.
- Swain, D.C. (1962). The rise of a research empire: NIH, 1930 to 1950. *Science*, 138(3546), 1233–1237.
- Swann, J.P. (1983). The search for synthetic penicillin during World War II. *The British Journal for the History of Science*, 16(2), 154–190.
- U.S. Government (2021) Economic Report of the President, Figure 8.1, p. 229
- Wang, X. (2012). Foreign direct investment and innovation in China's e-commerce sector. *Journal of Asian Economics*, 23(3), 288–301.
- WIPO (World Intellectual Property Organization) (2015). World Intellectual Property Report 2015: Breakthrough Innovation and Economic Growth. Geneva: WIPO. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=3995>.
- WIPO (2017). World Intellectual Property Report 2017: Intangible Capital in Global Value Chains. Geneva: WIPO. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4225&plang=EN>.
- WIPO (2019). World Intellectual Property Report 2019: The Geography of Innovation: Local Hotspots, Global Networks. Geneva: WIPO. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4467&plang=EN>.

# Technologies numériques en croissance rapide

Dépôts de brevets 2015-2020



# La trajectoire de l'innovation : les défis de demain

**Alors que nous entrons dans la troisième décennie du XXI<sup>e</sup> siècle, des forces nouvelles et puissantes déterminent la trajectoire de l'innovation dans la science, la technologie et la médecine. Si de nombreuses forces sont en présence, trois se distinguent particulièrement.**

Tout d'abord, la pandémie de COVID-19 a créé et, en partie, donné un coup d'accélérateur à la demande de nouvelles technologies pour lutter contre la propagation du virus et traiter l'infection. La communauté scientifique et technique a relevé le défi en développant, avec une aide considérable des gouvernements, une série de vaccins en un temps record. Cette crise sanitaire mondiale a profondément influencé la manière dont les gens travaillent, se déplacent, communiquent et se divertissent. Il est encore trop tôt pour dire à quoi ressemblera la nouvelle "normalité" d'après la pandémie, mais de nombreux changements sont irréversibles. La pandémie a entraîné une numérisation plus rapide (voir plus loin) et a brisé de nombreux tabous sur le travail et la vie sociale. Les innovateurs sont entrés en action – et continueront de le faire dans les prochaines années – pour fournir les technologies nécessaires à ce nouvel environnement.

Ensuite, la lutte contre le changement climatique est devenue un impératif et figure en bonne place dans les programmes politiques aux quatre coins du monde. La réalisation d'objectifs ambitieux en matière de réduction des émissions de carbone dépendra de l'émergence et de l'adoption de technologies innovantes. Les mesures politiques et le financement par des fonds publics donneront de plus en plus la priorité aux investissements dans de nouvelles technologies. On observe déjà des signes de progrès encourageants, comme en témoigne la chute des prix des technologies de production d'énergie renouvelable, telles que les panneaux solaires. Il faut toutefois aller plus loin. Permettre une transition vers la neutralité carbone, à savoir l'équilibre entre l'émission et l'absorption de carbone, sera un moteur d'innovation dans les prochaines décennies.

Enfin, la troisième force à l'œuvre est la révolution numérique ou ce que d'aucuns qualifient de quatrième révolution industrielle. Elle a vu le déploiement généralisé des technologies numériques (numérisation), des ensembles de données gigantesques (mégadonnées)

et des processus toujours plus complexes d'automatisation et d'intelligence artificielle (IA). Ce sont des exemples de technologies généralistes, à savoir des technologies utilisables dans de nombreux secteurs et industries qui peuvent induire d'autres innovations ultérieures (voir le chapitre 1). Le pouvoir de ces nouvelles technologies numériques généralistes et le fait qu'elles soient conçues en réseau suscitent des problèmes de sécurité nationale, en raison de la vulnérabilité potentielle des systèmes de défense au piratage, par exemple. De leur côté, les gouvernements ont donné la priorité au développement de capacités technologiques nationales, ce qui a donné naissance à une nouvelle génération de politiques industrielles axées sur l'innovation dans le monde entier.

Au vu des forces en présence, quelle trajectoire l'innovation va-t-elle emprunter ? La plupart des investissements dans l'innovation fixent des objectifs finaux bien définis, comme le programme Moon (voir le chapitre 2), ce qui permet de prédire les changements technologiques qui interviendront à court et moyen terme. Pour autant, la trajectoire effective de l'innovation demeure incertaine, car certains objectifs ne seront pas atteints, tandis que d'autres seront dépassés. En outre, si l'histoire peut nous fournir des indices, les changements à long terme de la trajectoire de l'innovation et leurs conséquences socioéconomiques ne peuvent être prédits avec certitude.

Le présent chapitre analyse en détail les trois forces susvisées. Ce faisant, il étudie les changements intervenus dans les écosystèmes de l'innovation qui reconfigurent sa trajectoire. Il soulève également la question de savoir comment les politiques publiques peuvent orienter la trajectoire de l'innovation pour répondre au mieux aux besoins de la société et aux grands défis du monde.

Ce chapitre comporte quatre parties. Les trois sections qui suivent présentent des études de cas illustrant

la manière dont les écosystèmes de l'innovation répondent à quelques-uns des défis mondiaux. La section 3.1 se penche sur la crise de la COVID-19 et met en évidence la façon dont les efforts concertés des secteurs public et privé ont abouti au développement de plusieurs vaccins offrant un degré élevé de protection contre le virus. Elle souligne l'importance de disposer d'un écosystème d'innovation solide et capable de réagir de manière similaire à l'avenir. La section 3.2 porte sur la nécessité de s'attaquer de toute urgence au changement climatique. Elle examine la nature de cet énorme défi et souligne combien toutes les parties prenantes pertinentes de l'innovation, y compris les ménages, ont un rôle à jouer dans la lutte contre ce phénomène. La section 3.3 est consacrée à l'essor des technologies numériques généralistes et à la manière dont elles peuvent inspirer les innovations nécessaires pour relever les différents défis mis en lumière dans ce chapitre. La section 3.4 énonce des enseignements importants de ces trois études de cas afin d'inciter les gouvernements et les responsables politiques à jouer un rôle actif dans la promotion de solutions aux défis sociétaux, tout en agissant pour atténuer les effets perturbateurs que ces innovations pourraient avoir dans des domaines comme l'emploi<sup>2</sup>. Enfin, la section 3.5 clôt ce chapitre par quelques messages politiques forts.

### 3.1 Les enseignements de la COVID-19

La propagation du virus SARS-CoV-2 dans les premiers mois de 2020 a fait trembler le monde. Le virus a rapidement submergé les services d'urgence et les unités de soins intensifs des hôpitaux et causé la mort d'un nombre élevé de personnes en un laps de temps relativement court. L'Organisation mondiale de la Santé a déclaré que la COVID-19 était responsable de près de 5,5 millions de décès, selon un décompte arrêté le 11 janvier 2022<sup>3</sup>. Beaucoup considèrent néanmoins que ce chiffre est sous-estimé.

Les gouvernements ont imposé des confinements et des mesures d'atténuation afin d'arrêter ou, à tout le moins, de ralentir la propagation du virus. Dans nombre de pays, les confinements ont entraîné la fermeture temporaire des bureaux et des usines qui ne fournissaient pas des services essentiels et la population a été contrainte de rester chez elle. Cette situation a eu des conséquences négatives sur les activités nécessitant une présence physique, notamment dans le secteur des services<sup>4</sup>. De nombreuses entreprises ont finalement mis la clé sous la porte et nombre de personnes ont perdu leur emploi. Les économistes de la Banque mondiale ont conclu que 97 millions de personnes étaient tombées dans la pauvreté en 2020 à la suite de la crise<sup>5</sup>. L'économie mondiale a connu une contraction de 3,2% en 2020, ce qui constitue sans doute la pire récession depuis la Seconde Guerre mondiale<sup>6</sup>.

### Les dépenses publiques ont largement contribué à soutenir le développement des vaccins contre la COVID-19

Figure 3.1a Sources de financement des vaccins contre la COVID-19 par type (en pourcentage)

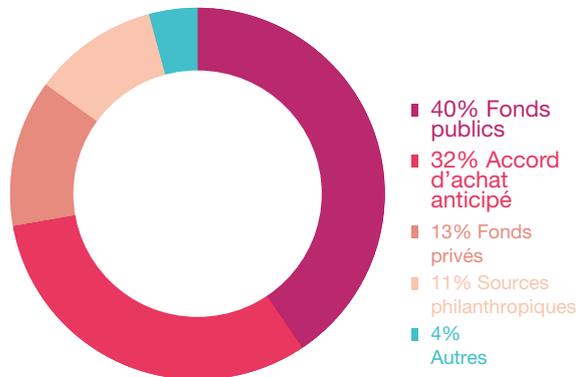
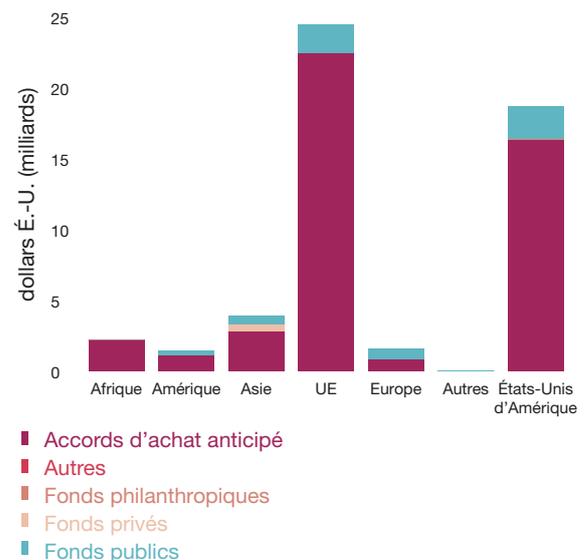


Figure 3.1b Financement des vaccins contre la COVID-19 par type et par région (en milliards de dollars É.-U.)



Source: Global Health Center (2021).

Note: Ces chiffres représentent les investissements spécifiquement liés à la COVID-19 réalisés par les secteurs public et privé (autres que les laboratoires pharmaceutiques), des organisations philanthropiques et d'autres bailleurs de fonds, selon la base de données du Global Health Center. Ils reposent sur des chiffres publiés. Les données relatives au financement du secteur privé n'incluent pas les sociétés pharmaceutiques et sont donc sous-estimées. Les accords d'achat anticipés et les investissements en recherche-développement peuvent couvrir le renforcement des capacités de fabrication, ainsi que des investissements destinés à faire progresser le développement clinique.

La crise de la COVID-19 a incité tous les acteurs de l'écosystème de l'innovation – pouvoirs publics, secteur privé, centres de recherche et universités, communautés internationales et organisations non gouvernementales (ONG), y compris les fondations philanthropiques – à trouver des solutions dans l'urgence.

## Collaboration fructueuse entre les secteurs public et privé

Les efforts concertés des acteurs de l'écosystème de l'innovation ont abouti à la mise au point de plusieurs vaccins contre la COVID-19 en peu de temps. Moins de deux ans après le signalement du premier cas, le 31 décembre 2019, 20 vaccins contre la COVID-19 étaient administrés dans le monde, 114 candidats vaccins faisaient l'objet d'essais cliniques et 185 se trouvaient au stade du développement préclinique<sup>7</sup>.

Les vaccins contre la COVID-19 ont été identifiés, testés et déployés en un temps record. Des scientifiques chinois ont publié la séquence génétique du virus SARS-CoV-2 au début janvier 2020<sup>8</sup>. Trois mois plus tard, quatre sociétés et une université avaient identifié leurs candidats vaccins respectifs. Le 31 août 2020, le premier vaccin contre la COVID-19, le SinoVac, était approuvé par les autorités chinoises<sup>9</sup>. Début décembre, la Medicines and Healthcare Products Regulatory Agency britannique (agence de régulation des médicaments et des produits de santé – MHRA) approuvait l'utilisation du vaccin Pfizer-BioNTech (voir plus avant) au Royaume-Uni.

Quatre facteurs principaux expliquent comment les vaccins ont pu être mis au point avec une telle rapidité.

Premièrement, l'ampleur de la pandémie et le fait qu'elle a frappé une grande partie de la population mondiale ont grandement incité le secteur privé à trouver une solution technologique. La taille du marché est un facteur important de l'innovation, en particulier dans le domaine médical, étant donné que, comme cela a été dit au chapitre 1, plus le marché est grand, plus le rendement potentiel est élevé<sup>10,11</sup>. Lorsqu'ils décident d'investir dans la recherche-développement, les innovateurs doivent évaluer les coûts et les risques probables de l'investissement par rapport au rendement escompté.

Deuxièmement, les pouvoirs publics ont apporté une aide financière significative au secteur privé, notamment pour les essais cliniques et les concepteurs de vaccins présentant des candidats vaccins prometteurs, en vue de mettre en place une capacité de fabrication à grande échelle. La Commission européenne (CE), par exemple, a engagé 137,5 millions d'euros pour la recherche-développement de dispositifs de diagnostic, de thérapies et de vaccins et a alloué une enveloppe de 164 millions d'euros aux jeunes entreprises et aux PME cherchant des solutions à la crise sanitaire<sup>12</sup>. La Coalition for Epidemic Preparedness Innovation (CEPI), un partenariat mondial lancé en 2017 en vue de mettre au point des vaccins pour endiguer les épidémies futures, a apporté 1,3 milliard de dollars É.-U. pour la recherche-développement de vaccins contre la COVID-19<sup>13</sup>.

En outre, plusieurs gouvernements se sont engagés à acheter des quantités déterminées des candidats vaccins. Ces accords d'achat anticipés (ou AAA) ont contribué à atténuer certains risques commerciaux liés au développement des candidats vaccins. Certains de ces accords ont pris la forme de paiements anticipés, versés avant même qu'un candidat vaccin n'ait fait l'objet d'essais cliniques.

D'autres aides publiques destinées à faire face à la crise ont pris la forme de programmes lancés par les gouvernements, comme ceux des États-Unis d'Amérique et du Royaume-Uni, par exemple, similaires aux politiques axées sur la réalisation de missions qui ont été abordées au chapitre 2<sup>14</sup>. Ces programmes ont été conçus pour accélérer l'examen réglementaire, ainsi que pour contribuer à la découverte d'un vaccin contre la COVID-19<sup>15</sup>. Dans le passé, même dans le scénario le plus optimiste, le développement et la commercialisation d'un vaccin prenaient au moins 18 mois<sup>16</sup>. La plupart d'entre eux ont pris entre cinq et 10 ans en raison du temps nécessaire pour trouver des candidats prometteurs et obtenir ensuite l'approbation réglementaire<sup>17</sup>. L'encadré 3.1 décrit le programme américain de développement d'un vaccin contre la COVID-19, baptisé "Operation Warp Speed" ("Vitesse de l'éclair" – OWS), tandis que l'encadré 3.2 porte sur le groupe de travail britannique sur les vaccins, baptisé "Vaccine Taskforce" (VTF).

### Encadré 3.1

#### L'opération "Vitesse de l'éclair" a raccourci la durée de développement des vaccins

L'opération "Vitesse de l'éclair" (OWS), lancée le 15 mai 2020, était un partenariat interagences dirigé par le Ministère de la santé et des services sociaux et le Ministère de la défense des États-Unis d'Amérique. Elle avait pour but d'accélérer le développement et la distribution de vaccins, de traitements et de moyens de diagnostic sûrs et efficaces pour le virus SARS-CoV-2 en coordonnant, en finançant et en soutenant de toute autre manière les concepteurs de candidats vaccins, principalement dans le secteur privé.

L'initiative s'inspirait du projet Manhattan, un programme axé sur la réalisation d'une mission qui s'est déroulé de 1942 à 1946<sup>18</sup>. Le projet Manhattan a réuni scientifiques et militaires ainsi que des investissements considérables en recherche-développement dans le but de créer une arme atomique en deux ans et demi. L'opération OWS a adopté la même approche de recherche-développement axée sur la réalisation d'une mission et dotée d'une structure opérationnelle

militaire, pour développer le vaccin contre la COVID-19<sup>19</sup>.

En outre, le programme OWS a appliqué de nombreuses bonnes pratiques provenant du modèle élaboré par la Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) du Ministère de la défense<sup>20</sup>. La DARPA a été mise sur pied en 1958 afin de développer la capacité technologique des États-Unis d'Amérique et de concurrencer l'Union soviétique dans la course vers la Lune. Pour ce faire, elle était prête à entreprendre des projets de recherche et de développement commercialement hasardeux. L'agence a réussi à mettre au point des technologies militaires cruciales, dont certaines ont trouvé une utilisation commerciale non militaire (voir le chapitre 2). L'OWS a appliqué l'approche de portefeuille de la DARPA et a investi dans plusieurs candidats vaccins basés sur des technologies différentes et concurrentes, quoiqu'en s'appuyant sur des investissements en recherche-développement plus importants et sur une durée plus courte et limitée<sup>21</sup>. Elle a ainsi augmenté ses chances de financer au moins un candidat à succès, tout en réduisant le risque d'échec global. Les sociétés développant les candidats vaccins à succès se sont ensuite fait concurrence pour être la première à commercialiser leur produit.

Un aspect nouveau et innovant de l'initiative était que les concepteurs de vaccins ont été en mesure de procéder simultanément aux différentes phases des essais cliniques, sans porter atteinte aux normes strictes de sécurité et d'efficacité imposées par la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis d'Amérique. En règle générale, la mise au point de vaccins et de médicaments ne peut passer d'une étape à une autre que lorsque toutes les conditions pour passer à l'étape suivante sont remplies. Les concepteurs de vaccins ont également pu lancer rapidement la fabrication des candidats dont les résultats des essais cliniques étaient les plus prometteurs, le programme ayant contribué à la création de la capacité de production à grande échelle nécessaire<sup>22</sup>.

Le programme a été rebaptisé "Countermeasures Acceleration Group" en 2021.

### Encadré 3.2

#### Essais cliniques et fabrication de vaccins facilités par le VTF

La Vaccine Task Force (groupe de travail sur les vaccins – VTF) a été créée en avril 2020 afin que le Royaume-Uni ait accès aux vaccins les plus prometteurs dans les meilleurs délais<sup>23</sup>. Il s'agit d'un partenariat entre le Ministère du commerce, de l'énergie et de la stratégie industrielle (BEIS) et le Ministère de la santé et des affaires sociales (DHSC) et neuf membres du groupe de pilotage sont issus du secteur privé.

À l'instar du programme OWS des États-Unis d'Amérique, le groupe de travail a investi dans une série de candidats vaccins prometteurs fondés sur des technologies concurrentes<sup>24</sup>. Les investissements ont pris la forme d'un financement de la recherche et du développement et d'accords d'achat anticipés avec les concepteurs de vaccins.

Le groupe de travail a recruté des volontaires par l'intermédiaire du registre des vaccins COVID-19 du National Health Service britannique afin de participer à des essais cliniques<sup>25</sup>. Il a également élaboré des normes d'essai destinées à permettre une comparaison des niveaux d'efficacité et de protection qu'offrent les candidats vaccins. L'initiative a financé la fabrication à grande échelle de candidats vaccins. Oxford-AstraZeneca est l'un des concepteurs de vaccins qui ont bénéficié de subventions de fabrication anticipées de cette campagne<sup>26</sup>.

En raison de la capacité limitée de fabrication de vaccins du Royaume-Uni, le groupe de travail a financé des concepteurs de vaccins tels que le laboratoire américain Novavax, l'entreprise française Valneva et la société allemande Cure-Vac pour créer ou agrandir leurs installations de production dans le pays. Cette initiative a complété le Centre d'innovation et de fabrication de vaccins du gouvernement, créé en 2018 pour renforcer les moyens de lutte contre les pandémies futures<sup>27</sup>.

---

Troisièmement, les avancées considérables enregistrées dans le domaine biomédical, qui ont débuté au cours de l'âge d'or des vaccins pendant et après la Seconde Guerre mondiale (voir le chapitre 2), ont contribué à la mise au point rapide des candidats vaccins contre la COVID-19<sup>28</sup>. Le virus SARS-CoV-2 a été identifié rapidement et le séquençage de son génome a été réalisé. Ce séquençage a ouvert la voie

aux essais d'un vaccin basé sur la technologie de l'ARN messenger, lequel, comme expliqué au chapitre 1, libère un élément du code génétique du virus dans le but de stimuler une réponse immunitaire et de produire des anticorps. Cette technologie va probablement bouleverser le processus d'innovation dans le domaine biomédical en raccourcissant le délai nécessaire à la mise au point de nouveaux vaccins pour de futures maladies et en incitant à investir davantage dans cette approche.

La technologie de l'ARN messenger était utilisée ou en développement depuis au moins 10 ans lorsque la COVID-19 est apparue. La DARPA des États-Unis d'Amérique est l'un des organismes qui ont soutenu son développement<sup>29</sup>. Les chercheurs ont donc été en mesure de rediriger rapidement leurs efforts vers la recherche de candidats vaccins.

Quatrième et dernier élément, des scientifiques et des chercheurs qui n'avaient jamais travaillé ensemble ont commencé à collaborer<sup>30</sup>. Certains ont même croisé différents domaines scientifiques pour contribuer à l'effort. Ainsi, des épidémiologistes ont rejoint des sociologues et des économistes pour comprendre le mode de propagation du virus et la manière de le contenir. En outre, des chercheurs ont partagé leur travail publiquement, avant même qu'il ne soit

**Les avancées importantes réalisées dans le domaine biomédical, qui ont débuté pendant l'âge d'or des vaccins pendant et après la Seconde Guerre mondiale, ont contribué au développement rapide des candidats vaccins contre la COVID-19**

contrôlé par des pairs, afin d'accélérer la diffusion des connaissances entre scientifiques et chercheurs. Cela a contribué à la diffusion rapide des derniers résultats de la recherche.

### L'innovation en médecine<sup>31</sup>

L'impact de la pandémie a dépassé la recherche immédiate d'un vaccin efficace et a influencé l'innovation dans d'autres domaines de la recherche médicale et de la pratique de la médecine.

### Changer l'orientation de la recherche médicale

Comme cela a été mentionné précédemment, il est probable que le développement des vaccins contre la COVID-19 basés sur la technologie de l'ARN messenger stimulera de futures avancées scientifiques et inventions pharmaceutiques. Depuis le milieu des années 2000, les chercheurs ont vanté la plateforme technologique de l'ARN messenger en affirmant qu'elle allait changer la donne<sup>32</sup>. Cette technologie consiste à modifier l'ARN messenger, un gène qui dit au corps comment produire les protéines dont il a besoin. L'ARN messenger édité incite le système immunitaire humain à produire des anticorps pour se défendre contre le virus SARS-CoV-2.

Avant la pandémie, cette technologie était testée pour protéger contre plusieurs maladies infectieuses, notamment les virus Ebola et Zika. Elle a même été utilisée dans la recherche contre le cancer<sup>33</sup>. Mais au-delà de ses applications prophylactiques, la plateforme de l'ARN messenger n'était pas prise au sérieux par les grandes sociétés pharmaceutiques. En effet, les laboratoires pharmaceutiques sont moins enclins à investir dans des traitements préventifs comme les vaccins<sup>34</sup>. Toutefois, le succès des vaccins à ARN messenger contre la COVID-19 a clairement démontré que la plateforme de recherche fonctionne bien et pourrait avoir d'autres applications. Pour le patient, la technologie de l'ARN messenger est efficace et sûre<sup>35</sup>. Pour le fabricant, elle est moins onéreuse et plus rapide que les méthodes traditionnelles, étant donné que seuls des ajustements mineurs doivent être apportés au processus de production pour passer du traitement d'une maladie à une autre.

Le succès de la plateforme des vaccins à ARN messenger contre la COVID-19 pourrait ouvrir un nouvel âge d'or pour la mise au point de vaccins. Par ailleurs, le soutien apporté par les gouvernements des États-Unis d'Amérique et du Royaume-Uni à la construction de grandes installations de production de vaccins à ARN messenger complète et renforce la poursuite des recherches sur cette technologie.

Toutefois, l'utilisation et l'adoption à grande échelle de cette nouvelle plateforme technologique rencontrent encore certains obstacles<sup>36</sup>. Pour commencer, sa création et son déploiement requièrent une main-d'œuvre hautement qualifiée et des laboratoires de recherche dotés de matériel de pointe. Ensuite, l'ARN messenger peut aisément se dégrader si les conditions de fabrication ne sont pas idoines, ce qui accroît potentiellement le coût de production. Enfin, de nombreux pays ne disposent pas des infrastructures nécessaires pour transporter et stocker l'ARN messenger.

Par ailleurs, mettre l'accent sur la nouvelle technologie de vaccins à ARN messenger peut aussi porter préjudice à d'autres recherches médicales (voir le chapitre 1, encadré 1.1). Au cours du confinement lié à la COVID-19, de nombreux laboratoires de recherche ont été détournés d'autres axes de recherche et réorientés vers la COVID-19. Certains centres de recherche ne travaillant pas sur cette dernière ont soit dû fermer des laboratoires, soit restreindre leurs activités. Certains ont perdu leur financement. Bon nombre d'universités et d'instituts de recherche ont été amenés à revoir leurs priorités et à réaffecter leur budget.

Toutefois, changer d'axe de recherche coûte cher<sup>37</sup>. À ce jour, la fixation de nouvelles priorités et les changements de financement semblent avoir retardé les progrès de la recherche plutôt que de l'avoir modifiée de fond en comble<sup>38</sup>. Une étude comparative du nombre de nouveaux essais cliniques par maladie en 2019 et 2020 a révélé que les essais liés à la COVID-19 se faisaient au détriment de nouveaux essais cliniques sur d'autres maladies. Il peut toutefois s'agir d'un changement temporaire des priorités<sup>39</sup>.

La rapidité du développement des vaccins contre la COVID-19 montre à quelle vitesse de nouveaux vaccins et de nouveaux médicaments peuvent être mis sur le marché tout en répondant aux normes de sécurité élevées des autorités de régulation<sup>40</sup>. On pourrait envisager que les délais de développement des médicaments soient raccourcis par rapport à la moyenne de 5 à 10 ans qui ont cours dans cette industrie.

Le succès des programmes britannique et américain de développement de vaccins plaide en faveur du maintien de partenariats public-privé pour la prévention et le traitement de maladies telles que la COVID-19. Ces deux initiatives ont joué un rôle crucial en soutenant des technologies innovantes, depuis la théorie jusqu'à la pratique. Elles l'ont fait en investissant dans diverses technologies concurrentes relativement peu éprouvées et en contribuant à créer des capacités de fabrication qui supportent l'application de ces technologies.

## Changer la pratique médicale

La pandémie a accéléré l'adoption de technologies numériques (voir la section 3.3) par le corps médical et les hôpitaux. Un rapport établi par McKinsey & Company en 2021 a relevé que le secteur biopharmaceutique a connu une transformation numérique plus importante au cours des 10 premiers mois de la COVID-19 que pendant les 10 années précédentes<sup>41</sup>. Les entreprises du secteur médical réorganisent leurs systèmes afin d'intégrer pleinement les systèmes numériques et utilisent davantage les données pour optimiser leurs activités. En Suisse, les patients peuvent conserver leur dossier médical sur un portail médical en ligne et prendre des rendez-vous par le même portail.

Dans le secteur des soins de santé, un nombre croissant de médecins utilisent des plateformes numériques pour le diagnostic et les soins des patients<sup>42</sup>. En 2020, pendant le confinement, certains médecins ont mené des consultations en ligne sur des plateformes de communication par vidéo. Les hôpitaux s'appuient sur l'analyse des patients entrants pour mieux gérer le personnel et l'utilisation des lits. Bien que de nombreux changements de ce type soient déjà en cours, la pandémie a créé un besoin urgent de "passer au numérique" ainsi que la possibilité d'introduire des améliorations nécessaires sur le plan opérationnel.

## 3.2 Tenir compte de l'impératif du changement climatique<sup>43</sup>

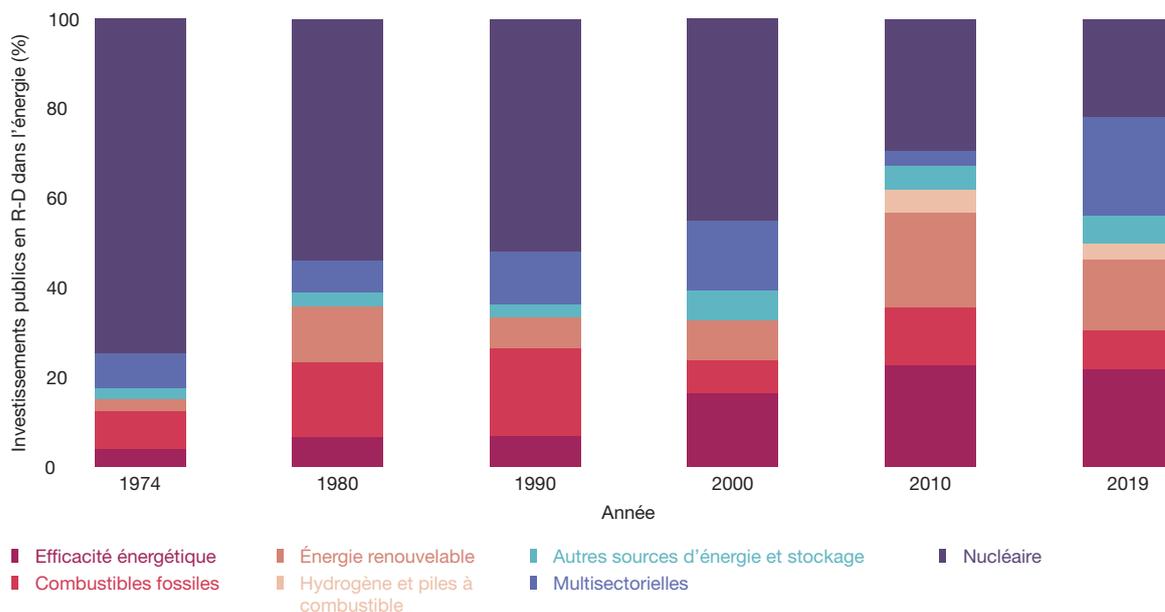
Les combustibles fossiles en tant que source d'énergie pour la production d'électricité et le transport sont les principaux responsables du changement climatique dû à l'activité humaine. Depuis 1970, les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) provenant de l'activité humaine, en particulier l'utilisation de combustibles fossiles et les procédés industriels, ont représenté environ soixante-dix-huit pour cent des émissions mondiales de gaz à effet de serre<sup>44</sup>. Ces gaz absorbent et renvoient la chaleur dans l'atmosphère, ce qui influence la vitesse du changement climatique. Parmi ces gaz figurent le CO<sub>2</sub>, le méthane et l'oxyde d'azote, notamment.

Plus vite le climat change, plus les effets seront importants sur la planète, étant donné que nous aurons moins de temps pour nous adapter aux changements.

Le réchauffement climatique menace la croissance économique mondiale, et surtout le maintien de la vie sur Terre. Il met en péril la sécurité alimentaire et l'accès à l'eau potable et provoque des événements climatiques extrêmes et une élévation du niveau de la mer. Il affecte également la croissance végétale, ce qui influence la capacité de la Nature à réguler le CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. La Banque mondiale estime le coût annuel global des phénomènes climatiques extrêmes à 520 milliards de dollars É.-U. en perte de bien-être, ce qui montre

## Évolution de la composition du financement public de la R-D dans l'énergie

Figure 3.2 Part des investissements publics en R-D par technologie (en pourcentage), 1974-2019



Source : AIE (2020a).

Note : On entend par "multisectorielles" les technologies qui peuvent être appliquées dans plusieurs secteurs énergétiques, tels que les combustibles fossiles, d'autres sources d'énergie et stockage, etc. Le bureau scientifique du Ministère de l'énergie des États-Unis d'Amérique les classe dans la science fondamentale de l'énergie.

l'impact disproportionné du changement climatique sur les pauvres, dès lors qu'il pousse 26 millions de personnes dans la pauvreté chaque année<sup>45</sup>.

Les gouvernements sont soumis à une pression croissante pour faire face au changement climatique. En vertu de l'Accord de Paris de 2015, 196 pays se sont engagés à limiter l'augmentation de la température mondiale à moins de 2 degrés Celsius (C) d'ici la fin du siècle et, de préférence, à limiter la hausse à 1,5°C<sup>46</sup>. Six ans plus tard, à Glasgow (Écosse), les signataires ont réitéré leur engagement et quelques-uns d'entre eux, dont l'Argentine, la Chine, l'Union européenne (UE), l'Afrique du Sud, le Royaume-Uni et les États-Unis d'Amérique, ont convenu de renforcer leurs plans actuels pour limiter les émissions<sup>47</sup>. L'UE, par exemple, s'est fixé pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 55% d'ici 2030, soit plus que les 40% initialement proposés. Bon nombre de pays – représentant 80% de l'économie mondiale – ont annoncé des objectifs de zéro émission d'ici 2050 et d'importants émetteurs comme la Chine et l'Inde ont évoqué des objectifs similaires pour 2060 et 2070, respectivement.

### Progrès dans la voie du changement

Les gouvernements tout comme le secteur privé ont accompli d'importants progrès pour orienter l'innovation vers des technologies qui réduisent les effets

néfastes de l'activité économique sur l'environnement. Parmi celles-ci figurent notamment les technologies d'atténuation du changement climatique dans les secteurs de l'énergie, du transport et de la construction, ainsi que les technologies de gestion de l'environnement et d'adaptation en rapport avec la gestion de l'eau.

Les technologies d'atténuation ont pour but de réduire les émissions de gaz à effet de serre, d'augmenter l'efficacité énergétique, d'améliorer l'utilisation des ressources, de réduire les déchets et d'accroître le réemploi et le recyclage<sup>48</sup>. Baptisées "technologies à faible émission de carbone", elles produisent relativement moins d'émissions de CO<sub>2</sub> que l'énergie provenant des combustibles fossiles. Dans le secteur du transport, les véhicules électriques pourraient être cités en exemple (voir ci-dessous). Dans le secteur de la production d'énergie, on peut citer l'énergie solaire photovoltaïque, les éoliennes et les centrales au charbon équipées d'installations de captage du carbone<sup>49</sup>. Les technologies d'élimination et de captage du dioxyde de carbone, telles que les installations de stockage des centrales électriques, réduisent les émissions de CO<sub>2</sub> en capturant et en stockant les gaz soit dans des réservoirs (géologiques, terrestres ou dans l'océan) soit dans des produits comme le bois<sup>50</sup>.

Les gouvernements des économies développées essentiellement, et plus récemment la Chine, ont recours à des subventions, des réglementations et des normes pour promouvoir les technologies

respectueuses de l'environnement. De leur côté, les entreprises investissent de plus en plus dans ces technologies et les adoptent. Un élément important est l'engagement à long terme des pouvoirs publics en faveur de politiques environnementales, qui rassure les entreprises sur le fait qu'elles peuvent en toute sécurité consentir les investissements à long terme nécessaires dans des technologies à faible émission de carbone.

### Financement de solutions de rechange

Les gouvernements financent la recherche-développement dans des sources d'énergie alternatives depuis 1970. Dans le cadre de leur programme Moon ("Lune") (voir le chapitre 2), les États-Unis d'Amérique ont commencé à expérimenter des panneaux solaires photovoltaïques et des éoliennes comme sources d'énergie de substitution. Dans le même temps, la forte hausse des prix du pétrole en 1973 et 1979 a menacé la croissance économique en Europe et en Amérique du Nord et a suscité des inquiétudes concernant la sécurité énergétique. Cette situation a incité des pays comme la France et le Brésil à financer des recherches sur l'énergie nucléaire et l'éthanol, respectivement, tandis que le Japon lançait des programmes de recherche sur l'efficacité énergétique.

Les pouvoirs publics ont contribué à atténuer certains risques et certaines incertitudes liés aux investissements dans des technologies nouvelles et relativement peu éprouvées dans des énergies de substitution. La création d'une demande précoce pour les technologies solaires a été attribuée aux politiques de subvention et de tarif de rachat menées par l'Allemagne au début des années 1990 (voir l'encadré 3.3)<sup>51</sup>. En outre, le soutien des pouvoirs publics a joué un rôle considérable dans le développement et la démonstration des applications pratiques des nouvelles technologies et, partant de leur potentiel commercial.

Des études montrent que le financement d'initiatives par les États a influencé positivement le niveau et la trajectoire de l'innovation dans le secteur de l'environnement dans l'UE et aux États-Unis d'Amérique<sup>52</sup>. Les subventions versées par les États membres de l'UE ont facilité la génération d'électricité provenant de l'énergie solaire et éolienne en réduisant les coûts de développement de la technologie pour les entreprises<sup>53</sup>. Selon les chercheurs de l'Imperial College de Londres, la plupart des parcs éoliens offshore d'Europe pourraient être opérationnels en 2025 sans devoir recourir à des subventions<sup>54</sup>.

La figure 3.2 montre que depuis le milieu des années 1970, le financement public global de la recherche-développement dans les sources d'énergie s'est écarté des investissements dans les combustibles fossiles. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le financement public alloué aux combustibles fossiles

a pratiquement diminué de moitié entre 2010 et 2020, passant de 13% à 7% des dépenses publiques totales de R-D consacrées à l'énergie<sup>55</sup>.

### Normes et réglementations

Comme indiqué précédemment, les normes et réglementations officielles jouent un rôle essentiel dans l'adoption de technologies respectueuses de l'environnement tant par l'industrie que par les ménages. Le nombre de politiques orientées vers l'adoption et la diffusion de ces technologies a connu une croissance constante<sup>56</sup>. À l'échelon local, ces politiques ont inclus des subventions en faveur de l'installation de panneaux solaires sur les toits, de la construction de maisons et d'immeubles performants sur le plan énergétique et de l'achat de vélos et de véhicules électriques. Cela a incité les petites communautés, les agriculteurs, les municipalités, les producteurs et les ménages sensibles à la protection de l'environnement à utiliser des technologies respectueuses de l'environnement<sup>57</sup>.

L'impact de ces politiques varie toutefois selon le type d'incitation utilisé (mécanisme d'incitation – voir l'encadré 3.3)<sup>58</sup>. Les technologies se trouvant à un stade de développement précoce – recherche fondamentale ou appliquée – offrent généralement moins de garanties de succès et peuvent donc nécessiter un financement public en vue d'atténuer les risques<sup>59</sup>. À titre d'exemple, la mise en place et l'entretien des technologies d'élimination du carbone sont coûteux. Bien qu'il ait été démontré que ces technologies fonctionnent – ce qui l'on appelle la "validation de concept" –, leur développement à grande échelle est risqué. Néanmoins, en 2021, la création de plus de 100 nouvelles installations de captage et de stockage du carbone bénéficiant d'un soutien gouvernemental a été annoncée<sup>60</sup>.

L'encadré 3.3 explique comment des mécanismes d'incitation différents influencent l'innovation dans les technologies à faible émission de carbone. Les mécanismes d'incitation sont des politiques gouvernementales destinées à induire un comportement donné qui n'aurait peut-être pas existé sans elles. Dans le cas des politiques environnementales, les parties prenantes de l'écosystème de l'innovation sont encouragées à œuvrer au développement de technologies (tant de produits que de procédés) qui réduisent les émissions de carbone, telles que les technologies à faible émission de carbone ou les technologies d'atténuation du changement climatique.

Il existe également des mécanismes, comme la taxe carbone, qui facilitent l'adoption de technologies respectueuses de l'environnement et incitent les consommateurs à cesser de s'appuyer sur les combustibles fossiles. Selon la Banque mondiale, quelque 45 pays mettent actuellement en œuvre des initiatives de tarification du carbone, en recourant à des systèmes d'échange

des droits d'émission, à des fonds de réduction des émissions, à des taxes carbone ou à des variantes de ces mécanismes<sup>61</sup>. En outre, la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (UNFCCC) mentionne qu'une centaine de pays évaluent actuellement la tarification du carbone en tant que stratégie nationale de réduction des émissions de CO<sub>2</sub><sup>62</sup>.

---

### Encadré 3.3 Mécanismes d'incitation et type d'innovation

Les études portant sur les politiques en matière de changement climatique tendent à s'accorder sur le fait que les mécanismes d'incitation donnant les meilleurs résultats sont fondés sur le marché. Les politiques de tarification du carbone, telles que les taxes carbone et les systèmes d'échange des droits d'émission, en sont des exemples. Les entreprises doivent inclure leurs émissions de carbone dans leurs coûts de production, qui pourraient augmenter si elles continuent de s'appuyer sur des technologies à forte émission de carbone. Ces politiques incitent les entreprises à investir dans des technologies à faible émission de carbone et facilitent leur abandon des technologies plus polluantes. Ces investissements dans des technologies à faibles émissions de carbone contribuent à créer une demande et un marché pour celles-ci. De plus, les gouvernements tirent souvent des revenus des politiques de tarification du carbone, notamment dans le cas de la délivrance de permis. En d'autres termes, il est moins probable que les politiques de tarification du carbone soient retirées que, par exemple, les subventions, lesquelles peuvent fluctuer selon les cycles électoraux et budgétaires. Pour les entreprises, la mise en œuvre de politiques de tarification du carbone qui pénalisent les activités polluantes peut être une indication qu'un gouvernement s'est engagé à long terme en faveur de politiques de réduction des émissions de carbone<sup>63</sup>.

Toutefois, même des politiques fondées sur le marché peuvent rencontrer des problèmes. Le Gouvernement allemand s'est appuyé sur de telles politiques pour attirer des investissements dans la technologie solaire photovoltaïque en tant que source d'énergie. Au départ, il a eu recours à des tarifs de rachat en garantissant des prix pour l'électricité générée par l'énergie solaire supérieurs à ceux de l'électricité produite par des combustibles fossiles conventionnels<sup>64</sup>.

Mais les tarifs de rachat présentaient deux gros inconvénients. Premièrement, ils occultaient le prix "réel" de l'électricité provenant de l'énergie solaire. Deuxièmement, ils n'incitaient pas nécessairement les entreprises à réduire les coûts de production.

Les régulateurs se fondent désormais sur des enchères et d'autres mécanismes concurrentiels en plus des tarifs de rachat. À titre d'exemple, dans le système allemand des contrats d'achat d'électricité ou des appels d'offres, les concepteurs de panneaux solaires photovoltaïques soumettent des offres pour de nouveaux projets de production d'électricité, et les offres dont les plus prix sont les plus compétitifs sont retenues. Étant donné que la concurrence est fondée sur le prix, les fournisseurs et les concepteurs de projets sont incités à réduire leurs coûts, ce qui peut être avantageux pour toute la chaîne de valeur.

Un autre cas où les incitations fondées sur le marché peuvent ne pas fonctionner est celui des locataires et des propriétaires de bâtiments performants en termes énergétiques. Si le coût de la facture d'énergie incombe au locataire, le propriétaire de l'appartement ou de la maison n'aura aucune raison d'investir dans de nouvelles technologies économes en énergie, telles que l'isolation ou des appareils à faible consommation d'énergie. Dans ce cas, les normes de performance énergétique sont plus aptes que les taxes énergétiques à encourager l'utilisation d'innovations respectueuses de l'environnement dans les bâtiments<sup>65</sup>.

Source: Noailly (2022), Popp (2019) et Popp *et al.* (2010).

---

Un inconvénient des politiques fondées sur le marché réside dans le fait qu'elles ciblent des technologies et des innovations sur le point d'être commercialisées, à savoir celles qui ont démontré leur faisabilité, et qu'elles ne stimulent pas nécessairement l'éclosion de nouvelles idées. Le soutien gouvernemental, soit par l'intermédiaire d'une aide au financement de projets pilotes pour tester des idées, soit par la fourniture d'un soutien technologique pour les développer, pourrait être plus utile en l'orientant vers des technologies à faible émission de carbone commercialement risquées, comme les grandes installations de captage de carbone. L'investissement dans de nouvelles technologies et dans leur développement requiert généralement une participation des pouvoirs publics dans le cadre d'une coopération avec les universités et le secteur privé.

La législation adoptée par de nombreux pays pour promouvoir l'adoption de technologies à faible émission de carbone a créé une demande pour ces technologies. L'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) a indiqué qu'entre 2013 et 2018, le secteur privé représentait 86% des investissements dans les énergies renouvelables dans le monde<sup>66</sup>.

## Les technologies d'atténuation du changement climatique sont les technologies propres ayant la croissance la plus rapide

Figure 3.3a Nombre total de brevets déposés pour des technologies propres par catégorie

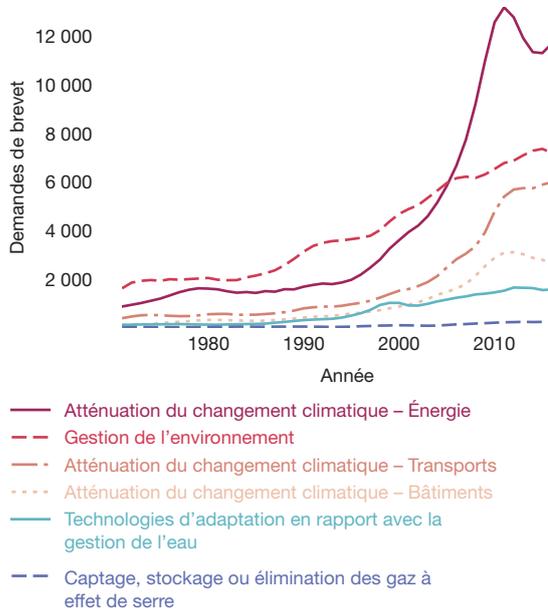
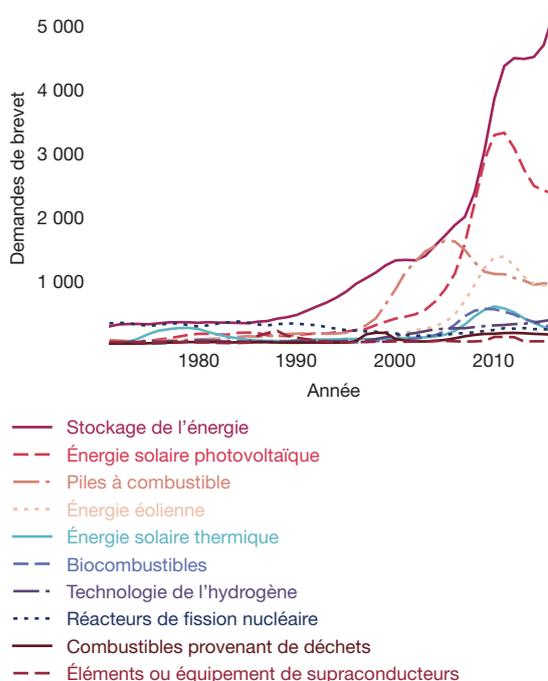


Figure 3.3b Technologies d'atténuation du changement climatique dans le secteur énergétique, par sous-catégories



Source: OMPI.

Note: Les demandes de brevet font référence aux documents de brevet déposés au moins dans deux offices de propriété intellectuelle.

## Avancées dans les sources d'énergie de substitution

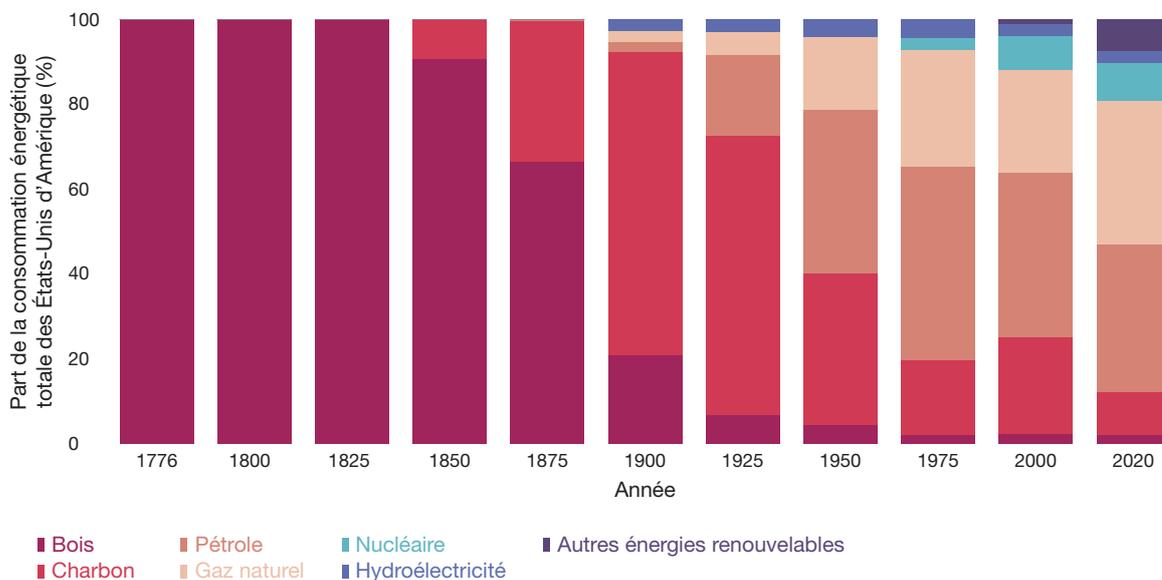
Les demandes de brevet peuvent être une illustration brute des investissements en R-D consentis par des entreprises privées dans les technologies à faible émission de carbone. Dans la figure 3.3, la forte augmentation du nombre de brevets déposés après l'an 2000 peut être attribuée à la croissance de ces technologies dans le secteur de l'énergie. Il ressort d'une analyse plus poussée qu'elles sont associées à des sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire ou éolienne et les piles à combustible, qui s'apparentent à des batteries qui ne se déchargent pas ou ne doivent pas être rechargées. Les sources d'énergie renouvelable représentent un tiers de l'augmentation des demandes de brevet dans ce domaine. Outre la demande de brevets relatifs aux énergies renouvelables, une hausse a également été observée dans les technologies habilitantes, telles que les batteries, l'hydrogène – une option de choix pour le stockage de l'énergie renouvelable – et les réseaux intelligents. Ces derniers renforcent la fiabilité de l'approvisionnement électrique en aidant les réseaux existants à compenser les fluctuations de l'approvisionnement provenant des sources d'énergie renouvelable, qui résultent, par exemple, de conditions météorologiques défavorables.

Les études consacrées à la question de savoir qui innove le plus dans les technologies à faible émission de carbone révèlent que la plupart des technologies les plus révolutionnaires – celles qui rendent les technologies existantes obsolètes, comme cela a été le cas des téléphones portables dans le secteur des télécommunications – proviennent de petites entreprises plutôt que des grandes sociétés qui dominent le secteur. Climeworks, une jeune entreprise dérivée de l'Institut fédéral suisse à Zurich, a construit la plus grande usine de captage et de stockage de carbone au monde en Islande. Achevée à l'été 2021, l'usine d'Orca devrait recueillir 4000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an, qu'elle stockera dans le sous-sol. À l'instar de nombreuses technologies révolutionnaires dans ce domaine, le fonctionnement d'Orca coûte cher et le site pourrait ne pas être rentable avant un certain temps. Cela explique pourquoi les entreprises existantes sont réticentes à investir dans ce type d'innovation<sup>67</sup>.

Les grandes entreprises, opérant principalement dans l'industrie du pétrole et du gaz, sont également des innovateurs actifs dans les technologies à faible émission de carbone. Cependant, leurs innovations se concentrent généralement sur le maintien des technologies existantes basées sur les combustibles fossiles, mais en les complétant par des installations de captage et de stockage du carbone afin d'éliminer les émissions de carbone<sup>68</sup>. Elles représentent un peu plus d'un tiers du total des investissements en

## Les États-Unis d'Amérique diversifient de plus en plus leurs sources d'énergie

Figure 3.4 Part des principales sources d'énergie dans la consommation énergétique totale des États-Unis d'Amérique



Source: U.S. Energy Information Administration (avril 2021).

Note: Les autres énergies renouvelables comprennent l'énergie solaire, éolienne, géothermique et les biocarburants.

capitaux dans des projets de captage, d'utilisation et de stockage du carbone<sup>69</sup>.

Les progrès enregistrés dans le développement de sources d'énergie de substitution ont conduit à une plus grande diversification des sources d'énergie aux États-Unis d'Amérique, comme l'illustre la figure 3.4.

Les deux études de cas décrites ci-dessous sont des exemples de la manière dont les gouvernements ont contribué à orienter l'innovation vers d'autres technologies plus respectueuses de l'environnement. La première étude de cas a trait au développement du solaire photovoltaïque en tant que source d'énergie renouvelable, tandis que la seconde porte sur le développement des voitures électriques. Ces exemples sont instructifs, dans la mesure où la production d'énergie et les transports sont les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre dans le monde<sup>70</sup>.

### Énergie solaire photovoltaïque

Les gouvernements sont les principaux moteurs du développement du secteur de l'énergie solaire photovoltaïque<sup>71</sup>. Comme mentionné précédemment, cela fait longtemps que le programme spatial des États-Unis d'Amérique a investi dans les panneaux solaires. En 1958, le satellite américain Vanguard I puisait son énergie dans des panneaux solaires<sup>72</sup>. De plus, dans les années 1970, des militants écologistes allemands et danois ont convaincu leurs gouvernements respectifs

de développer des sources d'énergie ne reposant pas sur les combustibles fossiles, notamment l'énergie solaire et éolienne.

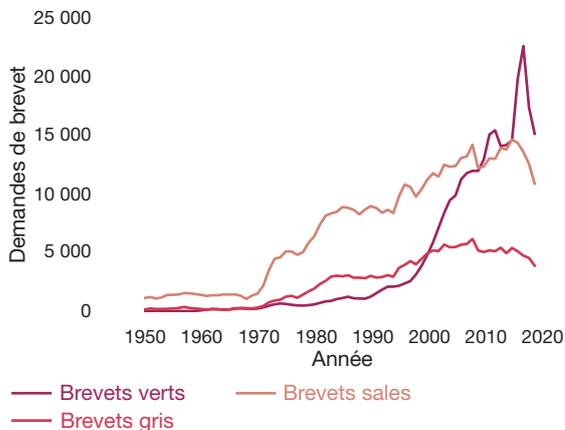
Des entreprises allemandes, américaines et japonaises ont été des pionnières de l'innovation dans la technologie solaire photovoltaïque. Les développements dirigés par la NASA ont conduit à d'importants progrès techniques des panneaux solaires photovoltaïques utilisés dans l'espace et, par la suite, sur la Terre (voir le chapitre 2)<sup>73</sup>. Depuis les années 1990, l'Allemagne subventionne largement les technologies solaires photovoltaïques (voir l'encadré 3.3) et garantit, comme mentionné précédemment, des prix plus élevés pour l'énergie générée de cette façon<sup>74</sup>.

À mesure que davantage de pays ont offert des incitations pour la production et l'utilisation des technologies solaires photovoltaïques, la capacité de production s'est étendue et d'autres concurrents sont apparus sur le marché. Des innovateurs traditionnels d'Allemagne, du Japon et des États-Unis d'Amérique se sont retrouvés en concurrence avec des entreprises chinoises et indiennes<sup>75</sup>. À l'heure actuelle, quelques-uns des principaux exportateurs d'éléments solaires photovoltaïques sont des entreprises de Chine, des États-Unis d'Amérique, du Japon, des Pays-Bas, d'Allemagne, de la RAS de Hong Kong, de la République de Corée, de Singapour et de Malaisie<sup>76</sup>.

Le développement de la capacité de production et l'augmentation du nombre de concurrents ont entraîné

## Part des technologies liées aux véhicules électriques et hybrides

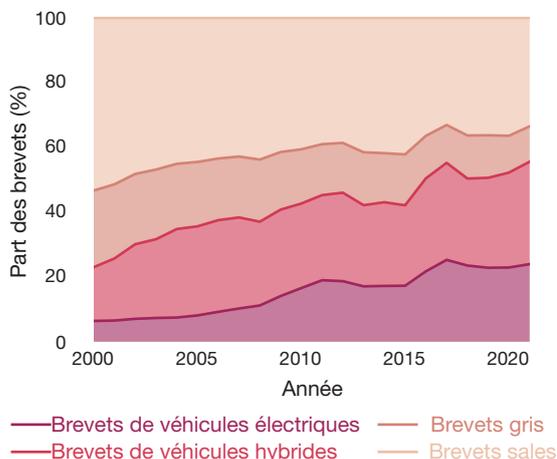
**Figure 3.5a Total des demandes de brevet dans l'industrie automobile, par brevets verts (véhicules électriques et hybrides), gris et sales**



Source: OMPI.

Note: Un brevet peut concerner plus d'une catégorie. Les brevets verts portent à la fois sur les véhicules électriques et les véhicules hybrides. Les brevets sales sont des brevets relatifs à des véhicules traditionnels à moteur à combustion interne. Les brevets gris concernent des technologies brevetées qui améliorent l'efficacité des technologies traditionnelles des moteurs à combustion interne.

**Figure 3.5b Part des demandes de brevet relatives à des technologies vertes (électriques et hybrides), grises et sales en pourcentage de demandes de brevet dans l'industrie automobile**



Source: OMPI.

Note: Un brevet peut concerner plus d'une catégorie. Les brevets verts portent à la fois sur les véhicules électriques et les véhicules hybrides. Les brevets sales sont des brevets relatifs à des véhicules traditionnels à moteur à combustion interne. Les brevets gris concernent des technologies brevetées qui améliorent l'efficacité des technologies traditionnelles des moteurs à combustion interne.

une diminution des prix de la technologie solaire photovoltaïque et ont stimulé la demande du marché pour cette technologie. L'industrie solaire photovoltaïque a attiré 46% des investissements totaux dans les sources d'énergie renouvelable entre 2013 et 2018<sup>77</sup>. En l'espace de huit ans, de 2010 à 2018, le coût de la production d'électricité au moyen de la technologie

solaire photovoltaïque a chuté de 77%. La capacité installée cumulée avait chuté d'un facteur 100 en 2018 par rapport à 2005<sup>78</sup>. L'AIE prévoit que l'énergie solaire représentera un cinquième de l'approvisionnement énergétique mondial en 2050, si la capacité solaire photovoltaïque est multipliée par 20 d'ici là<sup>79</sup>.

La pénurie de composants des panneaux solaires, due aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement provoquées par la pandémie de COVID-19, a récemment entraîné une hausse des prix de ces panneaux. De plus, les tensions commerciales entre les États-Unis d'Amérique et la Chine pourraient aboutir à l'imposition de droits de douane sur des éléments essentiels de cette technologie. Ces évolutions pourraient ralentir l'adoption des panneaux photovoltaïques et mettre à mal les stratégies nationales de décarbonisation.

## Véhicules électriques

La technologie des véhicules électriques existe depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, mais son développement a été éclipsé par celle de leurs concurrents à essence. Toutefois, à l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle, l'intérêt pour les véhicules électriques a repris de la vigueur en raison des préoccupations croissantes suscitées par les émissions de carbone.

Les véhicules électriques sont un autre exemple de la façon dont les gouvernements créent une demande précoce de technologies à faible émission de carbone. En 2005 déjà, le Gouvernement des États-Unis d'Amérique offrait un crédit d'impôt fédéral pouvant atteindre 7500 dollars É.-U. sur les achats de véhicules électriques. Cette mesure d'incitation a fait exploser la demande. Une étude considère que le crédit d'impôt est intervenu dans au moins 40% du total des achats de véhicules électriques au cours de la période 2011-2013<sup>80</sup>. Cela n'englobe pas les autres incitations proposées au niveau des États, telles que le programme de primes pour les véhicules propres de Californie<sup>81</sup>. Les ventes de véhicules électriques ont chuté en Chine et aux États-Unis d'Amérique lorsque les principales subventions ont été supprimées en 2019<sup>82</sup>.

Depuis les années 1990, des normes plus strictes en matière d'émissions ont stimulé les investissements dans les véhicules électriques. À l'horizon 2030, l'UE et les États-Unis d'Amérique souhaitent que les véhicules électriques représentent la moitié des achats de voitures. De plus, certaines villes de ces pays et d'autres au Canada, en Israël, au Japon, au Mexique, à Sri Lanka et au Royaume-Uni, ont annoncé l'interdiction des ventes de moteurs à combustion interne d'ici 2050<sup>83</sup>. Ces politiques devraient entraîner une hausse des dépenses de R-D dans ce secteur.

Les progrès réalisés dans les technologies habilitantes, tels que l'amélioration de la capacité des batteries,

de leur résistance thermique et des infrastructures de charge, ont rendu les véhicules électriques plus attrayants pour les consommateurs. En 2018, l'amélioration des batteries avait permis de multiplier par quatre l'autonomie des véhicules électriques par rapport à 2011<sup>84</sup>.

La figure 3.5a illustre le fait que les demandes de brevet relatives à des technologies propres à faible émission de carbone pour le transport routier (véhicules électriques et hybrides) avaient dépassé l'innovation dans les technologies sales à forte émission de carbone (moteurs à combustion interne) en 2009. En outre, les technologies propres représentent au moins la moitié des brevets déposés par l'industrie automobile depuis 2016 (voir la figure 3.5b).

La figure 3.6a présente la croissance de la demande des ménages pour des véhicules électriques. La part de marché mondiale des ventes de véhicules électriques augmente de manière constante depuis 2011 et a atteint 4% du parc automobile en 2019, en dépit des incitations réduites (voir la figure 3.6b) offertes par les gouvernements, sous la forme de primes à l'achat de véhicules électriques, ce qui implique que les consommateurs choisissent ce type de véhicules malgré tout. À leur apogée, les incitations gouvernementales ont atteint 23% du coût des véhicules électriques pour les consommateurs, mais elles avaient chuté de 10% en 2020.

### Les secteurs public et privé réagissent, mais les contraintes demeurent

Au cours des cinq dernières années, tant le secteur privé que le secteur public ont renouvelé leur engagement de lutter contre le changement climatique.

#### La pression s'accroît sur le secteur privé

Un nombre croissant de fonds publics et privés impose d'investir dans des technologies vertes à faible émission de carbone. Des initiatives comme Climate Action 100+, un groupe de pression mené par des investisseurs, et des fonds "verts" s'efforcent de convaincre les entreprises avec lesquelles ils travaillent d'adhérer aux objectifs de lutte contre le changement climatique. D'autres initiatives visent à tenir les entreprises pour responsables de leurs engagements environnementaux. L'initiative Science Based Targets (SBTi), qui aide les entreprises à se fixer des objectifs fondés sur la science, et le groupe de travail sur les informations financières relatives au climat (TCFD), qui vise à augmenter la transmission d'informations financières relatives au climat, en sont des exemples<sup>85</sup>.

Au cours du premier trimestre 2021, les investissements dans des fonds verts ont dépassé les 178 milliards de dollars É.-U., soit une progression de près de 370% par rapport au premier trimestre

### Hausse de la vente de véhicules électriques dans le monde

Figure 3.6a Part mondiale de marché des véhicules électriques

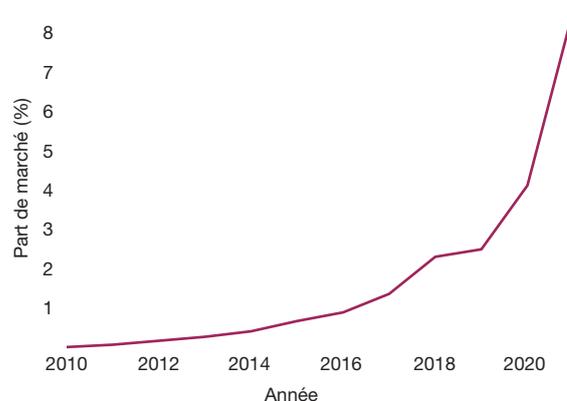
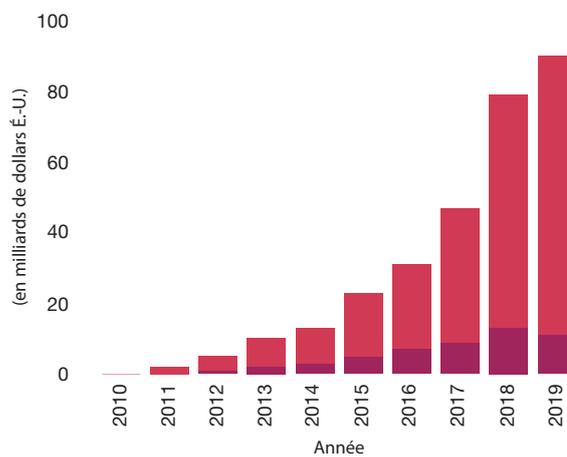


Figure 3.6b Dépenses pour l'achat de véhicules électriques par origine des fonds



■ Incitations des gouvernements ■ Dépenses des consommateurs

Source: AIE (2021a).

2020<sup>86</sup>. Cette hausse spectaculaire reflète en partie le lancement au cours de cette période de 200 nouveaux fonds environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG), à savoir des fonds qui intègrent les facteurs environnementaux, sociaux et de gouvernance dans leurs stratégies d'investissement.

Certains fonds publics abandonnent purement et simplement les investissements dans les entreprises de combustibles fossiles. Le fonds de pension néerlandais ABP, l'un des groupes les plus importants du monde, envisage de vendre plus de 15 milliards d'euros de participations dans des entreprises de combustibles fossiles d'ici au premier trimestre 2023<sup>87</sup>.

En outre, les sociétés d'assurance et les cabinets d'expertise comptable commencent à prendre en considération les stratégies d'atténuation des risques liés au changement climatique de leurs clients dans le calcul des primes d'assurance et des valeurs à

assurer<sup>88</sup>. Les entreprises qui veulent réduire leurs primes d'assurance et garder une valeur élevée doivent prendre les questions climatiques au sérieux.

La réputation doit aussi être prise en considération. L'opinion publique sur le changement climatique a évolué. Les jeunes générations sont beaucoup plus conscientes des problèmes et plaident en faveur d'un changement. Les entreprises en prennent acte. Les producteurs traditionnels de combustibles fossiles BP et Exxon comptent des militants de la lutte contre le changement climatique au sein de leur conseil d'administration.

### Action gouvernementale plus ambitieuse

À l'heure actuelle, les gouvernements se fixent des objectifs plus ambitieux pour tenir leurs engagements en matière de lutte contre le changement climatique. En 2021, le sénat des États-Unis d'Amérique a approuvé un projet de loi sur les infrastructures d'un montant de 550 milliards de dollars É.-U. afin de contribuer à revoir la dépendance du pays à l'égard des combustibles fossiles pour le transport et de s'orienter vers des technologies à faible émission de carbone. Environ 13% du budget prévu dans le projet de loi seront investis dans le transport d'énergie propre par les réseaux électriques. Il s'agira de l'investissement le plus important dans les technologies à faible émission de carbone de toute l'histoire du pays<sup>89</sup>.

Le programme du Gouvernement des États-Unis d'Amérique concernant l'avenir des carburants durables dans l'aviation américaine vise à compléter le projet de loi sur les infrastructures en finançant et en soutenant le développement d'un carburant d'aviation durable. Il nécessitera également des investissements dans de nouvelles technologies afin d'améliorer l'efficacité du carburant d'aviation<sup>90</sup>. En outre, le cadre baptisé "U.S. Build Back Better Framework" prévoit 555 milliards de dollars É.-U. d'investissement pour lutter contre le changement climatique<sup>91</sup>.

En 2019, l'UE a lancé son "New Deal" vert dans le but de parvenir à la neutralité carbone en Europe à l'horizon 2050<sup>92</sup>. La Banque chinoise de développement a alloué 500 milliards de yuans pour financer le secteur énergétique, dont un cinquième est destiné à construire des systèmes énergétiques propres, à faible émission de carbone, sûrs et efficaces<sup>93</sup>.

Au niveau intergouvernemental, outre les objectifs de neutralité carbone, les 191 membres de l'OACI ont approuvé les appels à remplacer un pourcentage élevé des carburants d'aviation actuels par des carburants durables à l'horizon 2050<sup>94</sup>.

Par ailleurs, les gouvernements se sont associés au secteur privé dans le cadre de divers partenariats public-privé pour lutter contre le changement climatique.

Ainsi, un partenariat public-privé a été conclu entre Breakthrough Innovation, un réseau créé par Bill Gates et plusieurs investisseurs privés, et Mission Innovation, une alliance internationale rassemblant 22 pays et la Commission européenne, en vue d'accélérer la commercialisation de technologies essentielles utilisant de l'énergie propre. Elles comprennent l'hydrogène vert, un carburant d'aviation durable, le captage direct dans l'air et le stockage à long terme de l'énergie. Cette collaboration a été mise en place lors de l'Accord de Paris en 2015 et a été élargie à Glasgow en 2021<sup>95</sup>.

Il est probable que ces engagements plus fermes et plus profonds des secteurs privé et public encourageront d'autres investisseurs à répondre aux impératifs liés au changement climatique. Toutefois, la vitesse à laquelle ces initiatives se traduiront en avancées significatives en termes de développement de technologies à faible émission de carbone dépendra de multiples facteurs, notamment la volonté politique, la capacité de financer des initiatives et l'accès à des technologies à faible émission de carbone par les pays qui ne disposent pas d'une capacité locale d'innovation.

### Contraintes pesant sur l'adoption de technologies à faible émission de carbone

Notre capacité à passer à des économies vertes dépend de nombreux facteurs.

Les mesures destinées à inciter les entreprises à investir dans des technologies non polluantes, comme les technologies à faible émission de carbone, sont toujours limitées, en dépit des lois relatives à l'environnement et des encouragements des gouvernements. La raison en est, en partie, que les intrants basés sur les combustibles fossiles sont moins chers et plus largement disponibles. Les combustibles fossiles ont bénéficié d'une subvention moyenne de 10% en 2020, laquelle a été répercutée sur les consommateurs. En 2017, les subventions gouvernementales en faveur des combustibles fossiles se sont élevées à 447 milliards de dollars É.-U. À titre de comparaison, les technologies basées sur des énergies renouvelables ont bénéficié de 128 milliards de dollars É.-U. de subventions et les biocarburants de 38 milliards<sup>96</sup>. Cette disparité dans les subventions traduit, dans une certaine mesure, la difficulté politique de retirer des subventions lorsqu'elles sont populaires sur le plan électoral.

Investir dans des technologies non polluantes est aussi à la fois coûteux, risqués et sans aucune garantie de succès, comme indiqué précédemment. Les entreprises ne prennent généralement en considération ni les avantages potentiels pour l'environnement économique dans lequel elles opèrent – les "externalités" discutées au chapitre 1 – ni les connaissances techniques résultant des investissements dans des technologies à faible émission de carbone<sup>97</sup>. Elles ont plutôt tendance à se

# Ces engagements plus fermes et plus profonds des secteurs public et privé devraient encourager de nouveaux investissements pour répondre à l'impératif du changement climatique

focaliser sur le retour sur investissement à relativement court et moyen terme et à ne pas tenir compte des retombées sociétales potentiellement positives des investissements dans des technologies à faible émission de carbone pour l'environnement. Ce décalage entre l'objectif de maximisation des profits des entreprises et le bien-être général de la société – le rendement privé et le rendement social – est l'un des principaux arguments avancés pour justifier l'intervention des pouvoirs publics. En imposant des taxes carbone, ces dernières forcent les entreprises à intégrer leurs émissions de CO<sub>2</sub> dans leur prise de décisions.

Les entreprises spécialisées plus jeunes et de taille plus réduite qui décident d'investir dans des technologies à faible émission de carbone se heurtent à des obstacles considérables à l'heure de développer leurs activités. Elles éprouvent davantage de difficultés à financer leurs activités que d'autres petites entreprises actives dans le secteur des combustibles fossiles<sup>98</sup>. Il est également moins probable qu'elles soient rachetées par des entreprises plus grandes<sup>99</sup>. Une étude de l'AIE s'est penchée sur l'évolution des jeunes pousses basées sur des technologies propres en 2010 et a constaté que 81% d'entre elles ont échoué ou ont quitté le marché<sup>100</sup>. Même celles qui parviennent à développer de nouvelles technologies d'énergie renouvelable auront besoin de centaines de millions de dollars pour démontrer leur viabilité commerciale<sup>101</sup>.

Les entreprises peuvent hésiter à investir dans des technologies à faible émission de carbone ou à les adopter, notamment en rachetant des sociétés spécialisées dans ces technologies, parce que ces

dernières pourraient, au bout du compte, les concurrencer sur leur propre marché, voire rendre leurs technologies existantes redondantes. La dépendance passée des entreprises à l'égard des technologies fondées sur les combustibles fossiles se poursuivra probablement à l'avenir. C'est ce que l'on appelle la "dépendance au passé"<sup>102</sup>. Même lorsque les entreprises doivent faire face à une hausse des prix des intrants basés sur les combustibles fossiles, il est plus probable qu'elles remplaceront un combustible fossile par un autre plutôt que de passer à des intrants à faible émission de carbone<sup>103</sup>.

La forte inertie et la dépendance passée à l'égard des technologies fondées sur les combustibles fossiles créent des boucles de rétroaction, ce que l'on appelle le "verrouillage carbone". Les entreprises sont fortement incitées à choisir des technologies pour lesquelles il existe des infrastructures plutôt que d'en essayer de nouvelles, bloquant ainsi les trajectoires de l'innovation dans les domaines à forte émission de carbone<sup>104</sup>.

La demande du marché doit également être suffisante pour soutenir les investissements des entreprises commerciales dans des technologies à faible émission de carbone. En outre, les producteurs doivent traverser une phase d'apprentissage difficile pour innover et déployer des technologies à faible émission de carbone nécessitant une main-d'œuvre hautement qualifiée<sup>105</sup>. Même des consommateurs préoccupés par l'environnement peuvent ignorer si leur électricité est produite à partir de sources d'énergie renouvelable ou de combustibles fossiles. S'ils en sont informés, ils peuvent exiger qu'elle soit produite à partir d'énergies renouvelables et même être prêts à la payer plus cher. Cela pourrait inciter le secteur privé à investir dans ce marché.

Enfin, les investissements dans des technologies habilitantes, telles que les installations de stockage d'énergie, sont indispensables pour créer et soutenir la demande de technologies à faible émission de carbone. Ces technologies comprennent l'infrastructure nécessaire au déploiement d'une énergie renouvelable dans les réseaux électriques, tels que les réseaux intelligents.

## 3.3 La numérisation change le monde

À l'été 1956, un atelier était organisé au Dartmouth College à Hanover, dans le New Hampshire, pour débattre de la manière dont il convenait de programmer des machines pour rassembler des données et les analyser afin de résoudre des problèmes et de tirer des "enseignements" de ce qu'elles avaient fait. Le postulat de cet atelier était que le processus d'apprentissage peut être décrit avec suffisamment de précision pour qu'une machine puisse être programmée pour être intelligente<sup>106</sup>. Beaucoup considèrent cet atelier comme la naissance de l'intelligence artificielle (IA), une

expression synonyme de technologie d'apprentissage automatique. L'intelligence artificielle est le fondement d'une nouvelle vague de numérisation – les technologies numériques généralistes – qui révolutionne l'activité économique. Cette nouvelle vague englobe des technologies telles que les technologies prédictives, une automatisation extrêmement poussée et les mégadonnées<sup>107</sup>.

Les technologies numériques généralistes ont pour caractéristique d'être omniprésentes, de stimuler l'innovation dans des domaines connexes et d'être applicables à de nombreux secteurs et industries. Les technologies généralistes antérieures, telles que la machine à vapeur, l'électricité et les technologies de l'information et de la communication (TIC) (voir le chapitre 1), sont étroitement associées aux trois premières révolutions industrielles mondiales. L'intégration totale des technologies numériques dans les activités économiques marque sans doute une quatrième révolution, celle d'une économie totalement axée sur les données<sup>108</sup>.

Les technologies numériques généralistes sont une conséquence naturelle de la numérisation généralisée découlant de trois domaines scientifiques et techniques liés, mais distincts, à savoir la robotique, les réseaux neuronaux et les systèmes symboliques. Les réseaux neuronaux et les systèmes symboliques sont deux exemples de la manière dont les programmes d'intelligence artificielle acquièrent des connaissances. Ces innovations fondées sur l'intelligence artificielle sont des technologies informatiques intelligentes capables d'exécuter une série de commandes et d'améliorer leur performance grâce à des procédés de rétroaction et d'apprentissage, sans intervention humaine.

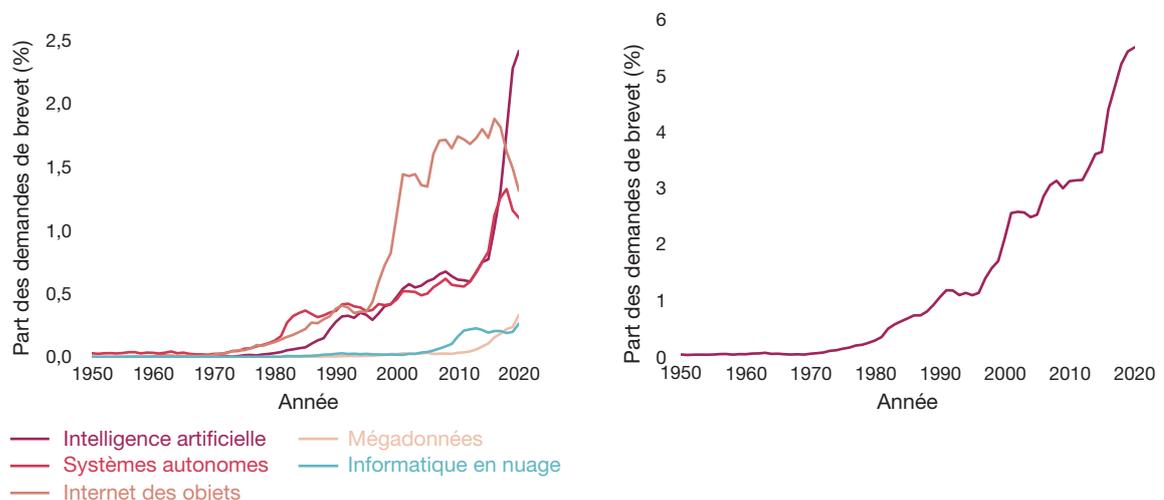
Les progrès enregistrés dans ces domaines sont étroitement liés au soutien apporté par les gouvernements par l'intermédiaire de bourses de recherche, de prix et d'investissements dans des technologies habilitantes. La DARPA américaine (voir l'encadré 3.1), par exemple, a organisé en 2004 un concours doté d'un prix d'un million de dollars É.-U. pour la conception d'un véhicule autonome – automobiles sans pilote ou se déplaçant de manière autonome –, capable de réaliser une course de 240 kilomètres<sup>109</sup>. Ce prix a été considéré comme une incitation majeure pour la recherche sur les véhicules autonomes.

Les améliorations progressives apportées aux technologies habilitantes, comme les TI (voir le chapitre 2), ainsi que l'augmentation de la puissance de calcul et de l'informatique en nuage – la fourniture de différents services, par exemple le stockage de données sur l'Internet –, ont été soutenues par les autorités publiques, en particulier durant les phases initiales de la recherche<sup>110</sup>. En outre, les gouvernements ont également réalisé les lourds investissements nécessaires dans l'infrastructure complémentaire, comme l'Internet à haut débit.

À l'instar des technologies de lutte contre le changement climatique, les gouvernements continueront de jouer un rôle dans l'adoption des technologies numériques généralistes et d'inciter les créateurs à innover en investissant dans des infrastructures habilitantes, telles que les réseaux nécessaires à la technologie sans fil 5G. Cette dernière transmettra des données en quantités nettement supérieures, à des vitesses beaucoup plus élevées et avec une fiabilité sensiblement accrue, rendant possibles des

### Les technologies numériques généralistes connaissent une croissance plus rapide que les demandes moyennes de brevets, toutes technologies confondues

Figure 3.7 Part des technologies numériques généralistes par catégorie (à gauche) et en pourcentage de l'ensemble des demandes de brevet (à droite)



Source: OMPI sur la base de PATSTAT.  
Note: Un brevet peut concerner plus d'une catégorie.

innovations révolutionnaires comme l'Internet des objets (voir ci-dessous).

Par ailleurs, notre dépendance vis-à-vis des technologies et des services numériques a augmenté au cours de la pandémie de COVID-19. Pendant les périodes de confinement, les modes de consommation et les activités commerciales se sont modifiés. Les consommateurs ont davantage acheté depuis leur domicile et ont utilisé des services numériques pour presque tout<sup>11</sup>. Les entreprises qui ont été capables de prendre le train de la numérisation ou de travailler en ligne ont été plus résilientes face aux effets négatifs de la pandémie. Celles qui ne l'ont pas été ont dû mettre la clé sous la porte.

Les industries qui ont soutenu le télétravail, telles que les plateformes de communication vidéo, ont enregistré une augmentation de leur activité. Les entreprises qui n'ont pas mis en place des possibilités de télétravail ou n'ont pas été accommodantes ont ensuite rencontré des difficultés à faire revenir leurs salariés au bureau. De nombreux restaurants et magasins de détail dont les clients devaient se rendre sur place ont dû fermer leurs portes.

Au cœur de ces nouveaux services, on trouve les plateformes numériques, des outils reposant sur les nouvelles technologies qui facilitent les transactions entre personnes (marchés en ligne), fournissent une infrastructure pour développer de nouveaux produits ou services (applications mobiles) ou créent une infrastructure institutionnelle (la chaîne de blocs des bases de données)<sup>12</sup>.

À l'échelle mondiale, le nombre de demandes de brevet – une approximation de l'innovation en cours – a explosé au cours des 40 dernières années en ce qui concerne les technologies numériques généralistes, comme le montre la figure 3.7. Cette croissance est plus rapide que celle des technologies de l'information.

L'influence de ces technologies varie toutefois selon les secteurs économiques et les pays. La numérisation de l'information est un élément essentiel de leur fonctionnement. En accédant à des volumes énormes d'informations, la technologie est en mesure de déduire des schémas à partir des informations fournies et, avec de l'entraînement, d'apprendre à détecter des schémas et des tendances particuliers. Cependant, une puissance de calcul suffisante est nécessaire pour permettre le traitement de grandes quantités d'informations numérisées. Les économies moins développées pourraient rencontrer davantage de difficulté à concurrencer les autres dans cette nouvelle ère économique.

### L'innovation devient une voie à double sens

Les technologies numériques généralistes transforment les industries en y apportant de nouveaux

innovateurs et des structures, des pratiques et des valeurs nouvelles. Les innovateurs traditionnels se heurtent à la concurrence des entreprises fondées sur les technologies de l'information. Les constructeurs automobiles traditionnels, par exemple, doivent aujourd'hui concurrencer des entreprises technologiques de la Silicon Valley pour développer des véhicules autonomes<sup>13</sup>.

Dans le secteur de la santé, les fabricants de montres intelligentes mesurent, au quotidien, des données vitales sur la santé, qui peuvent fournir des informations utiles lors d'examen médicaux. Dans les domaines de la défense et de la logistique, des drones sont utilisés pour des missions de reconnaissance et des livraisons<sup>14</sup>. Même dans le tourisme, les services en ligne et les applications mobiles (applis) donnent le ton des changements, en laissant les gens organiser leur déplacement dans la voiture d'un tiers, plutôt que d'utiliser un taxi, ou dormir dans la maison de quelqu'un d'autre plutôt qu'à l'hôtel.

Les technologies modifient les types d'innovations. La majeure partie des innovations actuelles repose sur des technologies numériques et donne naissance à de nouvelles industries, comme l'Internet des objets, un système d'objets et d'équipements interconnectés et en ligne, capable de recueillir et de transmettre des données sans l'intervention de l'homme. Plutôt que de placer des publicités dans des magazines ou d'acheter du temps d'antenne à la télévision, les sociétés de cosmétique s'adressent à des "influenceurs" ou publient des annonces sur des moteurs de recherche et des plateformes de réseaux sociaux. Les produits et services sont co-conçus ("crowdsourcing") par les utilisateurs; en d'autres termes, ces derniers donnent leur avis sur la performance et les services fournis, ce qui permet aux acheteurs de disposer de renseignements utiles avant l'achat.

Dans le domaine médical, les technologies fondées sur l'IA peuvent être formées pour déceler une croissance cellulaire anormale dans le corps. Elles peuvent contribuer à la recherche dans la médecine de précision, grâce à laquelle les traitements sont personnalisés en tenant compte de l'état du patient<sup>15</sup>.

De plus, les technologies numériques généralistes modifient la manière dont nous utilisons les technologies numériques proprement dites. Elles sont interactives et apprennent de nous à mesure que nous les utilisons. C'est ce qui les différencie des innovations dans les technologies de l'information de la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Précédemment, l'interaction avec la technologie était à sens unique. Prenons l'exemple des grands robots utilisés dans la construction automobile. Ces robots préprogrammés ont permis d'automatiser certaines tâches répétitives à forte intensité de main-d'œuvre. Chaque amélioration du fonctionnement des

robots a nécessité le savoir-faire technique d'ingénieurs mécaniciens et d'experts en mécanique, ainsi que l'apprentissage par essai et erreur des utilisateurs de ces robots.

À l'heure actuelle, les technologies fondées sur l'intelligence artificielle exploitent les volumes considérables de données collectées grâce à leurs immenses capacités de traitement de données pour s'améliorer<sup>116</sup>. L'application de localisation des smartphones en est un excellent exemple. Lorsque nous cherchons l'itinéraire le plus rapide ou le plus approprié pour atteindre une destination, en fonction de l'état du trafic, les informations que nous fournissons sont notamment le lieu, le moment de la recherche et la destination souhaitée. L'extrapolation de cette recherche à d'autres résultats crée un vaste ensemble de données qui alimente le système de localisation, ce qui améliore son utilité et son efficacité en temps réel.

L'identification de nos amis sur les réseaux sociaux est un autre exemple. Les nombreuses données ainsi recueillies entraînent l'intelligence artificielle à mieux reconnaître des visages, une compétence qu'elle utilisera ensuite pour suggérer de futurs marquages lors de l'identification de personnes sur des photos. Cette interactivité et cette rétroaction rendent les technologies intelligentes et réactives<sup>117</sup>.

### Accélérer le processus d'innovation

Les technologies numériques présentent des avantages potentiels immenses. Les universités et les entreprises s'appuient sur les techniques d'intelligence artificielle, telles que les réseaux neuronaux d'apprentissage profond, pour faire progresser la science. L'apprentissage profond désigne l'utilisation de multiples couches de réseaux neuronaux artificiels, à savoir des systèmes informatiques inspirés des systèmes neuronaux du cerveau humain. Les chercheurs en médecine utilisent ces techniques d'apprentissage fondées sur l'intelligence artificielle afin d'aider à la détection, au diagnostic et au traitement des maladies.

La traduction automatique nous permet de comprendre des sites Internet en différentes langues. Lorsque eBay, une plateforme facilitant les ventes entre consommateurs ou entre entreprises et consommateurs, a introduit la traduction automatique en mai 2014, ses recettes ont augmenté de 13,1% et les exportations via eBay des États-Unis d'Amérique vers l'Amérique latine ont progressé de 17,5%<sup>118</sup>.

L'application à la recherche de technologies numériques généralistes accélère le processus d'innovation et rend la recherche-développement plus efficace. Ainsi, dans l'agriculture, les technologies numériques, telles que les capteurs au sol, fournissent des

informations sur l'état des sols. S'ils sont trop secs, les capteurs envoient un message d'alerte pour que le système arrose les cultures. Ce procédé améliore le rendement agricole.

Dans l'industrie spatiale, l'intelligence artificielle devrait permettre de développer des technologies grâce auxquelles les robots et les machines pourront fonctionner de manière autonome, sans instruction humaine. Cela deviendra nécessaire à mesure que l'exploration ira plus loin dans l'espace, au-delà de la portée des communications avec la Terre (voir le chapitre 2).

Les sections suivantes examinent plus en détail la manière dont les technologies numériques généralistes devraient influencer et stimuler l'innovation dans les transports, les soins de santé et l'éducation.

### Optimisation des systèmes de transport

Comme indiqué, les technologies numériques généralistes, en particulier l'intelligence artificielle, pourraient contribuer à désengorger le réseau routier grâce à une gestion "intelligente" du trafic. Les appareils mobiles sont aujourd'hui utilisés par des applications cartographiques, telles que Waze et Google Maps, pour proposer des itinéraires pratiques pour se rendre à un endroit particulier.

Cependant, les informations relatives à la localisation des utilisateurs pourraient également être utilisées par des organismes publics, comme les autorités responsables des routes et des infrastructures, les contrôleurs du trafic, voire les sociétés de transport public, pour résoudre les problèmes de congestion routière. Des politiques de taxe routière différenciée pourraient être appliquées aux usagers en fonction du temps qu'ils passent sur la route ou du fait qu'ils recourent au covoiturage, par exemple. Une taxe routière élevée à certaines heures pourrait encourager l'utilisation des transports publics. En outre, les sociétés de transport public pourraient utiliser les données pour décider de la fréquence des bus à différents arrêts. L'amélioration des transports publics résultant d'une plus grande fiabilité et ponctualité pourrait inciter à les utiliser davantage, réduisant ainsi non seulement les embouteillages, mais aussi les émissions de carbone.

### Optimisation de la recherche médicale et des soins de santé

La numérisation transforme l'industrie des soins médicaux. Une nouvelle vague de technologies numériques généralistes accroît l'efficacité de la recherche-développement dans le secteur médical. Ces technologies peuvent potentiellement

améliorer la détection des maladies et la découverte de médicaments<sup>119</sup>. Les technologies fondées sur l'intelligence artificielle peuvent scanner le code génétique des patients et identifier mieux et plus rapidement que l'homme, les séquences de gènes indiquant la présence de maladies particulières. À titre d'exemple, les chercheurs espèrent que l'intelligence artificielle pourra servir à dépister précocement le virus SARS-CoV-2 et identifier des thérapies capables de contenir de futures épidémies<sup>120</sup>.

Ces technologies permettent d'adapter les soins dispensés aux patients. Des appareils portables, tels que des montres ou des bracelets, permettront de détecter des crises d'épilepsie et d'alerter à la fois le patient et d'autres personnes. Ces appareils intelligents peuvent également recueillir des données, qui peuvent être analysées par des médecins et contribuer à améliorer les soins. Ils peuvent aider à optimiser l'organisation des urgences dans les hôpitaux. Lorsqu'un patient est en route vers les urgences, des informations vitales le concernant pourraient être instantanément communiquées à l'hôpital. En outre, les patients ne requérant pas une attention immédiate pourraient être dirigés vers l'hôpital en dehors des heures de pointe ou invités à prendre rendez-vous chez leur généraliste, contribuant ainsi à éviter l'encombrement inutile des salles d'urgence.

Dans certaines économies en développement, des drones contribuent déjà à compenser l'insuffisance des réseaux de transport en fournissant des soins et des traitements médicaux. Pendant la pandémie de COVID-19, par exemple, un partenariat public-privé entre UPS (un fournisseur de services postaux), la jeune pousse Zipline et GAVI (une organisation intergouvernementale visant à fournir des vaccins pour tous), a livré des vaccins dans la région d'Ashanti, dans le sud du Ghana. Les drones peuvent parcourir relativement rapidement jusqu'à 69 km et transporter des vaccins sans qu'il soit nécessaire de conserver ceux-ci au froid pour préserver leur efficacité<sup>121</sup>.

### Améliorer l'accès à l'éducation

Les technologies numériques généralistes ont déjà transformé certains aspects de l'enseignement. Toutefois, le confinement général décidé pour contenir la propagation de la COVID-19 a accéléré ce processus. Cela a probablement été la plus vaste expérience éducative jamais réalisée. La transition sans heurt des cours en présentiel à des cours virtuels a entraîné des changements dans la manière dont les enseignants enseignent et dont les étudiants apprennent. Les enseignants ont dû faire preuve d'imagination pour réorganiser et créer du contenu pour les cours virtuels donnés à leurs étudiants.

De nouvelles recherches sur la reconnaissance faciale sont testées pour signaler aux enseignants quand

les étudiants n'écoutent plus, afin de leur permettre d'adapter leur enseignement en conséquence. Cette expérience conduira à une innovation permanente pour proposer des cours plus personnalisés.

Davantage de cours étant proposés en ligne, les étudiants sont plus à même de choisir ce qui convient le mieux à leur expérience d'apprentissage et à leurs besoins. Dans certains cas, cela pourrait améliorer l'accès aux systèmes éducatifs lesquels, en raison des longues distances qui doivent parfois être parcourues ou de leur coût, n'étaient pas toujours aisément accessibles à tous.

L'innovation numérique transformera également le contenu des cours. L'intelligence artificielle, l'automatisation et d'autres technologies rendront certains métiers obsolètes et donneront naissance à d'autres. Ces nouveaux métiers nécessiteront une palette de compétences différentes. La main-d'œuvre peu qualifiée occupée à des tâches répétitives et routinières sera probablement remplacée par l'automatisation. La demande se déplacera vers un ensemble de compétences pointues et des travailleurs connaissant l'intelligence artificielle et ses technologies connexes. Ces ensembles de compétences devraient englober des aptitudes analytiques, créatives et d'adaptation ainsi que des compétences personnelles, telles qu'une pensée critique, une aptitude à trouver des solutions, des compétences en gestion et une aptitude à diriger<sup>122</sup>.

### Avantages et inconvénients de cette nouvelle révolution

Ainsi que cela a été dit, les technologies numériques généralistes modifient la trajectoire de l'innovation. Les changements vont se poursuivre et pourraient même s'accélérer, compte tenu de notre dépendance croissante à l'égard de ces technologies et des innovations qu'elles apportent. Toutefois, les avantages pour la croissance économique ne vont pas de soi.

Ces technologies peuvent stimuler la croissance économique lorsqu'elles entraînent des innovations qui complètent et améliorent la productivité humaine. Cependant, elles risquent d'aggraver les inégalités économiques lorsque l'innovation se limite à remplacer le besoin de main-d'œuvre<sup>123</sup>. L'automatisation peut toucher une grande partie de la population, probablement plus que cela n'a été le cas avec les technologies généralistes antérieures<sup>124</sup>. Une hausse du chômage aggraverait les inégalités. Même pour les gouvernements en mesure d'offrir un filet de protection sociale aux chômeurs, une augmentation du chômage pourrait néanmoins peser sur les budgets et forcer les pouvoirs publics à réduire les dépenses dans des secteurs importants comme l'éducation et la santé.

Certaines économies en développement ne sont peut-être pas prêtes à tirer parti d'une quatrième révolution industrielle (voir le chapitre 1)<sup>125</sup>. La nouvelle vague de progrès technologiques requiert des investissements majeurs en capitaux et une main-d'œuvre hautement qualifiée. Or, les économies à faible revenu se caractérisent par une offre relativement abondante de main-d'œuvre peu qualifiée et par des ressources limitées à consacrer à des investissements en capitaux. En outre, le manque d'infrastructures nécessaires pourrait encore limiter les avantages potentiels des technologies numériques généralistes dans les pays plus pauvres.

Comme indiqué précédemment, les pouvoirs publics pourraient utiliser les immenses quantités de données provenant des technologies numériques généralistes pour générer d'importants bénéfices sociaux, tels que l'amélioration des infrastructures publiques ou le suivi des foyers de maladies dans la population.

Or, la plupart des données sont détenues par une poignée de grandes entreprises technologiques. Ces dernières collectent les données par l'intermédiaire des services technologiques qu'elles fournissent. Prenons l'exemple des applications de localisation. Un utilisateur qui active une application de localisation en Malaisie enverra des informations à des services appartenant à des sociétés commerciales dont le siège est situé en dehors du pays. Les données transmises incluront le lieu, l'heure et le moyen de transport préféré de l'utilisateur. Les sociétés de transport public et les épidémiologistes pourraient utiliser ces données pour effectuer des analyses qui, en l'espèce, seraient intéressantes pour le public malais. Cependant, ils pourraient ne pas avoir accès aux informations parce qu'elles sont stockées sur des serveurs privés dans un autre pays.

La sécurité nationale est également source de préoccupations dans certains pays. L'interconnexion entre différentes innovations technologiques numériques, avec des dispositifs susceptibles de contenir des informations sensibles pour des tiers, pose la question de la sécurité des technologies. Les gouvernements s'inquiètent de la mesure dans laquelle des industries et des organismes extrêmement confidentiels, comme les services de défense nationale, devraient s'appuyer sur ces technologies, compte tenu des risques de piratage.

Les gouvernements peuvent essayer d'orienter l'innovation découlant des technologies numériques de manière à optimiser les avantages sociétaux, tout en protégeant les intérêts du secteur privé et des marchés. Ils pourraient, par exemple, s'efforcer d'encourager les innovations créatrices d'emploi ou améliorant le bien-être plutôt que celles qui remplacent des emplois<sup>126</sup>. Au nombre des technologies habilitantes figure le recours à l'intelligence artificielle afin de générer un sous-titrage en direct et des traductions simultanées, ce qui facilite

les transactions commerciales, augmente la productivité et génère de la croissance économique. Les innovations technologiques supprimant des emplois pourraient inclure les robots qui remplacent une main-d'œuvre peu qualifiée, bien qu'il soit loin d'être démontré qu'ils entraînent des pertes d'emplois à long terme. Deux études portant sur les économies à haut revenu révèlent que l'adoption de robots industriels – des machines relativement automatisées intégrées dans des procédés industriels spécialisés – a augmenté la productivité<sup>127</sup>. Il n'est pas certain que ces conclusions puissent être étendues aux pays plus pauvres, où la part de la main-d'œuvre peu qualifiée est, en règle générale, relativement plus élevée.

Les pouvoirs publics peuvent également jouer un rôle majeur dans la confidentialité des données, en particulier lorsqu'ils décident quel type d'informations est collecté et comment ces données sont utilisées. Des données recueillies auprès de personnes issues de différentes parties du monde – même anonymes – devraient-elles être détenues par des entreprises privées? Les informations recueillies pourraient-elles être utilisées de manière à porter atteinte à la concurrence? Les autorités antitrust du Royaume-Uni, de l'UE et des États-Unis d'Amérique, notamment, étudient actuellement ces questions (voir l'encadré 3.4)<sup>128</sup>.

Les intérêts des entreprises privées peuvent ne pas correspondre aux besoins de la société. L'accès aux données des citoyens, recueillies au moyen de technologies appartenant à des sociétés privées, pourrait-il être réglementé de manière à garantir les énormes avantages sociétaux associés à l'exploitation de technologies numériques à des fins d'innovation, tout en respectant la vie privée et la sécurité nationale? Il n'existe pas de réponse ou de solution évidente à cette question. Mais l'existence de préoccupations justifie, dans une certaine mesure, une intervention des gouvernements.

---

#### Encadré 3.4

##### **Grandes entreprises technologiques et inquiétudes concernant les pratiques anticoncurrentielles**

Google/Alphabet, Apple, Facebook/Meta, Amazon et Microsoft possèdent les plateformes numériques les plus utilisées au monde<sup>129</sup>. Ces cinq entreprises de TI proposent des services différents et concurrents, notamment des moteurs de recherche, des réseaux sociaux, des appareils intelligents, comme des appareils portables, de l'informatique en nuage, etc. Leurs modèles économiques sont différents. Google est un moteur de recherche qui génère des recettes en vendant des annonces ciblées. Amazon est l'équivalent numérique d'un détaillant traditionnel

et vend des marchandises par l'intermédiaire de sa plateforme.

La rapidité de l'évolution technologique et le caractère intégré du marché numérique soulèvent quelques difficultés en termes de droit et de politique de la concurrence. Leur adaptation aux nouvelles réalités du marché et aux nouveaux modèles commerciaux est essentielle pour garantir des marchés compétitifs et contestables<sup>130</sup>.

Ces cinq sociétés ont une emprise considérable sur le marché, en particulier sur le marché numérique. Grâce à leurs plateformes intégrées verticalement, les informations qu'elles collectent sur les utilisateurs pourraient être exploitées pour optimiser des produits et services en aval. Du point de vue de l'efficacité économique, il s'agit d'une évolution bienvenue. La subordination de produits, telle que l'interopérabilité entre des applications et des méthodes de paiement pour ces applications, est souvent intéressante à la fois pour les consommateurs et pour les concepteurs d'applications.

Du point de vue des pratiques anticoncurrentielles, quelques entreprises contrôlant un large pan du système économique peuvent porter atteinte aux innovations futures et à la croissance économique future. Ce contrôle de quelques-uns soulève des questions de concurrence quant à savoir si l'exercice d'un pouvoir sur le marché dans un segment vertical en amont pourrait étouffer la concurrence et l'innovation en aval. Par exemple, en utilisant des données collectées sur les habitudes d'achat passées des consommateurs sur la plateforme numérique pour proposer des produits similaires mais concurrents de la société mère de cette plateforme ou en présentant de façon sélective ces produits avant les autres.

Plusieurs arguments économiques vont à l'encontre des suggestions de menace anticoncurrentielle des plateformes numériques. Ces entreprises innovent et se font concurrence en permanence<sup>131</sup>. Il n'existe pas d'obstacle à l'entrée sur le marché au sens anticoncurrentiel traditionnel. Il est relativement aisé pour de nouveaux produits ou de nouveaux concurrents d'entrer sur le marché et le coût en est sans doute faible. Toute société de TI peut sans doute créer sa propre plateforme numérique et les consommateurs passer d'une telle plateforme à une autre. La plupart de ces services sont proposés gratuitement au consommateur. Cela étant, ces grandes entreprises peuvent avoir un avantage concurrentiel considérable sur de nouveaux concurrents, parce qu'elles bénéficient des avantages des précurseurs, comme la création d'un écosystème de produits ou le verrouillage des utilisateurs. Les utilisateurs peuvent hésiter à opter pour une plateforme différente, parce qu'ils sont habitués à la

plateforme actuelle et que les coûts du changement peuvent être élevés<sup>132</sup>.

En outre, la qualité des plateformes numériques est tributaire du nombre de services qu'elles proposent, celui étant lui-même lié au nombre d'utilisateurs. Plus d'applications signifient plus d'utilisateurs et davantage d'utilisateurs incitent d'autres développeurs d'applications à proposer leurs applications sur la plateforme numérique. En outre, les données relatives aux consommateurs constituent désormais un avantage concurrentiel important sur de nombreux marchés numériques. Par conséquent, attirer un volume critique de services et d'utilisateurs et les conserver peut d'une certaine manière être considéré comme une barrière à l'entrée.

Plusieurs autorités chargées de la concurrence examinent les plateformes numériques sous l'angle des pratiques anticoncurrentielles<sup>133</sup>. Les enquêtes en cours se concentrent notamment sur les éléments suivants :

- les résultats de recherche des plateformes numériques, parce qu'elles donnent elles-mêmes la préférence à leurs propres produits et services<sup>134</sup>;
- les comportements anticoncurrentiels des plateformes afin de préserver leur emprise sur le marché<sup>135</sup>; et
- les fusions et acquisitions destinées à éliminer des rivaux potentiels<sup>136</sup>.

Comment les autorités chargées de la concurrence doivent-elles lutter contre les pratiques anticoncurrentielles sur ce marché ? Elles peuvent ne pas être en mesure de faire face à ces géants technologiques et à la complexité de leurs plateformes intégrées verticalement<sup>137</sup>. En outre, il peut être malaisé de faire exécuter une décision de justice et celle-ci pourrait même porter atteinte à la concurrence<sup>138</sup>.

### 3.4 Les politiques publiques peuvent tirer parti de l'innovation pour relever les défis

Le processus d'innovation implique une interdépendance ou une interaction entre différentes parties prenantes de l'écosystème de l'innovation. Dans le domaine du changement climatique, l'interdépendance d'une série d'acteurs influence la trajectoire et le rythme de l'innovation dans les technologies vertes. Compte au nombre de ces acteurs les jeunes pousses spécialisées dans les technologies environnementales, les entreprises du secteur de l'énergie, des organismes publics, comme l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis d'Amérique, des universités

ainsi que des organisations intergouvernementales telles que l'UNFCCC.

La présente section se concentre sur l'action des pouvoirs publics. Les gouvernements peuvent intervenir de diverses manières, depuis le financement de la recherche jusqu'à l'imposition de règles en passant par la fixation d'objectifs, pour modifier la trajectoire de l'innovation, comme l'a montré l'analyse de la santé (COVID-19), du changement climatique et de l'essor des technologies numériques généralistes.

### Encourager l'innovation pour le bien de la société

Les gouvernements peuvent chercher à influencer sur l'orientation des changements afin de maximiser les avantages sociétaux. En règle générale, trois arguments sont avancés pour que les responsables politiques agissent de la sorte.

Lorsque les besoins de la société et les objectifs des entreprises privées commerciales ne coïncident pas, les pouvoirs publics peuvent – et devraient probablement – intervenir. C'est notamment le cas lorsque, comme indiqué au chapitre 1, le rendement social de répondre aux besoins de la société ou les bénéfices sociétaux qui en résultent – pour limiter la pollution, par exemple – dépassent largement les rendements privés de poursuivre ses activités comme si de rien n'était.

Dans le cas du changement climatique, les programmes, les politiques, les règles et les normes adoptés par les gouvernements influencent sensiblement l'orientation de l'innovation vers des technologies d'atténuation du changement climatique. En ce qui concerne les technologies numériques, les gouvernements peuvent tenter d'éviter ou d'atténuer les conséquences potentiellement négatives, en particulier lorsque le recours accru à de l'intelligence artificielle, par exemple, est susceptible d'entraîner d'importantes pertes d'emplois ou lorsqu'il pourrait induire des problèmes de respect de la confidentialité des données, de concurrence ou de sécurité nationale.

En raison de la concurrence sur le marché, les entreprises ont tendance à investir dans des activités d'innovation offrant le meilleur rendement dans les délais les plus courts. Des entreprises bien établies évitent les activités d'innovation risquées et dont l'issue est incertaine. Cela explique pourquoi la plupart des avancées technologiques d'atténuation du changement climatique sont le fait de jeunes pousses nouvelles dans l'industrie.

Dans le domaine biomédical, les entreprises chercheront à investir dans des activités susceptibles d'avoir des applications commerciales relativement

rapides<sup>139</sup>. C'est notamment le cas des sociétés pharmaceutiques qui préfèrent redéfinir des technologies existantes afin de continuer à traiter des maladies plutôt que d'investir dans des vaccins ou de nouveaux traitements. Du point de vue de la société, il est de loin préférable d'investir dans une recherche médicale ayant un impact à plus long terme mais nécessitant davantage de temps et d'efforts pour donner des résultats plutôt que de redéfinir des traitements et des technologies existants.

Il peut arriver que les pouvoirs publics doivent réagir à des crises en élaborant des programmes ou en prenant des initiatives. Dans le cas du vaccin contre la COVID-19, le volume considérable de financement et de soutien apporté pour trouver rapidement des moyens d'atténuer l'impact du virus SARS-CoV-2 se justifie par l'importance de trouver une solution<sup>140</sup>. L'appui des pouvoirs publics au développement et à la fabrication de vaccins à grande échelle a été essentiel à leur déploiement rapide. Les initiatives américaine et britannique (voir les encadrés 3.1 et 3.2) ont soutenu le développement de vaccins, depuis la recherche-développement initiale de candidats potentiels en passant par la phase d'expérimentation et leur approbation finale par les agences réglementaires jusqu'à l'augmentation de la production et de la distribution des vaccins. Même les investissements dans les vaccins qui n'ont pas abouti, parce qu'ils se sont révélés non viables, ne sauraient être considérés comme des dépenses inutiles, compte tenu des immenses incertitudes initiales sur ce qui allait fonctionner<sup>141</sup>.

Un soutien similaire des pouvoirs publics à la lutte contre le changement climatique pourrait être un élément important pour atteindre l'objectif d'un réchauffement global inférieur à 2 C d'ici la fin du siècle. Des actions sont toutefois nécessaires à tous les niveaux, de l'échelle internationale aux ménages privés. Dans son rapport, l'AIE recommande des changements draconiens pour atteindre l'objectif fixé par les gouvernements en 2015 et réaffirmé en 2021<sup>142</sup>. Les investissements dans des technologies à faible émission de carbone devraient plus que tripler pour atteindre quelque 4 billions de dollars É.-U. en 2030, selon le rapport. Toutes les ventes de voitures particulières équipées d'un moteur à combustion interne devraient s'arrêter en 2035 et toutes les centrales à charbon et à pétrole devraient être démantelées à l'horizon 2040. En un mot, une transformation radicale du système énergétique mondial s'impose<sup>143</sup>.

### Dessiner la trajectoire de l'innovation

Les gouvernements peuvent imposer des réglementations pour inciter le secteur privé à investir dans certains types d'innovation. Dans le cas du changement climatique, des politiques comme la taxe carbone

encouragent le secteur privé à adopter des technologies à faible émission de carbone ou des technologies d'atténuation des émissions de carbone.

De même, en ce qui concerne les nouvelles technologies numériques, les gouvernements peuvent réglementer l'utilisation des données recueillies auprès des utilisateurs. Le règlement général sur la protection des données (RGPD) de l'UE vise à empêcher les mauvaises utilisations des informations provenant de particuliers, par exemple à des fins de commercialisation ou de traçage non autorisé des mouvements d'un utilisateur. Les politiques de protection de la propriété intellectuelle définissent les technologies numériques généralistes qui peuvent ou non être brevetées ou plutôt, elles le font jusqu'à un certain point. L'intelligence artificielle peut donner naissance à de nouvelles inventions. Toutefois, dans de nombreux pays, des brevets ne peuvent être demandés que pour des inventions émanant d'êtres humains. Les inventions créées par des algorithmes informatiques complexes ne sont pas couvertes<sup>144</sup>. L'innovation générée par l'intelligence artificielle pourrait devoir se prévaloir d'autres instruments de propriété intellectuelle, comme les secrets d'affaires, pour bénéficier d'une protection contre l'imitation.

Les investissements publics dans des technologies et des infrastructures habilitantes ou complémentaires peuvent faciliter l'adoption d'innovations dans des domaines essentiels. Ainsi, la modernisation des réseaux électriques pour permettre une utilisation accrue des sources d'énergie renouvelable pourrait accélérer l'adoption de technologies d'atténuation du changement climatique et réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. Les pouvoirs publics pourraient investir dans l'installation de bornes de recharge des batteries pour encourager l'utilisation de véhicules électriques. Les avantages potentiels des investissements consentis par les autorités britanniques et américaines dans le renforcement de leurs capacités nationales à mettre au point une technologie de pointe pour lutter contre la COVID-19 pourraient leur permettre d'être en mesure de réagir à des pandémies similaires à l'avenir.

L'encadré 3.5 présente quelques politiques publiques visant des activités d'innovation spécifiques, jugées essentielles pour la croissance économique.

### Encadré 3.5

#### Exemples de politiques publiques visant à renforcer les capacités d'innovation numérique

##### USICA<sup>145</sup>

La loi sur l'innovation et la concurrence (USICA) adoptée par les États-Unis d'Amérique en 2021 est l'une des principales propositions législatives

industrielles de l'histoire du pays. Elle "vise à renforcer les écosystèmes d'innovation des États-Unis d'Amérique en procédant à de nouveaux investissements dans la recherche, la commercialisation et la fabrication". Ses éléments politiques essentiels sont notamment les suivants :

- financement important de la recherche scientifique ainsi que de la production, la vente et l'octroi de licences sur des technologies spécifiques aux consommateurs dans des domaines essentiels, tels que l'intelligence artificielle, la robotique, la téléphonie 5G et les semiconducteurs<sup>146</sup>. Une partie du financement servirait à développer l'éducation dans les domaines des sciences, des technologies, de l'ingénierie et des mathématiques (STEM);
- assurer la continuité des chaînes d'approvisionnement pour l'accès aux matières premières, par exemple; et
- créer des centres technologiques dans différentes régions des États-Unis d'Amérique pour renforcer les capacités dans ces régions et stimuler la croissance économique.

##### Fabriqué en Chine<sup>147</sup>

"Made in China 2025" est un plan stratégique décennal, lancé en 2016, pour faire progresser la Chine dans la chaîne de valeur mondiale et en faire un des marchés de pointe dans le domaine technologique. Les moyens pour y parvenir sont les suivants :

- développer la capacité de fabrication de technologies de pointe (à savoir les technologies numériques généralistes);
- donner la priorité aux technologies relevant des 10 domaines suivants : TI, robotique et automatisation, équipements aérospatiaux et aéronautiques, équipements de génie maritime et fabrication de navires de haute technologie, équipements ferroviaires, véhicules économes en énergie, équipements électriques, nouveaux matériaux, biomédecine et appareils médicaux très performants, équipements agricoles.

##### Horizon Europe<sup>148</sup>

"Horizon Europe" est un programme de financement de la recherche et de l'innovation doté d'un budget de 100 milliards de dollars É.-U., qui prendra fin en 2027. Il vise à établir, développer et renforcer la base des connaissances scientifiques et techniques de l'Europe. Ce programme s'appuie sur quatre piliers :

- renforcer la compétitivité scientifique de l'UE;
- investir dans la recherche pour relever les défis sociétaux et renforcer les capacités de l'industrie;
- favoriser l'intégration de l'éducation, de la recherche et de l'innovation pour faciliter l'innovation; et

- aider les États membres de l'UE à développer leurs capacités d'innovation.

#### Industrie 4.0

Le programme "Industry 4.0" de l'Allemagne, annoncé en avril 2013, est un plan stratégique en faveur des industries manufacturières, axé sur la transformation numérique de l'économie allemande. Il couvre des domaines tels que l'intégration industrielle, l'intégration des informations industrielles, la numérisation des industries manufacturières, l'Internet des objets et l'intelligence artificielle. Sa mission fondamentale est de faire entrer l'industrie allemande dans l'ère numérique.

### 3.5 Conclusions et recommandations générales

Les études de cas relatives à la crise de la COVID-19, à l'impératif du changement climatique et à l'essor des technologies numériques généralistes ont montré combien la trajectoire de l'innovation a changé et continuera de le faire. Elles montrent également comment les politiques publiques peuvent orienter l'innovation dans une direction qui répond mieux aux besoins de la société.

Dans le cas de la COVID-19, les gouvernements ont contribué à réduire les incertitudes liées à l'investissement et à atténuer les risques associés à la découverte et au développement d'un vaccin. En matière de changement climatique, les politiques, les normes et les réglementations adoptées par les gouvernements aident les entreprises et les ménages à se tourner vers des technologies plus vertes. Enfin, dans le domaine des technologies numériques, les pouvoirs publics ont investi dans des technologies habilitantes et dans leur mise en place – et, dans le cas de la 5G, continuent de le faire –, ce qui a facilité les innovations et leur adoption.

Il est difficile d'affirmer que des progrès similaires auraient été accomplis sans l'aide des pouvoirs publics. Il n'existe pas de scénario contrefactuel comparable. Cependant, des arguments solides plaident en faveur des effets positifs de l'action gouvernementale sur la vitesse et la trajectoire de l'innovation. En outre, les gouvernements occupent une position unique pour prévenir toute conséquence potentiellement négative de l'innovation, sur l'emploi par exemple, mettre en place les bonnes mesures d'incitation et créer l'environnement propice à la promotion et à l'exploitation de son potentiel.

Les enseignements tirés de ces études de cas peuvent se résumer en plusieurs messages politiques capitaux:

- La trajectoire de l'innovation est importante parce que les ressources à investir dans l'innovation sont limitées.

Les responsables politiques devraient se concentrer non seulement sur le montant investi, mais également sur les domaines dans lesquels les investissements sont réalisés.

- Les responsables politiques ont une influence limitée sur la trajectoire à court et moyen terme de l'innovation, parce que les possibilités technologiques à long terme sont imprévisibles. Toutefois, grâce au financement des sciences fondamentales, les gouvernements jouent un rôle majeur en permettant des percées scientifiques et technologiques qui dessinent la trajectoire future de l'innovation (même de manière incertaine ou imprévisible).
- Les politiques publiques définissent la trajectoire à court et moyen terme de l'innovation :
  - en alignant les incitations à l'innovation du secteur privé sur les besoins de la société;
  - en mettant en œuvre des politiques qui réglementent les nouvelles technologies (en particulier les technologies numériques généralistes), façonnent l'innovation et favorisent l'adoption des nouvelles technologies. La gouvernance des données, la concurrence et même les politiques relatives à la propriété intellectuelle en sont des exemples. Il convient toutefois de trouver un équilibre entre faciliter l'innovation, promouvoir la concurrence et protéger le droit au respect de la vie privée; et
  - en finançant l'éducation, la santé, les infrastructures et d'autres biens publics. Les technologies numériques généralistes offrent, par exemple, une belle occasion d'améliorer les résultats en matière d'éducation et de santé.

## Notes

- 1 Bresnahan et Trajtenberg (1995).
- 2 Cela diffère de la notion de défaillance du marché, laquelle justifie une intervention des pouvoirs publics. Dans ce chapitre, le gouvernement intervient parce que le marché ne doit pas tout faire (voir Foray *et al.*, 2012; Mowery *et al.*, 2010).
- 3 Organisation mondiale de la Santé. Tableau de bord de l'OMS sur le coronavirus (COVID-19) [en ligne]. Tableau de bord sur le coronavirus (COVID-19). Disponible à l'adresse suivante : <https://covid19.who.int> (consulté le 2 janvier 2022).
- 4 Ansell et Mullins (2021), Crossley *et al.* (2021).
- 5 Ce chiffre a été revu à la baisse de 20 millions par rapport à la dernière estimation en janvier 2021. Voir Mahler *et al.* (2021).
- 6 Voir les Perspectives de l'économie mondiale (FMI, 2021) et Kose et Sugawara (2020).
- 7 <https://www.gavi.org/vaccineswork/covid-19-vaccine-race>
- 8 Des scientifiques de la Clinique de santé publique de Shanghai, dirigée par le professeur Zhang Yongzhen, ont cartographié le génome du virus de la COVID-19 dans les 40 heures qui ont suivi la réception du premier échantillon. Ils ont transmis la carte du génome au Centre national des informations de biotechnologie des États-Unis d'Amérique (NCBI) le 5 janvier 2020. Le 11 janvier 2020, la séquence cartographiée de la COVID-19 a été rendue publique (Campbell, 2020).
- 9 Bown et Bollyky (2021).
- 10 Acemoglu et Linn (2004), Clemens et Rogers (2020) et Kyle et McGahan (2011).
- 11 De nombreux économistes reconnaissent que la seule taille d'un marché ne peut constituer une incitation suffisante à innover. Certains des facteurs qui déterminent également si les sociétés pharmaceutiques vont décider d'investir dans une maladie sont les coûts et le temps nécessaires pour trouver une solution, voire la capacité à financer l'innovation. Certaines maladies peuvent toucher une large frange de la population, mais un petit nombre de patients. Voir Agarwal et Gaule (2021), Budish *et al.* (2015) et Kremer (2001, 2002).
- 12 Kelly (2020).
- 13 La CEPI est un partenariat entre des organismes publics, privés, philanthropiques et de la société civile. Voir : [https://cepi.net/research\\_dev/our-portfolio](https://cepi.net/research_dev/our-portfolio).
- 14 Des économistes tels que Mariana Mazzucato (2016, 2018) plaident en faveur de ce type d'intervention pour répondre aux défis sociétaux depuis 10 ans. Deux économistes, Pierre Azoulay et Benjamin Jones, ont écrit au Gouvernement des États-Unis d'Amérique en l'exhortant à le faire (2020).
- 15 Bown et Bollyky (2021).
- 16 Regalado (2020).
- 17 Wagner et Wakeman (2016).
- 18 Adler (2021) et Diamond (2021). À l'origine, on le désignait sous le nom de "Manhattan Project 2" (Diamond, 2021).
- 19 Diamond (2021).
- 20 Voir Bonvillian *et al.* (2019).
- 21 Adler (2021) mentionne que l'OWS est conçu comme la DARPA, toute proportion gardée.
- 22 GAO (2021).
- 23 BEIS britannique (2020).
- 24 Pour une explication des différents types de vaccins contre la COVID-19 et leur mode de fonctionnement, voir : <https://www.gavi.org/vaccineswork/there-are-four-types-covid-19-vaccines-heres-how-they-work>
- 25 Le lien d'inscription et le tableau de bord du registre des volontaires sont en ligne sur les sites Web du National Health Service britannique : <https://www.nhs.uk/conditions/coronavirus-covid-19/research> et <https://digital.nhs.uk/dashboards/coronavirus-covid-19-vaccine-studies-volunteers-dashboard-uk> (consultés le 29 novembre 2021).
- 26 Scheuber (2020).
- 27 Cookson (2021), Mancini *et al.* (2021).
- 28 Durmaz *et al.* (2015) et Gross et Sampat (2021).
- 29 Adler (2021).
- 30 Ce que l'on appelle le "parachute coopératif" (Liu *et al.*, 2021).
- 31 Cette section repose sur le rapport de synthèse remis à l'OMPI par Bhaven Sampat (2022).
- 32 Pardi *et al.* (2018) et Schlake *et al.* (2012).
- 33 Pardi *et al.* (2018).
- 34 La plupart des vaccins ciblent des pays à bas revenu (Xue et Ouellette, à paraître).
- 35 L'ARN messenger ne peut pas se combiner à l'ADN du patient et modifier son matériel génétique. Dès que l'ARN messenger a rempli sa fonction, il se dégrade et est éliminé de l'organisme (Dolgin, 2021).
- 36 Shipman (2021).
- 37 Voir Myers (2020).
- 38 Voir Sohrabi *et al.* (2021).
- 39 Agarwal et Gaulé (2021).
- 40 Ces vaccins ont été approuvés en recourant au mécanisme d'autorisation d'utilisation d'urgence.
- 41 Agrawal *et al.* (2021).
- 42 Woolliscroft (2020).
- 43 Cette section s'inspire fortement du rapport de synthèse de Noailly (2022).
- 44 IPCC (2014).
- 45 Hellegatte *et al.* (2017).
- 46 Voir <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement/key-aspects-of-the-paris-agreement>, consulté le 4 décembre 2021.
- 47 Dans leur engagement de 2015 adopté à l'échelle nationale (NDC), les États-Unis d'Amérique ont affirmé leur objectif d'abaisser leurs émissions de gaz à effet de serre à un niveau de 26 à 28% inférieur à celui de 2005 à l'horizon 2030. À Glasgow, l'engagement pris par les États-Unis d'Amérique en 2021 renforce leur engagement visant à réduire leur niveau d'émissions de 2005 entre

- 50 et 52% d'ici 2030. Pour accéder au registre du NDC, voir <https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Home.aspx>, consulté le 4 décembre 2021.
- 48 Voir l'analyse des technologies à faible émission de carbone dans Noailly (2022). Les émissions de gaz à effet de serre désignent les gaz qui maintiennent la température sur Terre à un niveau supérieur à ce qu'il devrait être. Ces gaz absorbent et réémettent de la chaleur dans l'atmosphère. Ils incluent le CO<sub>2</sub>, le méthane, l'oxyde d'azote, l'ozone et la vapeur d'eau.
- 49 L'énergie nucléaire est également une technologie d'atténuation du changement climatique. Les pays définissent différemment ce qu'ils considèrent comme étant des technologies à faible émission de carbone conformes aux objectifs d'atténuation du changement climatique. Les centrales nucléaires et à gaz sont, sur le plan technique, considérées comme émettant peu de carbone, mais certains pays ne les définissent pas comme telles (Noailly, 2022).
- 50 Voir le glossaire des terminologies liées à l'environnement (IPCC, 2018).
- 51 Gerarden (2018).
- 52 Lim *et al.* (2021) et Mundaca et Luth Richter (2015).
- 53 Jansen *et al.* (2020).
- 54 Johnson (2020).
- 55 AIE (2020a).
- 56 L'AIE tient à jour une base de données sur les politiques environnementales mises en œuvre par les États membres. Ces politiques peuvent être recherchées par thème, secteur et type. Les politiques visant la technologie, la R-D et l'innovation en sont un exemple: <https://www.iea.org/policies?topic=Technology%20R%26D%20and%20innovation>.
- 57 Bird *et al.* (2002).
- 58 Popp *et al.* (2010).
- 59 Popp (2019) et Popp *et al.* (2010).
- 60 McCulloch (2021).
- 61 <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org>
- 62 <https://unfccc.int/about-us/regional-collaboration-centres/the-ci-aca-initiative/about-carbon-pricing#eq-6>
- 63 Rogge et Dütschke (2018).
- 64 La politique allemande en matière de tarifs de rachat ne constituerait pas une subvention (Wilke, 2011).
- 65 Noailly (2012).
- 66 IRENA et CPI (2020).
- 67 Le prix d'utilisation de son service de compensation carbone s'élève à 1000 dollars É.-U. la tonne. Ce prix devrait baisser à mesure que la centrale deviendra totalement opérationnelle (Sigurdardottir et Rathi, 2021).
- 68 Cohen *et al.* (2020) et Noailly et Smeets (2015).
- 69 Entre 2015 et 2018, les grandes entreprises de l'industrie du pétrole et du gaz représentaient 37% de l'ensemble des investissements en capitaux dans les projets de captage, d'utilisation et de stockage du carbone (CCUS) (IEA, 2020b).
- 70 IPCC (2014).
- 71 OMPI (2017).
- 72 <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraft/display.action?id=1958-002B>
- 73 [https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar\\_timeline.pdf](https://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf)
- 74 Gerarden (2018).
- 75 OMPI (2017).
- 76 OMC et IRENA (2021).
- 77 Entre 2013 et 2019 (IRENA et CPI, 2020).
- 78 OMC et IRENA (2021).
- 79 AIE (2021c).
- 80 Li *et al.* (2017).
- 81 <http://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/movingca/cvrp.html>
- 82 La Chine a réduit de moitié les subventions pour les véhicules électriques, tandis que le programme de crédits d'impôts des États-Unis d'Amérique a pris fin pour les constructeurs automobiles tels que General Motors et Tesla (AIE, 2020c).
- 83 AIE (2020c).
- 84 Li *et al.* (2017).
- 85 <https://www.economist.com/finance-and-economics/2021/03/27/the-impact-of-green-investors>
- 86 Viscidi (2021). Trente-huit milliards de dollars É.-U. pour le premier trimestre 2020 contre 178 milliards pour le premier trimestre 2021.
- 87 Flood et Cumbo (2021).
- 88 O'Dwyer et Edgecliffe-Johnson (2021).
- 89 <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/07/28/fact-sheet-historic-bipartisan-infrastructure-deal>
- 90 <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/09/09/fact-sheet-biden-administration-advances-the-future-of-sustainable-fuels-in-american-aviation>
- 91 <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/10/28/president-biden-announces-the-build-back-better-framework>. Voir aussi Lobosco et Luhby (2021) et Sommer (2021).
- 92 <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/eu-plan-for-a-green-transition/>
- 93 [http://www.cdb.com.cn/English/xwzx\\_715/khdt/202106/t20210630\\_8759.html](http://www.cdb.com.cn/English/xwzx_715/khdt/202106/t20210630_8759.html)
- 94 [https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF\\_Stocktaking.aspx](https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/SAF_Stocktaking.aspx)
- 95 Voir Breakthrough Energy (2021).
- 96 Taylor (2020).
- 97 Popp (2019).
- 98 Gaddy *et al.* (2017).
- 99 Gaddy *et al.* (2017) et Noailly et Smeets (2015).
- 100 AIE (2021b).
- 101 Nanda *et al.* (2014).
- 102 Aghion *et al.* (2016) et Noailly et Smeets (2015).
- 103 Acemoglu *et al.* (2019).
- 104 Unruh (2000).
- 105 Fabrizio et Hawn (2013).
- 106 La proposition de McCarthy *et al.* (2006) est la suivante: "chaque aspect de l'apprentissage ou tout autre élément d'intelligence peut, en principe, être décrit avec une telle précision qu'une machine peut être créée pour le simuler".
- 107 Les chercheurs débattent de la question de savoir si l'intelligence artificielle et

- les technologies connexes sont des technologies numériques généralistes ou des technologies habilitantes ou une “invention d’une méthode d’inventions” (IMI) (Bigliardi *et al.*, 2020; Cockburn *et al.*, 2019; Martinelli *et al.*, 2021). Cockburn *et al.* (2019) font valoir qu’il existe une différence entre les technologies destinées à exécuter des tâches relativement limitées, comme les robots, et celles qui couvrent un large éventail d’applications technologiques. En tentant de distinguer ces deux catégories, les coauteurs classent alternativement l’intelligence artificielle et ses technologies connexes dans la catégorie des technologies numériques généralistes ou comme “invention d’une méthode d’inventions”. Ils ont arrêté leur choix sur l’invention d’une méthode d’inventions de technologies numériques généralistes. Ces technologies numériques peuvent toutefois influencer la trajectoire de l’innovation à long terme.
- 108 Des débats sont en cours pour déterminer si le développement de l’intelligence artificielle et de ce type de technologies constitue une extension de la troisième révolution industrielle. Klaus Schwab, le fondateur et directeur exécutif du Forum économique mondial, aurait créé l’expression (Schwab, 2016).
- 109 Voir le chapitre 3 sur les véhicules autonomes dans OMPI (2019a).
- 110 Les entreprises sont plus susceptibles d’adopter l’intelligence artificielle si elles se fondent déjà sur les mégadonnées et qu’elles disposent d’une capacité informatique suffisante (Brynjolfsson et McAfee, 2014).
- 111 Yilmazkuday (à paraître) a calculé que les dépenses de consommation ont augmenté de 16% et que le commerce en ligne a progressé de 21% par rapport aux tendances antérieures à la pandémie.
- 112 Geradin (2018) et Hinings *et al.* (2018).
- 113 Voir le chapitre 3 sur les véhicules autonomes dans OMPI (2019a).
- 114 Voir le chapitre 3 sur les robots dans OMPI (2015).
- 115 Voir OMPI (2019b) pour d’autres exemples.
- 116 Brynjolfsson *et al.* (2017).
- 117 Voir OMPI (2019b) sur le dilemme éthique concernant les technologies fondées sur l’intelligence artificielle.
- 118 Brynjolfsson *et al.* (2018).
- 119 Voir Kudumala *et al.* (2021) pour d’autres exemples.
- 120 Dogan *et al.* (2021), Khan *et al.* (2021) et Vaishya *et al.* (2020).
- 121 <https://about.ups.com/be/en/social-impact/the-ups-foundation/health-humanitarian-relief/delivering-what-matters--equitable-vaccine-access-globally.html>
- 122 Trajtenberg (2019).
- 123 Aghion *et al.* (2017) et Brynjolfsson et McAfee (2014).
- 124 Trajtenberg (2019).
- 125 Fu et Liu (2022).
- 126 Trajtenberg (2019).
- 127 Voir Cockburn *et al.* (2019); Graetz et Michaels (2018).
- 128 Voir Espinoza (2021), Espinoza et Beioley (2021), Kalra (2021) et Song (2021). Les dossiers du Ministère de la Justice des États-Unis d’Amérique sont disponibles en ligne à l’adresse : <https://www.justice.gov/atr/case/us-and-plaintiff-states-v-google-llc>
- 129 L’expression “plateforme numérique” est utilisée librement ici. Ces cinq entreprises fournissent des services différents et appliquent des modèles commerciaux différents (Gilbert, 2021).
- 130 CNUCED (2019).
- 131 Gawer (2021) et Varian (2021).
- 132 Voir OCDE (2021), 7–8.
- 133 La Commission des consommateurs, l’autorité française de la concurrence et l’autorité britannique de la concurrence et des marchés ont conclu leurs études le 21 septembre 2021, le 7 juin 2021 et le 1<sup>er</sup> juillet 2021, respectivement. Voir <https://www.accc.gov.au/publications/digital-advertising-services-inquiry-final-report>, <https://www.autoritedelaconcurrence.fr/fr/communiqués-de-presse/autorite-de-la-concurrence-sanctionne-google-hauteur-de-220-millions-deuros>, <https://www.gov.uk/cma-cases/online-platforms-and-digital-advertising-market-study> pour de plus amples informations. L’Union européenne a ouvert son enquête le 22 juin 2021 (voir [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_21\\_3143](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_3143)), tandis que le Ministère américain de la justice s’apprêterait à poursuivre Google (voir <https://www.reuters.com/technology/us-doj-preparing-sue-google-over-digital-ads-business-bloomberg-news-2021-09-01/>).
- 134 Par exemple, l’enquête de la Commission européenne sur Amazon et Google (Geradin, 2018) et celle des autorités indiennes sur Amazon et Flipkart (Kalra, 2021).
- 135 Par exemple, Google aurait payé d’autres fournisseurs de services pour maintenir son moteur de recherche comme moteur par défaut (Molla et Estes, 2020; Nellis, 2020; Park, 2021).
- 136 La Commission fédérale du commerce des États-Unis d’Amérique considère que le rachat d’Instagram et de WhatsApp par Facebook constitue un comportement anticoncurrentiel dommageable pour les consommateurs. Voir <https://www.ftc.gov/enforcement/cases-proceedings/191-0134/facebook-inc-ftc-v>
- 137 Gilbert (2021).
- 138 Waller (2009).
- 139 Voir Bryan *et al.* (2020), Budish *et al.* (2015) et Hanisch et Rake (2021).
- 140 Sampat (2022).
- 141 Nelson (1961) et Scherer (2011).
- 142 Le 12 décembre 2015, 196 nations se sont engagées à limiter à moins de 2° Celsius le réchauffement global lors de

- la 21<sup>e</sup> Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (UNFCCC) à Paris (France). Voir : <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement/key-aspects-of-the-paris-agreement>.
- 143 AIE (2021c).
- 144 Le Dialogue de l'OMPI sur la propriété intellectuelle et les technologies de pointe est l'enceinte idoine pour débattre de ces questions.
- 145 <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2021/05/SAP-S.-1260.pdf>
- 146 Sur les 250 milliards de dollars É.-U., un peu plus de 50 milliards seront destinés à la Fondation nationale pour la science (NSF).
- 147 [http://english.www.gov.cn/premier/news/2017/01/29/content\\_281475554068056.htm](http://english.www.gov.cn/premier/news/2017/01/29/content_281475554068056.htm)
- 148 [https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe\\_en](https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en)

## Références

- Acemoglu, D. and J. Linn (2004). Market size in innovation: Theory and evidence from the pharmaceutical industry. *Quarterly Journal of Economics*, 119, 1049–1090.
- Acemoglu, D., P. Aghion, L. Barrage and D. Hemous (2019). Climate Change, Directed Innovation, and Energy Transition: The Long-Run Consequences of the Shale Gas Revolution. Meeting Papers 1302, *Society for Economic Dynamics*.
- Adler, D. (2021). Inside Operation Warp Speed: A new model for industrial policy. *American Affairs Journal*, 5(2).
- Agarwal, R. and P. Gaulé (2021). What Drives Innovation? Lessons from COVID-19 R&D. *IZA Discussion Papers*, no. 14079. Institute of Labor Economics (IZA).
- Aghion, P., A. Dechezleprêtre, D. Hémous, R. Martin and J. Van Reenen (2016). Carbon taxes, path dependency, and directed technical change: Evidence from the auto industry. *Journal of Political Economy*, 124, 1–51. DOI: <https://doi.org/10.1086/684581>.
- Aghion, P., B.F. Jones and C.I. Jones (2017). Artificial Intelligence and Economic Growth. *Working Paper Series*, no. 23928. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w23928>.
- Agrawal, G., H. Ahlawat and M. Dewhurst (2021). The biopharma industry has shown what it can achieve when it works at its best. How can the industry build on this renewed sense of purpose in the years ahead? *McKinsey & Company Pharmaceutical & Medical Products Practice*. McKinsey & Company.
- Ansell, R. and J.P. Mullins (2021). COVID-19 ends longest employment recovery and expansion in current employment statistics (CES) history, causing unprecedented job losses in 2020. *Monthly Labor Review*. Washington, D.C.: U.S. Bureau of Labor Statistics.
- Azoulay, P. and B. Jones (2020). Beat COVID-19 through innovation. *Science*, 368, 553–553. DOI: <https://doi.org/10/ggv2dd>.
- Bigliardi, B., E. Bottani and G. Casella (2020). Enabling technologies, application areas and impact of industry 4.0: A bibliographic analysis. International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing (ISM 2019), *Procedia Manufacturing*, 42, 322–326. DOI: <https://doi.org/10/gmqb4p>.
- Bird, L., R. Wüstenhagen and J. Aabakken (2002). A review of international green power markets: Recent experience, trends, and market drivers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6, 513–536. DOI: <https://doi.org/10/dg7z96>.
- Bonvillian, W.B., R.V. Atta and P. Windham (eds) (2019). *The DARPA Model for Transformative Technologies: Perspectives on the U.S. Defense Advanced Research Projects Agency*. Open Book Publishers.
- Bown, C.P. and T. Bollyky, T. (2021). How COVID-19 Vaccine Supply Chains Emerged in the Midst of a Pandemic. Working Paper 21-12, *The World Economy*.
- Breakthrough Energy (2021). Breakthrough Energy and MI: Partners in delivering our net-zero future. *Mission Innovation*. Available at: <http://mission-innovation.net/2021/03/16/breakthrough-energy-and-mi-partners-in-delivering-our-net-zero-future> (accessed January 13 2022).
- Bresnahan, T.F. and M. Trajtenberg (1995). General purpose technologies “Engines of growth”? *Quarterly Journal of Economics*, 65, 83–108. DOI: <https://doi.org/10/fgvj5w>.
- Bryan, K., J. Lemus and G. Marshall (2020). Crises and the Direction of Innovation. Working paper, available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3587973>.
- Brynjolfsson, E. and A. McAfee (2014). *The Second Machine Age: Work Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies*. New York: W. Norton & Company.
- Brynjolfsson, E., X. Hui and M. Liu (2018). Does Machine Translation Affect International Trade? Evidence from a Large Digital Platform. *Working Paper Series*, no. 24917. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w24917>.
- Brynjolfsson, E., D. Rock and C. Syverson (2017). Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: A Clash of Expectations and Statistics. *Working Paper Series*, no. 24001. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w24001>.
- Budish, E., B.N. Roin and H. Williams (2015). Do firms underinvest in long-term research? Evidence from cancer clinical trials. *American Economic Review*, 105, 2044–2085. DOI: <https://doi.org/10/gdz4zg>.
- Campbell, C. (2020). Chinese scientist who first sequenced COVID-19 genome speaks about controversies surrounding his work. *Time*. Available at: <https://time.com/5882918/zhang-yongzhen-interview-china-coronavirus-genome>.

- Clemens, J. and P. Rogers (2020). Demand Shocks, Procurement Policies, and the Nature of Medical Innovation: Evidence from Wartime Prosthetic Device Patents. *Working Paper Series*, no. 26679. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w26679>.
- Cockburn, I.M., R. Henderson and S. Stern (2019). The impact of artificial intelligence on innovation: An exploratory analysis. In Agrawal, A., J. Gans and A. Goldfarb (eds), *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda*. University of Chicago Press, 115–146.
- Cohen, L., U.G. Gurun and Q.H. Nguyen (2020). The ESG-Innovation Disconnect: Evidence from Green Patenting. *Working Paper Series*, no. 27990. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w27990>.
- Cookson, C. (2021). How the UK boosted its vaccine manufacturing capacity. *Financial Times*. Available at: <https://www.ft.com/content/662ab296-2aef-4179-907c-5dba5c355d86>.
- Crossley, T.F., P. Fisher and H. Low (2021). The heterogeneous and regressive consequences of COVID-19: Evidence from high quality panel data. *Journal of Public Economics*, 193, 104334. DOI: <https://doi.org/10/gh6g85>.
- Diamond, D. (2021). The crash landing of “Operation Warp Speed.” *Politico*. Available at: <https://www.politico.com/news/2021/01/17/crash-landing-of-operation-warp-speed-459892>.
- Dogan, O., S. Tiwari, M.A. Jabbar and S. Guggari (2021). A systematic review on AI/ML approaches against COVID-19 outbreak. *Complex & Intelligent Systems*, 7, 2655–2678. DOI: <https://doi.org/10/gnqxs2>.
- Dolgin, E. (2021). The tangled history of mRNA vaccines. *Nature*, 597, 318–324. DOI: <https://doi.org/10/gmthh9>.
- Durmaz, A.A., E. Karaca, U. Demkow, G. Toruner, J. Schoumans and O. Cogulu (2015). Evolution of genetic techniques: Past, present, and beyond. *BioMed Research International*, 2015, 461524. DOI: <https://doi.org/10/gb57gp>.
- Espinoza, J. (2021). EU lawmakers agree on rules to target Big Tech. *Financial Times*. Available at: <https://www.ft.com/content/045346cf-c28a-4f6f-9dce-4f8426129bf9>.
- Espinoza, J. and K. Beioley (2021). UK competition regulator plans probe into Amazon’s use of data. *Financial Times*. Available at: <https://www.ft.com/content/e169cee6-880d-4b8d-acf7-32c2f774f852>.
- Fabrizio, K.R. and O. Hawn (2013). Enabling diffusion: How complementary inputs moderate the response to environmental policy. *Research Policy*, 42, 1099–1111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.02.003>.
- Flood, C. and J. Cumbo (2021). Dutch pension giant ABP to dump €15bn in fossil fuel holdings. *Financial Times*. Available at: <https://www.ft.com/content/425d7c82-e69a-4fe2-9767-8c92bda731e7>.
- Foray, D., D.C. Mowery and R.R. Nelson (2012). Public R&D and social challenges: What lessons from mission R&D programs? *Research Policy*, 41(10), 1697–1702. DOI: <https://doi.org/10/gfdcf>.
- Fu, X. and L. Shi (2022). Direction of Innovation in Developing Countries and its Driving Forces. *WIPO Economic Research Working Paper Series*, no. 69. Geneva: World Intellectual Property Report.
- Gaddy, B.E., V. Sivaram, T.B. Jones and L. Wayman (2017). Venture capital and cleantech: The wrong model for energy innovation. *Energy Policy*, 102, 385–395.
- GAO (Government Accountability Office) (2021). *Operation Warp Speed: Accelerated COVID-19 Vaccine Development Status and Efforts to Address Manufacturing Challenges, Report to Congressional Addresses*. Washington, D.C.: United States Government Accountability Office. Available at: <https://www.gao.gov/products/gao-21-319>.
- Gawer, A. (2021). Digital platforms and ecosystems: Remarks on the dominant organizational forms of the digital age. *Innovation*, 0, 1–15. DOI: <https://doi.org/10/gmzkwk>.
- Geradin, D. (2018). What Should EU Competition Policy Do to Address the Concerns Raised by the Digital Platforms’ Market Power? *TILEC Discussion Paper*, no. 2018–041. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3299910>.
- Gerarden, T.D. (2018). Demanding innovation: The impact of consumer subsidies on solar panel production costs. Cambridge, MA: Harvard Environmental Economics Program, 2018. Available at: <https://heep.hks.harvard.edu/publications/demanding-innovation-impact-consumer-subsidies-solar-panel-production-costs>.
- Gilbert, R.J. (2021). Separation: A cure for abuse of platform dominance? *Information Economics & Policy: Antitrust in the Digital Economy*, 54, 100876. DOI: <https://doi.org/10/ghpcvk>.
- Global Health Centre. 2021. COVID-19 Vaccines R&D Investments. Graduate Institute of International and Development Studies. Retrieved from: [knowledgeportalia.org/covid19-r-d-funding](https://knowledgeportalia.org/covid19-r-d-funding) (accessed August 1, 2021).
- Graetz, G. and G. Michaels (2018). Robots at work. *The Review of Economics and Statistics*, 100, 753–768. DOI: <https://doi.org/10/ggfw8r>.

- Gross, D. and B. Sampat (2021). Crisis Innovation Policy from World War II to COVID-19. *Working Paper Series*, no. 28915. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. DOI: <https://doi.org/10.3386/w28915>.
- Hanisch, M. and B. Rake (2021). Repurposing Without Purpose? Early Innovation Responses to the COVID-19 Crisis: Evidence from Clinical Trials. *R&D Management*, Special issue paper. DOI: <https://doi.org/10/gh7k87>.
- Hellegatte, S., A. Vogt-Schilb, M. Bangalore and J. Rozenberg (2017). *Unbreakable: Building the Resilience of the Poor in the Face of Natural Disaster, Climate Change and Development Series*. Washington, D.C.: World Bank.
- Hinings, B., T. Gegenhuber and R. Greenwood (2018). Digital innovation and transformation: An institutional perspective. *Information and Organization*, 28, 52–61. DOI: <https://doi.org/10/gdhskm>.
- IEA (International Energy Agency) (2020a). *Energy Technology RD&D Budgets Overview, IEA Energy Technology RD&D Budgets*. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-rdd-budgets-overview>.
- IEA (2020b). *The Oil and Gas Industry in Energy Transitions: World Energy Outlook special report*. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/the-oil-and-gas-industry-in-energy-transitions>.
- IEA (2020c). *Global EV Outlook 2020: Entering the Decade of Electric Drive?* Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>.
- IEA (2021a). *Global EV Outlook 2021*. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>.
- IEA (2021b). *Ten Years of Clean Energy Start-ups*. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/articles/ten-years-of-clean-energy-start-ups>.
- IEA (2021c). *Net Zero by 2050*. Paris: International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- IMF (International Monetary Fund) (2021). *World Economic Outlook Update, July 2021: Fault Lines Widen in the Global Recovery*. Washington D.C.: International Monetary Fund. Available at: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2021/07/27/world-economic-outlook-update-july-2021>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC Fifth Assessment Report)*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr>.
- IPCC (2018). Annex I: Glossary. In Matthews, J.B.R., M. Babiker, H. de Coninck, S. Connors, R. Diemen, R. Djalante et al. (eds), *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. Available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/download>.
- IRENA and CPI (International Renewable Energy Agency and Climate Policy Initiative) (2020). *Global Landscape of Renewable Energy Finance 2020*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Available at: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Global-Landscape-of-Renewable-Energy-Finance-2020>.
- Jansen, M., I. Staffell, L. Kitzing, S. Quoilin, E. Wiggelinkhuizen, B. Bulder et al. (2020). Offshore wind competitiveness in mature markets without subsidy. *Nature Energy*, 5(8), 614–622. <https://doi.org/10/gh75pp>.
- Johnson, S.K. (2020). Offshore wind in Europe won't need subsidies much longer. *Ars Technica*. Available at: <https://arstechnica.com/science/2020/07/offshore-wind-in-europe-wont-need-subsidies-much-longer> (accessed August 18, 2021).
- Kalra, A. (2021). Amazon documents reveal company's strategy to dodge India's regulators. *Reuters*. Available at: <https://www.reuters.com/investigates/special-report/amazon-india-operation>.
- Kelly, É. (2020). EU announces second wave of research response to COVID-19. *Science Business*. Available at: <https://sciencebusiness.net/covid-19/news/eu-announces-second-wave-research-response-covid-19>.
- Khan, M., M.T. Mehran, Z.U. Haq, Z. Ullah, S.R. Naqvi, M. Ihsan and H. Abbass (2021). Applications of artificial intelligence in COVID-19 pandemic: A comprehensive review. *Expert Systems with Applications*, 185, 115695. DOI: <https://doi.org/10/gnqxs3>.
- Kose, M.A. and N. Sugawara (2020). Understanding the depth of the 2020 global recession in 5 charts. *World Bank Blogs*. Available at: <https://blogs.worldbank.org/opendata/understanding-depth-2020-global-recession-5-charts> (accessed November 23, 2021).
- Kremer, M. (2001). Creating markets for new vaccines – Part I: Rationale. In Jaffe, A., J. Lerner and S. Stern (eds), *Innovation Policy and the Economy, Volume 1*. MIT Press, 35–72. DOI: <https://doi.org/10.1086/ipe.1.25056141>.
- Kremer, M. (2002). Pharmaceuticals and the developing world. *Journal of Economic Perspectives*, 16, 67–90.

- Kudumala, A., D. Ressler and W. Miranda (2021). Scaling up AI across the life sciences value chain. *Deloitte Insights*. Deloitte. Available at: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/industry/life-sciences/ai-and-pharma.html>.
- Kyle, M.K. and A.M. McGahan (2011). Investments in pharmaceuticals before and after TRIPS. *The Review of Economics and Statistics*, 94, 1157–1172. DOI: [https://doi.org/10.1162/REST\\_a\\_00214](https://doi.org/10.1162/REST_a_00214).
- Li, S., L. Tong, J. Xing and Y. Zhou (2017). The market for electric vehicles: Indirect network effects and policy design. *Journal of the Association of Environmental and Resource Economists*, 4, 89–133. DOI: <https://doi.org/10/gj8rcc>.
- Lim, T., T. Tang and W.M. Bowen (2021). The impact of intergovernmental grants on innovation in clean energy and energy conservation: Evidence from the American Recovery and Reinvestment Act. *Energy Policy*, 148, 111923. DOI: <https://doi.org/10/gmhrd4>.
- Liu, M., Y. Bu, C. Chen, J. Xu, D. Li, Y. Leng et al. (2021). Can pandemics transform scientific novelty? Evidence from COVID-19. *Journal of the Association for Information Science and Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1002/asi.24612>.
- Lobosco, K. and T. Luhby (2021). Build Back Better Bill: 10 things you didn't know. *CNNpolitics*. Available at: <https://edition.cnn.com/2021/12/07/politics/biden-build-back-better-spending-bill/index.html> (accessed December 12, 2021).
- Mahler, D.G., N. Yonzan, C. Lakner, R.A. Casaneda Aguilar and H. Wu (2021). Updated estimates of the impact of COVID-19 on global poverty: Turning the corner on the pandemic in 2021? *World Bank Blogs*. Available at: <https://blogs.worldbank.org/opendata/updated-estimates-impact-covid-19-global-poverty-turning-corner-pandemic-2021> (accessed November 23, 2021).
- Mancini, D.P., H. Kuchler, J. Pickard and J. Cameron-Chileshe (2021). Flagship UK vaccine manufacturing centre put up for sale. *Financial Times*. Available at: <https://www.ft.com/content/d312c4cb-201d-4ce6-a98f-715b20d77998>.
- Martinelli, A., A. Mina, A. and M. Moggi (2021). The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution. *Industrial and Corporate Change*, 30, 161–188. DOI: <https://doi.org/10/gjscgj>.
- Mazzucato, M. (2016). From market fixing to market-creating: A new framework for innovation policy. *Industry and Innovation*, 23, 140–156. DOI: <https://doi.org/10.1080/13662716.2016.1146124>.
- Mazzucato, M. (2018). Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities. *Industrial and Corporate Change*, 27, 803–815. DOI: <https://doi.org/10/gfdbxb>.
- McCarthy, J., M. Minsky, N. Rochester and C. Shannon (2006). A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence. *AI Magazine*, 27(4), 12. DOI: <https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904>.
- McCulloch, S. (2021). Carbon capture in 2021: Off and running or another false start? *IEA*. Available at: <https://www.iea.org/commentaries/carbon-capture-in-2021-off-and-running-or-another-false-start> (accessed December 5, 2021).
- Molla, R. and A.C. Estes, A.C. (2020). Google's antitrust lawsuits, explained. *Vox*. Available at: <https://www.vox.com/recode/2020/12/16/22179085/google-antitrust-monopoly-state-lawsuit-ad-tech-search-facebook> (accessed 12 August, 2021).
- Mowery, D.C., Nelson, R.R., Martin, B.R. (2010). Technology policy and global warming: Why new policy models are needed (or why putting new wine in old bottles won't work). *Research Policy*, 39, 1011–1023. <https://doi.org/10/bqjwxh>
- Mundaca, L., Luth Richter, J. (2015). Assessing 'green energy economy' stimulus packages: Evidence from the U.S. programs targeting renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 42, 1174–1186. <https://doi.org/10/f3n642>
- Myers, K. (2020). The elasticity of science. *American Economic Journal: Applied Economics*. 12, 103–134. <https://doi.org/10/gjh9xc>
- Nanda, R., Younge, K., Fleming, L. (2014). Innovation and entrepreneurship in renewable energy, in: Jaffe, A.B., Jones, B.F. (eds), *The Changing Frontier: Rethinking Science and Innovation Policy*. University of Chicago Press, pp. 199–232. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226286860.003.0008>
- Nellis, S. (2020). UK regulators take aim at Apple's search engine deal with Google. *Reuters*. Available at: <https://www.reuters.com/article/us-apple-google-idUSKBN242748>.
- Nelson, R.R. (1961). Uncertainty, learning, and the economics of parallel research and development efforts. *The Review of Economics and Statistics*, 43, 351–364. DOI: <https://doi.org/10/ct87xp>.
- Noailly, J. (2012). Improving the energy efficiency of buildings: The impact of environmental policy on technological innovation. *Energy Economics*, 34, 795–806. DOI: <https://doi.org/10/fnfqc6>.
- Noailly, J. (2022). Directing Innovation Towards a Low-Carbon Future. *WIPO Economic Research Working Paper Series*, no. 73. Geneva: World Intellectual Property Report.

- Noailly, J. and R. Smeets (2015). Directing technical change from fossil-fuel to renewable energy innovation: An application using firm-level patent data. *Journal of Environmental Economics and Management*, 72, 15–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2015.03.004>.
- O'Dwyer, M., and A. Edgecliffe-Johnson (2021, August 30). Big Four accounting firms rush to join the ESG bandwagon. *Financial Times*. Available at: <https://www.ft.com/content/4a47fb4a-4a10-4c05-8c5d-02d83052bee7>.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2021). Data Portability, Interoperability and Digital Platform Competition. *OECD Competition Committee Discussion Paper*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. Available at: <https://www.oecd.org/daf/competition/data-portability-interoperability-and-competition.htm>.
- Pardi, N., M.J. Hogan, F.W. Porter and D. Weissman (2018). mRNA vaccines – A new era in vaccinology. *Nature Reviews Drug Discovery*, 17, 261–279. DOI: <https://doi.org/10/gcsmgr>.
- Park, K. (2021). South Korean antitrust regulator fines Google \$177M for abusing market dominance. *TechCrunch*. Available at: <https://social.techcrunch.com/2021/09/14/south-korean-antitrust-regulator-fines-google-177m-for-abusing-market-dominance/> (accessed December 8, 2021).
- Popp, D. (2019). Promoting Innovation for Low-Carbon Technologies (No. 2019–14), Policy Proposal. Washington D.C.: The Hamilton Project.
- Popp, D., R.D. Newell and A.B. Jaffe (2010). Energy, the environment, and technological change. In Hall, B.H. and N. Rosenberg (eds), *Economics of Innovation*. Amsterdam: Elsevier, 874–937.
- Regalado, A. (2020). A coronavirus vaccine will take at least 18 months – if it works at all. *MIT Technological Review*. Available at: <https://www.technologyreview.com/2020/03/10/916678/a-coronavirus-vaccine-will-take-at-least-18-months-if-it-works-at-all>.
- Rogge, K.S. and E. Dütschke (2018). What makes them believe in the low-carbon energy transition? Exploring corporate perceptions of the credibility of climate policy mixes. *Environmental Science and Policy*, 87, 74–84.
- Sampat, B. (2022). World War II and the Direction of Medical Innovation. *WIPO Economic Research Working Paper Series*, no. 70. Geneva: World Intellectual Property Organization.
- Scherer, F.M. (2011). Parallel R&D Paths Revisited. *HKS Faculty Research Working Paper Series*, no. RWP11-022. Boston: Harvard Kennedy School.
- Scheuber, A. (2020). COVID-19 vaccine secures new government investment. *Imperial College London News*. Available at: <https://www.imperial.ac.uk/news/197573/covid-19-vaccine-secures-government-investment> (accessed November 29, 2021).
- Schlake, T., A. Thess, M. Fotin-Mleczek and K.-J. Kallen (2012). Developing mRNA-vaccine technologies. *RNA Biology*, 9, 1319–1330. DOI: <https://doi.org/10/f4qzdb>.
- Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution: What it means and how to respond. *World Economic Forum*. Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond> (accessed October 12, 2021).
- Shipman, M. (2021). Why mRNA won't replace other vaccine types just yet. *World Economic Forum*. Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2021/09/why-mrna-wont-replace-other-vaccine-types-just-yet> (accessed December 2, 2021).
- Sigurdardottir, R. and A. Rathi (2021). World's largest carbon-sucking plant starts making tiny dent in emissions. *Bloomberg.com*. Available at: <https://www.bloomberglia.com/2021/09/12/worlds-largest-carbon-sucking-plant-starts-making-tiny-dent-in-emissions>.
- Sohrabi, C., G. Mathew, T. Franchi, A. Kerwan, M. Griffin, J. Soleil C Del Mundo et al. (2021). Impact of the coronavirus (COVID-19) pandemic on scientific research and implications for clinical academic training – A review. *International Journal of Surgery*, 86, 57–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijso.2020.12.008>.
- Sommer, L. (2021). What losing Build Back Better means for climate change. *NPR*. Available at: <https://www.ctpublic.org/2021-12-20/what-losing-build-back-better-means-for-climate-change>.
- Song, J. (2021). Google fined \$177m in South Korea for abusing market dominance. *Financial Times*. Available at: <https://www.ft.com/content/fbd758b2-9f99-4d60-a76b-82eeb5985542>.
- Taylor, M. (2020). *Energy Subsidies: Evolution in the Global Energy Transformation to 2050*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency. Available at: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Energy-Subsidies-2020>.
- Trajtenberg, M. (2019). Artificial Intelligence as the Next GPT: A Political-Economy Perspective. In Agrawal, A., J. Gans and A. Goldfarb (eds), *The Economics of Artificial Intelligence*. University of Chicago Press, 175–186. DOI: <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226613475.003.0006>.
- Trajtenberg, M., I. Hamdan-Livramento and A. Daly. (2022). *Harnessing digital-general purpose technology*. Unpublished background research commissioned for the World Intellectual Property Report 2022. Geneva: World Intellectual Property Organization.

- UK BEIS (UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy) (2020). *UK Vaccine Taskforce 2020 Achievements and Future Strategy: End of Year Report*. London: UK Department for Business, Energy and Industrial Strategy. Available at: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1027646/vtf-interim-report.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1027646/vtf-interim-report.pdf).
- UNCTAD (United Nations Conference on Trade and Development) (2019). *Competition Issues in the Digital Economy, Trade and Development Board*. Geneva: United Nations Conference on Trade and Development. Available at: [https://unctad.org/system/files/official-document/ciclpd54\\_en.pdf](https://unctad.org/system/files/official-document/ciclpd54_en.pdf).
- Unruh, G.C. (2000). Understanding carbon lock-in. *Energy Policy*, 28, 817–830. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(00\)00070-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00070-7).
- Vaishya, R., M. Javaid, I.H. Khan and A. Haleem (2020). Artificial Intelligence (AI) applications for COVID-19 pandemic. *Diabetes Metabolic Syndrome: Clinical Research and Reviews*, 14, 337–339. DOI: <https://doi.org/10/ggvfcfp>.
- Varian, H.R. (2021). Seven deadly sins of tech? *Information Economics and Policy: Antitrust in the Digital Economy*, 54, 100893. DOI: <https://doi.org/10/ghc4t6>.
- Viscidi, L. (2021). Sustainable investment is flooding the market. *Foreign Policy*. Available at: <https://foreignpolicy.com/2021/06/11/sustainable-investment-is-flooding-the-market>.
- Wagner, S. and S. Wakeman (2016). What do patent-based measures tell us about product commercialization? Evidence from the pharmaceutical industry. *Research Policy*, 45, 1091–1102.
- Waller, S. (2009). The past, present, and future of monopolization remedies. *Antitrust Law Journal*, 76, 11–29.
- Wilke, M. (2011). Feed-in Tariffs for Renewable Energy and WTO Subsidy Rules: An Initial Legal Review (Issue Paper No. 4). *ICTSD Programme on Trade and Environment*. Geneva: International Centre for Trade and Sustainable Development.
- WIPO (World Intellectual Property Organization) (2015). *World Intellectual Property Report 2015: Breakthrough Innovation and Economic Growth*. Geneva: World Intellectual Property Organization. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=3995>.
- WIPO (2017). *World Intellectual Property Report 2017: Intangible Capital in Global Value Chains*. Geneva: World Intellectual Property Organization. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4225>.
- WIPO (2019a). *World Intellectual Property Report 2019: The Geography of Innovation: Global Hotspots, Local Networks, World Intellectual Property Report*. Geneva: World Intellectual Property Organization. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4467>.
- WIPO (2019b). *WIPO Technology Trends 2019: Artificial Intelligence, WIPO Technology Trends*. Geneva: World Intellectual Property Organization. Available at: <https://www.wipo.int/publications/en/details.jsp?id=4386>.
- Woolliscroft, J.O. (2020). Innovation in response to the COVID-19 pandemic crisis. *Academic Medicine*, 95(8), 1140–1142. DOI: <https://doi.org/10/ggrzjc>.
- WTO and IRENA (World Trade Organization and International Renewable Energy Agency) (2021). *Trading into a Bright Energy Future: The Case for Open, High-quality Solar Photovoltaic Markets*. Geneva: World Trade Organization. Available at: [https://www.wto.org/english/res\\_e/publications\\_e/energyfuture2021\\_e.htm](https://www.wto.org/english/res_e/publications_e/energyfuture2021_e.htm).
- Xue, Q.C. and L.L. Ouellette (forthcoming). Innovation policy and the market for vaccines. *Journal of Law and Biosciences*.
- Yilmazkuday, H. (forthcoming). Changes in consumption in the early COVID-19 era: Zip-code Level evidence from the U.S. *Journal of Risk and Financial Management*. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3658518>.

## Notes techniques

### Données de brevets

Les données de brevets ayant servi à l'établissement du présent rapport sont tirées de l'Office européen des brevets (OEB), de la base de données mondiale sur les statistiques en matière de brevets (PATSTAT, octobre 2021) et des collections du Traité de coopération en matière de brevets (PCT).

L'unité d'analyse principale est le premier dépôt d'un ensemble de demandes de brevet déposées dans un ou plusieurs pays pour une même invention. Chaque ensemble contenant un premier dépôt et, éventuellement, plusieurs dépôts ultérieurs, est défini comme une famille de brevets.

### Stratégies de cartographie

La stratégie de cartographie des brevets utilisée pour chacune des études de cas – technologies numériques généralistes et technologies à faible émission de carbone – est fondée sur des études antérieures et des suggestions d'experts. Chaque stratégie s'est appuyée, dans la mesure du possible, sur des exercices de cartographie de brevets équivalents. Le résumé de ceux-ci peut être consulté dans les publications suivantes. Pour plus de détails, voir Noailly (2022) et Trajtenberg, Hamdan-Livramento et Daly (2022).

Les stratégies de cartographie s'appuient sur une combinaison de classifications de brevets, à savoir la classification internationale des brevets (CIB) et la classification coopérative des brevets (CPC), ainsi que sur les mots-clés utilisés dans les données PATSTAT.

### Technologies numériques généralistes

La cartographie des technologies numériques généralistes repose sur les stratégies des sous-catégories énumérées ci-après.

#### Intelligence artificielle (IA) et apprentissage machine (AM)

Symboles CIB/CPC : A61B 5/7264; A61B 5/7267; A63F 13/67; B23K 31/006; B25J 9/161; B29C2945/76979; B29C 66/965; B29C 66/966; B60G2600/1876; B60G2600/1878; B60G2600/1879; B60T2210/122; B60T 8/174; B62D 15/0285; B65H2557/38; F02D 41/1405; F03D 7/046; F05B2270/707; F05B2270/709; F16H2061/0081; F16H2061/0084; G01N2201/1296; G01N 29/4481; G01N 33/0034; G01R 31/2846; G01R 31/2848; G01S 7/417; G05B 13/027; G05B 13/0275; G05B 13/028; G05B 13/0285; G05B 13/029; G05B 13/0295; G05B2219/21002; G05B2219/25255; G05B2219/32193; G05B2219/32335; G05B2219/33002; G05B2219/33013; G05B2219/33014; G05B2219/33021; G05B2219/33024; G05B2219/33025; G05B2219/33027; G05B2219/33029; G05B2219/33033; G05B2219/33035; G05B2219/33039; G05B2219/33041; G05B2219/33044; G05B2219/34066; G05B2219/39284; G05B2219/39286; G05B2219/39292; G05B2219/39385; G05B 23/024%; G05B 23/0251; G05B 23/0254; G05B 23/0281; G05D 1/0088; G06F 11/1476; G06F 11/2257; G06F 11/2263; G06F 16/243; G06F 16/3329; G06F 16/583; G06F 16/5838; G06F 16/5846; G06F 16/5854; G06F 16/5862; G06F 16/683; G06F 16/685; G06F 16/783%; G06F 16/7834; G06F 16/784%; G06F 16/785%; G06F 16/786; G06F 16/7864; G06F2207/4824; G06K 7/1482; G06K 9/6269; G06K 9/6277; G06K 9/6278; G06K 9/6285; G06N 20%; G06N 3/004; G06N 3/006; G06N 3/008; G06N 3/02; G06N 3/04%; G06N 3/06%; G06N 3/08%; G06N 3/10%; G06T2207/20081; G06T2207/20084; G06T 3/4046; G06T 9/002; G08B 29/186; G10H2250/151; G10H2250/311; G10K2210/3024; G10K2210/3038; G10L 15/16; G10L 15/18%; G10L 15/1%; G10L 17/18; G10L 25/30; G10L 25/33; G11B 20/10518; G16B 40/20; G16B 40/30; G16C 20/70; H01J2237/30427; H01M 8/04992; H02H 1/0092; H02P 21/0014; H02P 23/0018; H03H2017/0208;

H03H2222/04; H04L2012/5686; H04L2025/03464; H04L2025/03554; H04L 25/0254; H04L 25/03165; H04L 41/16; H04L 45/08; H04N 21/466%; H04Q2213/054; H 04Q2213/13343; H04Q2213/343; H04R 25/507; Y10S 128/924; Y10S 128/925; ou, Y10S 706%.

CIB/CPC et mots-clés: (G01R 31/367; G06F%; G06F 16/245%; G06F 16/3334; G06F 16/3335; G06F 16/3337; G06F 16/35%; G06F 16/36%; G06F 16/374; G06F 16/435; G06F 16/436; G06F 16/437; G06F 17/16; G06F 17/2%; G06F 19%; G06K 9%; G06K 9/00973; G06K 9/46%; G06K 9/60%; G06N%; G06T%; G10L 15%; G10L 17%; G10L 21%; G10L 25%; G16B 40%; ou, G16H 50%); et (neural network; \*supervis\*.?learn\*; \*super-vised\*.?train\*; adaboost; adaptive learning; adap- tive.?boost\*; adversar\* network\*; ANN; artific\* intellig\*; auto.?encod\*; autonom\* comput\*; autono- mous learn- ing; back.?propagation\*; bayes\*.?network\*; Bayesian learning; Bayesian model; blind signal separa- tion; boosting algorithm; bootstrap aggregat\*; brown- boost; chat.?bot\*; classification algorithm; classification tree; cluster analysis; CNN; cognitiv\* comput\*; cognitive automation; cognitive modelling; collaborat\* filter\*; colli- sion avoidance; computation\* intellig\*; computer vision; conceptual clustering; connectionis[mt]; convnet[s]?; convolutional network; decision model\*; decision tree\*; deep forest; deep.?belief net\*; deep.?learning\*; dictionary learning; differential\*.?evol\* algorithm\*; dimensional\*.?reduc\*; emotion recognition; ensemble learn\*; evolution\* algorithm\*; evolution\* comput\*; expert system\*; extreme.?learning.?machine; factori[sz]ation machin\*; feature learning; fuzzy environment\*; fuzzy logic; fuzzy set; fuzzy system; fuzzy.?c; fuzzy.?logic\*; gaussian mixture model; gaussian process\*; genera- tive adversarial net\*; genetic program\*; genetic\* algo- rithm\*; gradient boosting; gradient model boosting; gradient tree boos\*; Hebbian learning; hidden markov model; hierarchical cluster\*; high.?dimensional\* data; high.?dimensional\* feature\*; high.?dimensio- nal\* input\*; high.?dimensional\* model\*; high.?dimen- sional\*; space\*; high.?dimensional\* system\*; hyper- plane; indepen- dent component analysis; inductive\* logic\* program\*; inference \*learn\*; inference \*train\*; Instance.?based learning; intelligent agent; intelligent classifier; intel- ligent geometric computing; intelli- gent infrastruc- ture; intelligent machines; intelligent software agent; K-means; K-nearest neighbo[u]?r; latent dirichlet allocation\*; latent semantic analys\*; latent.?variable\*; layered control system; learning{1,3} algorithm\*; learning.?automata\*; learning\*.model\*; linear regres- sion; link\* predict\*; logi\* regression; logic lear- ning machine; logitboost; long.?short.?term memory; LPboost; LSTM; machine intelligen\*; machine.?learn\*; madaboost; Markov\* decision process; memetic algo- rithm\*; meta learning; multi agent system\*; multi task learning; multi.?agent system\*; multi.?layer perceptron\*; multi\* label\* classif\*; multi\*.?objective\* algorithm\*; multi\*.?objective\* optim\*; multinomial nave Bayes; natural language understanding; natu- ral.?language\* generat\*; natural.?language\* process\*;

nearest neighbour algorithm; neural.?turing; predic- tive mode; probabilist{1,2}algorithm\*; probabilistic graphical model; random.?forest\*; random\* gradient\*; rank- boost; regression tree; reinforc\* learn\*; relational learning; rule.?based learning; self organising map; self.?learning\*; self.?organising map; self.?organising structure; similarity learning; simultaneous localisation mapping; single.?linkage clustering; sparse repre- sent\*; stacked.?general?ation; statistical relational learning; stochastic gradient descent; support.?vector machine\*; support.?vector regress\*; SVM; temporal difference learning; totalboost; training algorithm; transfer.?learn\*; trust region policy optimization; varia- tional inference; ou, xgboost).

## Systèmes autonomes

Symboles CIB/CPC: A61B 34/32; A63B2047/022; A63H 27/00; B25J 9/0003; B60C 25/185; B60K2370/175; B60L 2260/32; B60T2201/02%; B60W2030%; B 6 0 W 2040%; B 6 0 W 2050%; B 6 0 W 240 0%; B 6 0 W 2420%; B 6 0 W 2422%; B 6 0 W 2510%; B60 W 2520%; B60 W 2530%; B60 W 2540%; B 6 0 W 2552%; B 6 0 W 2554%; B 6 0 W 2555%; B60W2556%; B60W2710/00; B60W2720/00; B60W275%; B60W2900/00; B60W 30%; B60W 40%; B60W 50%; B60W60%; B61L 27%; B61L 27/04; B62D 15%; B62D 15/0255; B62D 15/026; B62D 15/0265; B62D 6%; B63B2035/007; B63G2008/002; B63G2008/004; B64C2201%; B64G 1/24%; B64G2001/247; E02F 3%; E02F 3/3645; E02F 3/434; E02F 3/437; E02F 3/439; E02F 5%; E02F 9%; E02F 9/2041; E21B 44%; G01C 21%; G01C 22%; G05D 1%; G05D 1/0061; G05D 1/0088; G05D 13%; G05D2201/0207; G05D2201/0212; G05D 3%; G06K 9/00624; G06K 9/0079%; G06K 9/0080%; G06K 9/0081%; G06K 9/0082%; ou, G08G%.

CIB/CPC et mots clés: (A63H 27/00; B62D 15%; B64G 1/24%; E02F 3%; E02F 5%; E02F 9%; G01C 21%; G01C 22%; G05D 1%; G05D 13%; G05D 3%; G06K 9/00624; G06K 9/0079%; G06K 9/0080%; G06K 9/0081%; G06K 9/0082%; ou, G08G%); et (self adapted cruise; self control; self guided; self guiding; self steering; UAV; ou, unmanned aerial vehicle).

## Mégadonnées

Symboles CIB/CPC: B60W2556/05; G06F%; G06F 16%; G06F 16/2465; G06F 16/283; G06F 17/3%; G06F2216/03; G06F 3%; G06F 30%; G06F 9/5072; G06Q%; ou, G16B 50%.

CIB/CPC et mots-clés: (G06F%; G06F 16%; G06F 3%; G06F 30%; G06Q%; ou, G16B 50%); et (Accumulo; Aster; big dat\*; Cassandra; crowd sourc\*; data fusion; data mine\*; data warehous\*; data mining\*; Datameer; DataStax; distributed database; distributed process\*; distributed quer\*; distributed server; elasticsearch;

enormous data\*; FICO Blaze; Hadoop; HANA; hp veritca; huge data\*; informatic\*; kafka; large data\*; MapReduce; Marklogic; massive data\*; massively parallel database; massively parallel process\*; massively parallel software; nosql; open dat\*; Platfora; Splunk; Vertica; ou, Yarn).

### Informatique en nuage

Mots-clés : \*as-a-service; Aneka; cloud app\*; cloud architectur\*; cloud based; cloud based computing; cloud comput\*; cloud data\*; cloud infrastructure; cloud networking; cloud process\*; cloud securit\*; cloud serv\*; cloud software; cloud solution\*; cloud storage; cloud system\*; cloud technolog\*; cluster comput\*; concurrent comput\*; data portability; distrubuted comput\*; grid comput\*; hybrid cloud[s] ?; Hyper-V; hypervisor\*; InterCloud; multi. ?core; multitenan\*; parallel comput\*; parallel process\*; parallel software; private cloud; public cloud; service[.]?orient\*; utility comput\*; utility orient\*; virtualization; VMware; ou, web service\*.

CIB/CPC et mots-clés : (G06F%) et (\*as-a-service; Aneka; cloud app\*; cloud architectur\*; cloud based; cloud based computing; cloud comput\*; cloud data\*; cloud infrastructure; cloud networking; cloud process\*; cloud securit\*; cloud serv\*; cloud software; cloud solution\*; cloud storage; cloud system\*; cloud technolog\*; cluster comput\*; concurrent comput\*; data portability; distrubuted comput\*; grid comput\*; hybrid cloud[s] ?; Hyper-V; hypervisor\*; InterCloud; multi. ?core; multitenan\*; parallel comput\*; parallel process\*; parallel software; private cloud; public cloud; service[.]?orient\*; utility comput\*; utility orient\*; virtualization; VMware; ou, web service\*).

### Internet des objets (IdO)

Symboles CIB/CPC : G16Y%; H04L 29/06%; H04L 29/08%; H04W 4/70; H04W 72/04%; H04W 72/06%; H04W 72/08%; H04W 72/10; H04W 84/18; H04W 84/20; ou, H04W 84/22.

CIB/CPC et mots-clés : (H04B 7/26%; H04L 12/28%; ou, H04W4%); et (ambient intelligence; connected\* device\*; device\* network\*; digital life; IIoT; industrial internet; internet of everything\*; internet of thing\*; IoT; M2M; machine-to-machine; network\* device\*; pervasive comput\*; smart device\*; smart dust; smart grid\*; smart home\*; smart meter\*; smart sensor\*; smarter planet; ubicomp; ubiquitous computing; virtual plant\*; ou, web of thing\*).

### Robotique

Symboles CIB/CPC : A47L2201/00; A61B2034/30%; A61B 34/30; A61B 34/30; A61B 34/37; A61F2002/4632;

A61F2002/704; A61H2201/1659; A61N 5/1083; A63H 11%; B01J2219/00691; B07C2501/0063; B25J 19/0029; B25J 19/0033; B25J 19/0037; B25J 19/0041; B25J 9/065; B29C2945/76317; B29C 66/863; B32B2038/1891; B60C 25/0587; B64G2004/005; B65F2230/14; B65H2555/31; B67D2007/0403; B67D2007/0405; B67D2007/0407; B67D2007/0409; B67D2007/041%; B67D2007/042%; B67D2007/043%; F16H2061/0071; G01S 13/881; G05B2219/39; G05B2219/40%; G05B2219/43119; G05B2219/45058; G05B2219/45059; G05B2219/45061; G05B2219/45062; G05B2219/45064; G05B2219/45065; G05B2219/45066; G05B2219/45068; G05B2219/45073; G05B2219/45074; G05B2219/45079; G05B2219/45081; G05B2219/45082; G05B2219/45083; G05B2219/45084; G05B2219/45085; G05B2219/45086; G05B2219/45087; G05B2219/45088; G05B2219/45089; G05B2219/45091; G05B2219/45092; G05D2201/0217; H01H2231/04; H04Q 1/147; Y10S 320/34; Y10S 700/90; ou, Y10S 901%.

CIB/CPC et mots-clés : (A63F 13/803; B23K 11/314; B23K 26/0884; B29C 70/38; B62D 57%; ou, H01L 21%); et (cobot; mechatronic\*; robot; ou, robotics).

### Technologies à faible émission de carbone

La cartographie des technologies à faible émission de carbone s'appuie sur les stratégies des sous-catégories énumérées ci-après.

### Gestion environnementale

Symboles CIB/CPC : A23K 1/06; A23K 1/07; A23K 1/08; A23K 1/09; A23K 1/10; A43B 1/12; A43B 21/14; A61L 11; B01D 46; B01D 47; B01D 49; B01D 50; B01D 51; B01D 53/34; B01D 53/35; B01D 53/36; B01D 53/37; B01D 53/38; B01D 53/39; B01D 53/40; B01D 53/41; B01D 53/42; B01D 53/43; B01D 53/44; B01D 53/45; B01D 53/46; B01D 53/47; B01D 53/48; B01D 53/49; B01D 53/50; B01D 53/51; B01D 53/52; B01D 53/53; B01D 53/54; B01D 53/55; B01D 53/56; B01D 53/57; B01D 53/58; B01D 53/59; B01D 53/60; B01D 53/61; B01D 53/62; B01D 53/63; B01D 53/64; B01D 53/65; B01D 53/66; B01D 53/67; B01D 53/68; B01D 53/69; B01D 53/70; B01D 53/71; B01D 53/72; B01D 53/92; B01D 53/94; B01D 53/96; B01J 23/38; B01J 23/39; B01J 23/40; B01J 23/41; B01J 23/42; B01J 23/43; B01J 23/44; B01J 23/45; B01J 23/46; B03B 9/06; B03C 3; B09B; B09C; B22F 8; B29B 7/66; B29B 17; B30B 9/32; B62D 67; B63B 35/32; B63J 4; B65D 65/46; B65F; B65H 73; C02F; C03B 1/02; C03C 6/02; C03C 6/08; C04B 7/24; C04B 7/25; C04B 7/26; C04B 7/27; C04B 7/28; C04B 7/29; C04B 7/30; C04B 11/26; C04B 18/04; C04B 18/05; C04B 18/06; C04B 18/07; C04B 18/08; C04B 18/09; C04B 18/10; C04B 33/13\*; C05F 1; C05F 5; C05F 7; C05F 9; C05F 17; C08J 11; C09K 3/32; C09K 11/01; C10G 1/10; C10L 5/46; C10L 5/47; C10L 5/48; C10L 10/02; C10L 10/06; C10M 175; C21B 7/22; C21C 5/38; C22B 7; C22B 19/28; C22B 19/29; C22B

19/30; C22B 25/06; D01G 11/; D21B 1/08; D21B 1/09; D21B 1/10; D21B 1/32; D21C 5/02; D21H 17/01; E01H 15/; E02B 15/04; E02B 15/05; E02B 15/06; E02B 15/07; E02B 15/08; E02B 15/09; E02B 15/10; E03C 1/12; E03F; F01M 13/02; F01M 13/03; F01M 13/04; F01N 3/; F01N 5/; F01N 7/; F01N 9/; F01N 11/; F01N 13/; F02B 47/06; F02B 47/08; F02B 47/09; F02B 47/10; F02D 21/06; F02D 21/07; F02D 21/08; F02D 21/09; F02D 21/10; F02D 41/; F02D 43/; F02D 45/; F02M 3/02; F02M 3/03; F02M 3/04; F02M 3/05; F02M 23/; F02M 25/; F02M 25/07; F02M 27/; F02M 31/02; F02M 31/03; F02M 31/04; F02M 31/05; F02M 31/06; F02M 31/07; F02M 31/08; F02M 31/09; F02M 31/10; F02M 31/11; F02M 31/12; F02M 31/13; F02M 31/14; F02M 31/15; F02M 31/16; F02M 31/17; F02M 31/18; F02P 5/; F23B 80/; F23C 9/; F23C 10/; F23G 5/; F23G 7/; F23G 7/06; F23J 15/; F27B 1/18; G01M 15/10; G08B 21/12; G08B 21/13; G08B 21/14; H01B 15/00; H01J 9/52; H01M 6/52; ou, H01M 10/54.

### Technologies d'adaptation en rapport avec la gestion de l'eau

Symboles CIB/CPC: A01G 25/02; A01G 25/06; A01G 25/16; A47K 11/02; A47K 11/12; C12N 15/82\*; E03B 1/04; E03B 3/00; E03B 3/02; E03B 3/03; E03B 3/06; E03B 3/07; E03B 3/08; E03B 3/09; E03B 3/10; E03B 3/11; E03B 3/12; E03B 3/13; E03B 3/14; E03B 3/15; E03B 3/16; E03B 3/17; E03B 3/18; E03B 3/19; E03B 3/20; E03B 3/21; E03B 3/22; E03B 3/23; E03B 3/24; E03B 3/25; E03B 3/26; E03B 3/40; E03B 5/; E03B 9/; E03B 11/; E03C 1/08; E03D 1/14; E03D 3/12; E03D 5/01; E03D 13/00; F01D 11/; F01K 23/08; F01K 23/09; F01K 23/10; F16K 21/06; F16K 21/07; F16K 21/08; F16K 21/09; F16K 21/10; F16K 21/11; F16K 21/12; F16K 21/16; F16K 21/17; F16K 21/18; F16K 21/19; F16K 21/20; F16L 55/07; Y02B 40/46; ou, Y02B 40/56.

### Technologies d'atténuation du changement climatique en rapport avec la production, la transmission ou la distribution d'énergie

Symboles CIB/CPC: Y02E; Y02E 10/; Y02E 10/10; Y02E 10/11; Y02E 10/12; Y02E 10/13; Y02E 10/14; Y02E 10/15; Y02E 10/16; Y02E 10/17; Y02E 10/18; Y02E 10/20; Y02E 10/21; Y02E 10/22; Y02E 10/23; Y02E 10/24; Y02E 10/25; Y02E 10/26; Y02E 10/27; Y02E 10/28; Y02E 10/30; Y02E 10/31; Y02E 10/32; Y02E 10/33; Y02E 10/34; Y02E 10/35; Y02E 10/36; Y02E 10/37; Y02E 10/38; Y02E 10/40; Y02E 10/41; Y02E 10/42; Y02E 10/43; Y02E 10/44; Y02E 10/45; Y02E 10/46; Y02E 10/47; Y02E 10/50; Y02E 10/51; Y02E 10/52; Y02E 10/53; Y02E 10/54; Y02E 10/55; Y02E 10/56; Y02E 10/57; Y02E 10/58; Y02E 10/60; Y02E 10/70; Y02E 10/71; Y02E 10/72; Y02E 10/73; Y02E 10/74; Y02E 10/75; Y02E 10/76; Y02E 20/; Y02E 20/10; Y02E 20/11; Y02E 20/12; Y02E 20/13; Y02E 20/14; Y02E 20/15; Y02E 20/16; Y02E 20/17; Y02E 20/18; Y02E 20/18\*; Y02E 20/30; Y02E 20/31; Y02E 20/32; Y02E 20/33; Y02E 20/34; Y02E

20/35; Y02E 20/36; Y02E 30/; Y02E 30/10; Y02E 30/11; Y02E 30/12; Y02E 30/13; Y02E 30/14; Y02E 30/15; Y02E 30/16; Y02E 30/17; Y02E 30/18; Y02E 30/30; Y02E 30/31; Y02E 30/32; Y02E 30/33; Y02E 30/34; Y02E 30/35; Y02E 30/36; Y02E 30/37; Y02E 30/38; Y02E 30/39; Y02E 30/40; Y02E 40/; Y02E 40/10; Y02E 40/11; Y02E 40/12; Y02E 40/13; Y02E 40/14; Y02E 40/15; Y02E 40/16; Y02E 40/17; Y02E 40/18; Y02E 40/20; Y02E 40/21; Y02E 40/22; Y02E 40/23; Y02E 40/24; Y02E 40/25; Y02E 40/26; Y02E 40/30; Y02E 40/31; Y02E 40/32; Y02E 40/33; Y02E 40/34; Y02E 40/40; Y02E 40/50; Y02E 40/60; Y02E 40/61; Y02E 40/62; Y02E 40/63; Y02E 40/64; Y02E 40/65; Y02E 40/66; Y02E 40/67; Y02E 40/68; Y02E 40/69; Y02E 40/70; Y02E 50/; Y02E 50/10; Y02E 50/11; Y02E 50/12; Y02E 50/13; Y02E 50/14; Y02E 50/15; Y02E 50/16; Y02E 50/17; Y02E 50/18; Y02E 50/30; Y02E 50/31; Y02E 50/32; Y02E 50/33; Y02E 50/34; Y02E 60/; Y02E 60/10; Y02E 60/11; Y02E 60/12; Y02E 60/13; Y02E 60/14; Y02E 60/15; Y02E 60/16; Y02E 60/17; Y02E 60/30; Y02E 60/31; Y02E 60/32; Y02E 60/33; Y02E 60/34; Y02E 60/35; Y02E 60/36; Y02E 60/50; Y02E 60/51; Y02E 60/52; Y02E 60/53; Y02E 60/54; Y02E 60/55; Y02E 60/56; Y02E 60/70; Y02E 60/71; Y02E 60/72; Y02E 60/73; Y02E 60/74; Y02E 60/75; Y02E 60/76; Y02E 60/77; Y02E 60/78; ou, Y02E 70/.

### Captage, stockage, séquestration ou élimination des gaz à effet de serre

Symboles CIB/CPC: Y02C; Y02C 10/; Y02C 10/00; Y02C 10/01; Y02C 10/02; Y02C 10/03; Y02C 10/04; Y02C 10/05; Y02C 10/06; Y02C 10/07; Y02C 10/08; Y02C 10/09; Y02C 10/10; Y02C 10/11; Y02C 10/12; Y02C 10/13; Y02C 10/14; Y02C 20/; Y02C 20/00; Y02C 20/01; Y02C 20/02; Y02C 20/03; Y02C 20/04; Y02C 20/05; Y02C 20/06; Y02C 20/07; Y02C 20/08; Y02C 20/09; Y02C 20/10; Y02C 20/11; Y02C 20/12; Y02C 20/13; Y02C 20/14; Y02C 20/15; Y02C 20/16; Y02C 20/17; Y02C 20/18; Y02C 20/19; Y02C 20/20; Y02C 20/21; Y02C 20/22; Y02C 20/23; Y02C 20/24; Y02C 20/25; Y02C 20/26; Y02C 20/27; Y02C 20/28; Y02C 20/29; ou, Y02C 20/30.

### Technologies d'atténuation du changement climatique en rapport avec les transports

Symboles CIB/CPC: Y02T; Y02T 10/; Y02T 10/10; Y02T 10/11; Y02T 10/12; Y02T 10/13; Y02T 10/14; Y02T 10/15; Y02T 10/16; Y02T 10/17; Y02T 10/18; Y02T 10/19; Y02T 10/20; Y02T 10/21; Y02T 10/22; Y02T 10/23; Y02T 10/24; Y02T 10/25; Y02T 10/26; Y02T 10/27; Y02T 10/28; Y02T 10/29; Y02T 10/30; Y02T 10/31; Y02T 10/32; Y02T 10/33; Y02T 10/34; Y02T 10/35; Y02T 10/36; Y02T 10/37; Y02T 10/38; Y02T 10/39; Y02T 10/40; Y02T 10/41; Y02T 10/42; Y02T 10/43; Y02T 10/44; Y02T 10/45; Y02T 10/46; Y02T 10/47; Y02T 10/48; Y02T 10/49; Y02T 10/50; Y02T 10/51; Y02T 10/52; Y02T 10/53; Y02T 10/54; Y02T 10/55; Y02T



Y02B 30/56; Y02B 30/57; Y02B 30/58; Y02B 30/59; Y02B 30/60; Y02B 30/61; Y02B 30/62; Y02B 30/63; Y02B 30/64; Y02B 30/65; Y02B 30/66; Y02B 30/67; Y02B 30/68; Y02B 30/69; Y02B 30/70; Y02B 30/71; Y02B 30/72; Y02B 30/73; Y02B 30/74; Y02B 30/75; Y02B 30/76; Y02B 30/77; Y02B 30/78; Y02B 30/79; Y02B 30/80; Y02B 30/81; Y02B 30/82; Y02B 30/83; Y02B 30/84; Y02B 30/85; Y02B 30/86; Y02B 30/87; Y02B 30/88; Y02B 30/89; Y02B 30/90; Y02B 30/91; Y02B 30/92; Y02B 30/93; Y02B 30/94; Y02B 40/; Y02B 40/00; Y02B 40/01; Y02B 40/02; Y02B 40/03; Y02B 40/04; Y02B 40/05; Y02B 40/06; Y02B 40/07; Y02B 40/08; Y02B 40/09; Y02B 40/10; Y02B 40/11; Y02B 40/12; Y02B 40/13; Y02B 40/14; Y02B 40/15; Y02B 40/16; Y02B 40/17; Y02B 40/18; Y02B 40/19; Y02B 40/20; Y02B 40/21; Y02B 40/22; Y02B 40/23; Y02B 40/24; Y02B 40/25; Y02B 40/26; Y02B 40/27; Y02B 40/28; Y02B 40/29; Y02B 40/30; Y02B 40/31; Y02B 40/32; Y02B 40/33; Y02B 40/34; Y02B 40/35; Y02B 40/36; Y02B 40/37; Y02B 40/38; Y02B 40/39; Y02B 40/40; Y02B 40/41; Y02B 40/42; Y02B 40/43; Y02B 40/44; Y02B 40/45; Y02B 40/47; Y02B 40/48; Y02B 40/49; Y02B 40/50; Y02B 40/51; Y02B 40/52; Y02B 40/53; Y02B 40/54; Y02B 40/55; Y02B 40/57; Y02B 40/58; Y02B 40/59; Y02B 40/60; Y02B 40/61; Y02B 40/62; Y02B 40/63; Y02B 40/64; Y02B 40/65; Y02B 40/66; Y02B 40/67; Y02B 40/68; Y02B 40/69; Y02B 40/70; Y02B 40/71; Y02B 40/72; Y02B 40/73; Y02B 40/74; Y02B 40/75; Y02B 40/76; Y02B 40/77; Y02B 40/78; Y02B 40/79; Y02B 40/80; Y02B 40/81; Y02B 40/82; Y02B 40/83; Y02B 40/84; Y02B 40/85; Y02B 40/86; Y02B 40/87; Y02B 40/88; Y02B 40/89; Y02B 40/90; Y02B 50/; Y02B 50/00; Y02B 50/01; Y02B 50/02; Y02B 50/03; Y02B 50/04; Y02B 50/05; Y02B 50/06; Y02B 50/07; Y02B 50/08; Y02B 50/09; Y02B 50/10; Y02B 50/11; Y02B 50/12; Y02B 50/13; Y02B 50/14; Y02B 50/15; Y02B 50/16; Y02B 50/17; Y02B 50/18; Y02B 50/19; Y02B 50/20; Y02B 50/21; Y02B 50/22; Y02B 50/23; Y02B 50/24; Y02B 60/; Y02B 60/00; Y02B 60/01; Y02B 60/02; Y02B 60/03; Y02B 60/04; Y02B 60/05; Y02B 60/06; Y02B 60/07; Y02B 60/08; Y02B 60/09; Y02B 60/10; Y02B 60/11; Y02B 60/12; Y02B 60/13; Y02B 60/14; Y02B 60/15; Y02B 60/16; Y02B 60/17; Y02B 60/18; Y02B 60/19; Y02B 60/20; Y02B 60/21; Y02B 60/22; Y02B 60/23; Y02B 60/24; Y02B 60/25; Y02B 60/26; Y02B 60/27; Y02B 60/28; Y02B 60/29; Y02B 60/30; Y02B 60/31; Y02B 60/32; Y02B 60/33; Y02B 60/34; Y02B 60/35; Y02B 60/36; Y02B 60/37; Y02B 60/38; Y02B 60/39; Y02B 60/40; Y02B 60/41; Y02B 60/42; Y02B 60/43; Y02B 60/44; Y02B 60/45; Y02B 60/46; Y02B 60/47; Y02B 60/48; Y02B 60/49; Y02B 60/50; Y02B 70/; Y02B 70/00; Y02B 70/01; Y02B 70/02; Y02B 70/03; Y02B 70/04; Y02B 70/05; Y02B 70/06; Y02B 70/07; Y02B 70/08; Y02B 70/09; Y02B 70/10; Y02B 70/11; Y02B 70/12; Y02B 70/13; Y02B 70/14; Y02B 70/15; Y02B 70/16; Y02B 70/17; Y02B 70/18; Y02B 70/19; Y02B 70/20; Y02B 70/21; Y02B 70/22; Y02B 70/23; Y02B 70/24; Y02B 70/25; Y02B 70/26; Y02B 70/27; Y02B 70/28; Y02B 70/29; Y02B 70/30; Y02B 70/31; Y02B 70/32; Y02B 70/33;

Y02B 70/34; Y02B 80/; Y02B 80/00; Y02B 80/01; Y02B 80/02; Y02B 80/03; Y02B 80/04; Y02B 80/05; Y02B 80/06; Y02B 80/07; Y02B 80/08; Y02B 80/09; Y02B 80/10; Y02B 80/11; Y02B 80/12; Y02B 80/13; Y02B 80/14; Y02B 80/15; Y02B 80/16; Y02B 80/17; Y02B 80/18; Y02B 80/19; Y02B 80/20; Y02B 80/21; Y02B 80/22; Y02B 80/23; Y02B 80/24; Y02B 80/25; Y02B 80/26; Y02B 80/27; Y02B 80/28; Y02B 80/29; Y02B 80/30; Y02B 80/31; Y02B 80/32; Y02B 80/33; Y02B 80/34; Y02B 80/35; Y02B 80/36; Y02B 80/37; Y02B 80/38; Y02B 80/39; Y02B 80/40; Y02B 80/41; Y02B 80/42; Y02B 80/43; Y02B 80/44; Y02B 80/45; Y02B 80/46; Y02B 80/47; Y02B 80/48; Y02B 80/49; Y02B 80/50; Y02B 90/; Y02B 90/00; Y02B 90/01; Y02B 90/02; Y02B 90/03; Y02B 90/04; Y02B 90/05; Y02B 90/06; Y02B 90/07; Y02B 90/08; Y02B 90/09; Y02B 90/10; Y02B 90/11; Y02B 90/12; Y02B 90/13; Y02B 90/14; Y02B 90/15; Y02B 90/16; Y02B 90/17; Y02B 90/18; Y02B 90/19; Y02B 90/20; Y02B 90/21; Y02B 90/22; Y02B 90/23; Y02B 90/24; Y02B 90/25; ou, Y02B 90/26.

## Industrie automobile

### Brevets verts

B60L 11; B60L 3; B60L 15; B60K 1; B60W 10/08; B60W 10/24; B60W 10/26; B60K 6; B60W 20; B60L 7/01; B60L 7/20; B60W 10/28; B60L 11/18; H01M 8

### Brevets gris

F02M 3/02-05; F02M 23; F02M 25; F02D 41; F02B 47/06; F02M 39-71

### Brevets sales

F02B; F02M; F02D; F02F; F02N; F02P.

## Abréviations et sigles

AGC	Apollo guidance computer (ordinateur embarqué dans les missions Apollo)	JPL	laboratoire de recherche sur la propulsion
AIE	Agence internationale de l'énergie	MIT	Massachusetts Institute of Technology
AMC	garantie de marché	NASA	National Aeronautics and Space Administration (Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace)
ARN messenger	acide ribonucléique messenger	NRC	National Research Council (Conseil national de la recherche)
AV	véhicule autonome	NRRL	Northern Regional Research Laboratory
CalTech	California Institute of Technology	NSF	Fondation nationale pour la science
CCD	dispositif à couplage de charge	OACI	Organisation internationale de l'aviation civile
CEPI	Coalition for Epidemic Preparedness Innovation (alliance pour l'innovation en matière de préparation aux épidémies)	OBM	fabricant de la marque originale
CFRP	fibre de carbone et plastiques renforcés à la fibre de carbone	OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
CMR	Comité de la recherche médicale	ODM	fabricant du dessin ou modèle original
COVID	maladie à coronavirus également appelée COVID-19	OEM	fabricant de l'équipement original
CO <sub>2</sub>	dioxyde de carbone	ONG	organisation non gouvernementale
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency (agence des projets de recherche avancée) du Ministère de la défense des États-Unis d'Amérique	ORSD	Bureau de la recherche scientifique et du développement
DoD	ministère de la défense des États-Unis d'Amérique	OWS	Operation Warp Speed (opération "vitesse de l'éclair", rebaptisée Countermeasures Acceleration Group en 2021)
DoE	ministère de l'énergie	PI	propriété intellectuelle
DPI	droits de propriété intellectuelle	PIB	produit intérieur brut
D-RAM	mémoire vive dynamique	PME	petites et moyennes entreprises
ESA	Agence spatiale européenne	PNT	données de position, de navigation et d'heure
ESG	environnemental, social et de gouvernance	PV	photovoltaïque
É.-U.	États-Unis d'Amérique	R-D	recherche-développement
EV	véhicule électrique	RPS	générateurs à radio-isotopes
FDA	Food and Drug Administration des États-Unis d'Amérique	SARS-CoV-2	Coronavirus 2 du syndrome respiratoire aigu sévère
FRAND	équitable, raisonnable et non discriminatoire	SMS	services de messages courts
IA	intelligence artificielle	TI	technologie de l'information
IdO	Internet des objets	TIC	technologies de l'information et de la communication
INS	instituts nationaux de santé	UE	Union européenne
IRP	instituts de recherche publics	UK	Royaume-Uni
IRENA	Agence internationale pour les énergies renouvelables		

UNFCCC	Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique
USPTO	Office des brevets et des marques des États-Unis d'Amérique
VTF	Vaccine Task Force (groupe de travail sur les vaccins)
WPB	War Production Board (Bureau de la production de guerre)



Organisation Mondiale  
de la Propriété Intellectuelle  
34, chemin des Colombettes  
Case postale 18  
CH-1211 Genève 20  
Suisse

Tél.: + 41 22 338 91 11  
Tlcp.: + 41 22 733 54 28

Les coordonnées des bureaux extérieurs  
de l'OMPI sont disponibles à l'adresse:  
[www.wipo.int/about-wipo/fr/offices](http://www.wipo.int/about-wipo/fr/offices)

Publication de l'OMPI n° 944F/22  
ISBN: 978-92-805-3385-9 (version imprimée)  
ISBN: 978-92-805-3386-6 (version en ligne)  
ISSN: 2790-9883 (version imprimée)  
ISSN: 2790-9891 (version en ligne)