



Observatoire
de la sécurité des flux
et des matières énergétiques

RAPPORT #4 – Juin 2020

LA COMPÉTITION POUR LES TECHNOLOGIES BAS-CARBONE : VERS UNE NOUVELLE GÉOPOLITIQUE DE L'ÉNERGIE ?



Clément Bonnet
Philippe Copinschi



| | |
|---|-----------|
| LES TECHNOLOGIES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE | 4 |
| Introduction | 4 |
| <i>La lutte contre le réchauffement climatique et l'Accord de Paris.....</i> | <i>4</i> |
| <i>Situation actuelle - Les données du problème</i> | <i>5</i> |
| Les scénarios de transition énergétique | 7 |
| <i>Définir la transition énergétique.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Les scénarios de décarbonation.....</i> | <i>7</i> |
| <i>Éléments clés de la transition énergétique.....</i> | <i>9</i> |
| Les technologies pour la production d'électricité..... | 10 |
| <i>Éolien.....</i> | <i>12</i> |
| <i>Solaire</i> | <i>12</i> |
| <i>Autres sources d'énergies renouvelables (hydroélectricité, géothermie, énergies marines)</i> | <i>16</i> |
| <i>Nucléaire.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Solutions de stockage de l'électricité.....</i> | <i>17</i> |
| les technologies pour l'Industrie..... | 17 |
| <i>Les technologies CCUS</i> | <i>18</i> |
| Les technologies pour le Transport..... | 19 |
| <i>Transport routier.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Aviation.....</i> | <i>21</i> |
| <i>Transport maritime.....</i> | <i>21</i> |
| ÉVALUATION EMPIRIQUE | 23 |
| La dimension stratégique de la propriété industrielle..... | 23 |
| <i>Les systèmes de propriété industrielle</i> | <i>23</i> |
| <i>Stratégies privées et stratégies publiques</i> | <i>25</i> |
| <i>Stratégies privées</i> | <i>25</i> |
| <i>Stratégies publiques</i> | <i>26</i> |
| <i>Les statistiques de brevets comme instruments de mesure</i> | <i>27</i> |
| <i>Le compte des familles de brevet : un proxy du nombre d'inventions</i> | <i>27</i> |
| <i>Les demandes dans le cadre du Traité de coopération en matière de Brevets (PCT).....</i> | <i>27</i> |
| Les dynamiques d'innovation dans les filières des technologies bas-carbone..... | 28 |
| <i>Classification des technologies bas-carbone</i> | <i>28</i> |
| <i>L'innovation bas-carbone dans le secteur de l'énergie.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Les énergies renouvelables</i> | <i>29</i> |
| <i>Les techniques de stockage</i> | <i>31</i> |
| <i>Les techniques complémentaires.....</i> | <i>32</i> |
| <i>L'innovation bas-carbone dans le secteur des transports.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Le transport routier</i> | <i>35</i> |
| Les spécialisations technologiques relatives des principaux pays innovateurs..... | 38 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Le déclin de l'innovation bas-carbone</i> | 39 |
| <i>Les grands pays innovateurs : Allemagne, Japon et États-Unis</i> | 40 |
| <i>Les avantages techniques relatifs de la France et du Royaume-Uni</i> | 43 |
| <i>La Chine et la Corée du Sud</i> | 45 |
| <i>Brésil, Inde et Russie : la priorité donnée à l'énergie</i> | 50 |
| FOCUS 1 : Les interactions entre les États-Unis, l'Europe et la Chine dans la filière éolienne | 51 |
| FOCUS 2 : La filière chinoise du solaire PV..... | 52 |
| LES SYSTÈMES NATIONAUX D'INNOVATION | 55 |
| Comparaison internationale | 55 |
| Le système d'innovation des États-Unis | 58 |
| <i>Les grandes caractéristiques du système américain</i> | 58 |
| <i>Le secteur de l'énergie dans le système américain</i> | 58 |
| Le système d'innovation de la Russie | 59 |
| <i>La difficile modernisation de l'industrie russe</i> | 59 |
| <i>Forces et faiblesses du système national d'innovation russe</i> | 60 |
| Le système d'innovation de la Chine..... | 60 |
| <i>La réforme du système d'innovation de la Chine</i> | 60 |
| <i>Le système de brevets chinois</i> | 61 |
| FOCUS 3 : L'Office de brevet américain | 62 |
| FOCUS 4 : Ressources minérales et stratégies « Made in China 2025 »..... | 63 |
| Annexes | 65 |
| Annexe 1 - FOCUS..... | 65 |
| <i>FOCUS : Les batteries li-ion</i> | 65 |
| <i>FOCUS : L'hydrogène</i> | 66 |
| Annexe 1 – Tableau et schéma | 67 |

LES TECHNOLOGIES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

INTRODUCTION

La lutte contre le réchauffement climatique et l'Accord de Paris

L'accès à l'énergie est, depuis longtemps, l'un des piliers de la puissance des nations. Le charbon fut ainsi à la base de la révolution industrielle du XIX^e siècle, avant que le pétrole ne devienne l'énergie stratégique de référence au cours du XX^e siècle, grâce à ses avantages indéniables (facilité de production, de stockage et de transport, très haute densité énergétique, etc.).

Si ce n'était en raison de l'urgence climatique, l'ère des combustibles fossiles se poursuivrait certainement encore plusieurs décennies, d'autant que de multiples avancées technologiques ont permis de continuellement augmenter à la fois la production et les réserves mondiales de pétrole et de gaz naturel (fracturation hydraulique, forage en haute mer, forage horizontal, etc.). Le monde est pourtant aujourd'hui à un tournant car l'ère pétrolière touche à sa fin, non pas à cause d'une pénurie de ressources fossiles, mais en raison des rejets de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère lors de leur combustion¹.

4

La concentration atmosphérique de CO₂ est ainsi passée de 280 parties par million (ppm) avant l'ère industrielle à environ 415 ppm à mi-2019, principalement à cause de l'utilisation de combustibles fossiles mais aussi du fait de la déforestation et d'autres activités économiques (élevage intensif). La planète est maintenant environ 1,2°C plus chaud qu'au 19^e siècle, avec comme conséquence de perturber les sociétés, les économies et les écosystèmes (élévation du niveau de la mer, déplacements massifs de populations, sécheresses, inondations, maladies infectieuses émergentes, d'incendies massifs, etc.).

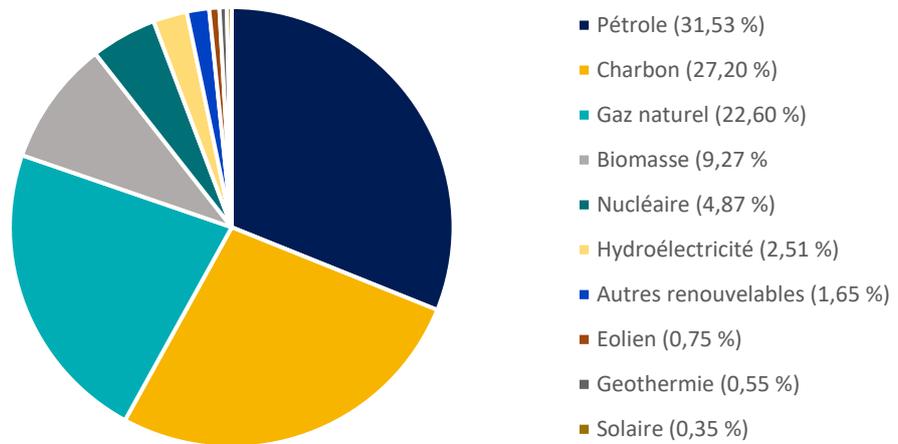
Pour toutes ces raisons, les États membres de l'ONU ont adopté l'Accord de Paris sur le climat en décembre 2015, visant à maintenir le réchauffement à « bien en dessous de 2 °C » et, si possible, à limiter le réchauffement à 1,5 °C ou moins d'ici à 2100. Cet objectif imposerait de réduire au minimum de 70% les émissions globales de GES d'ici 2050. Dans ce cadre, chaque pays a proposé une « contribution déterminée au niveau national » (NDC pour Nationally Determined Contributions) détaillant ses objectifs en matière de réduction de ses émissions de GES, en particulier via des politiques de transition énergétique qui visent à éliminer l'utilisation des énergies fossiles, notamment dans la production d'électricité et dans le transport.

¹ Les émissions de CO₂ représentent les trois quarts des émissions de gaz à effet de serre. Les deux tiers du reste sont du méthane (du fait de son potentiel de réchauffement global 34 fois plus élevé que celui du CO₂ à cent ans, même s'il persiste moins de dix ans dans l'atmosphère). Le reliquat se compose principalement de protoxyde d'azote (N₂O), d'ozone (O₃) et des gaz fluorés.

Situation actuelle - Les données du problème

Graphique 1 : Production mondiale d'énergie primaire, par source en 2018

Source : Enerdata

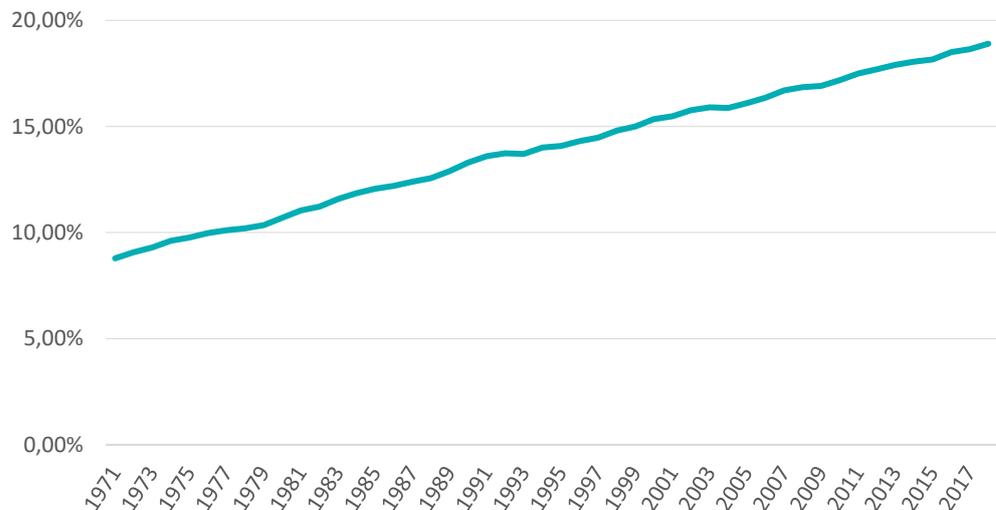


Même si d'importantes disparités existent d'un pays à l'autre (ainsi la Chine utilise massivement du charbon, la Russie du gaz naturel, la France du nucléaire, etc.), **le mix énergétique mondial reste encore largement dominé par les énergies fossiles** (charbon, pétrole et gaz), qui représentent 80 % de l'énergie primaire dans le monde. Ce taux est relativement constant depuis plusieurs décennies.

5

Graphique 2 : Part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie dans le monde, 1971-2018

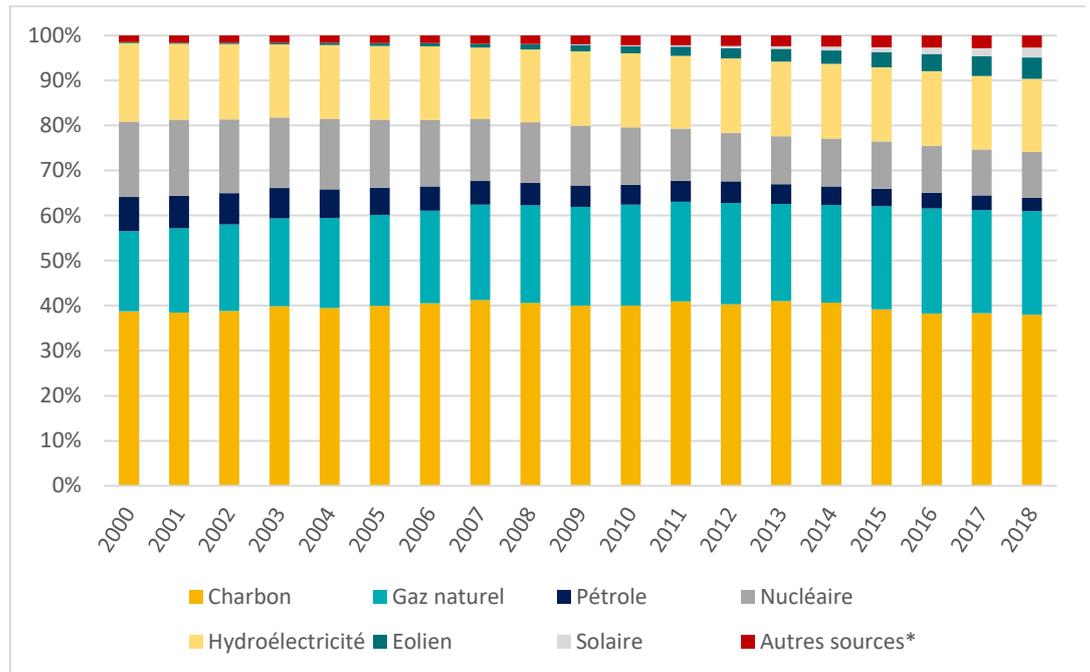
Source : Enerdata



Alors que les besoins en énergie de l'humanité ont doublé depuis les années 1970, la consommation d'électricité a pour sa part quadruplé. Le monde a ainsi de plus en plus besoin d'énergie, et en particulier d'**électricité**, qui semble devenir le **vecteur énergétique essentiel des sociétés modernes**.

Graphique 3 : Part des différentes sources d'énergie dans la production mondiale d'électricité, 2000-2018

Source : Enerdata

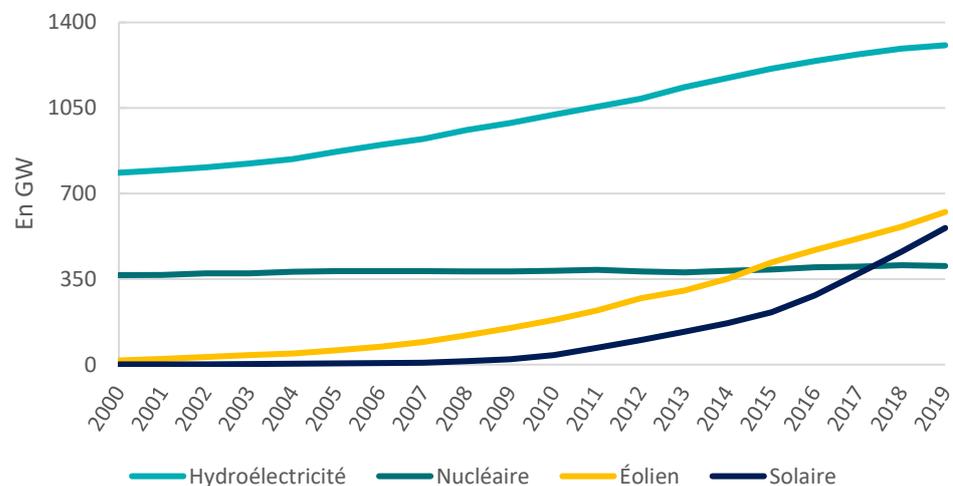


Si les énergies fossiles assurent encore une part importante de la production d'électricité, la part relative du charbon est en baisse et celle du gaz naturel en hausse, tandis que celle du nucléaire stagne et celle des nouvelles énergies renouvelables (éolien, solaire, etc.), bien qu'encore marginale, croît fortement. **La production d'énergie renouvelable croît désormais plus rapidement que la demande globale d'électricité.**

6

Graphique 4 : Capacités de production mondiale d'électricité éolienne, solaire, nucléaire et hydroélectrique, 2000-2019.

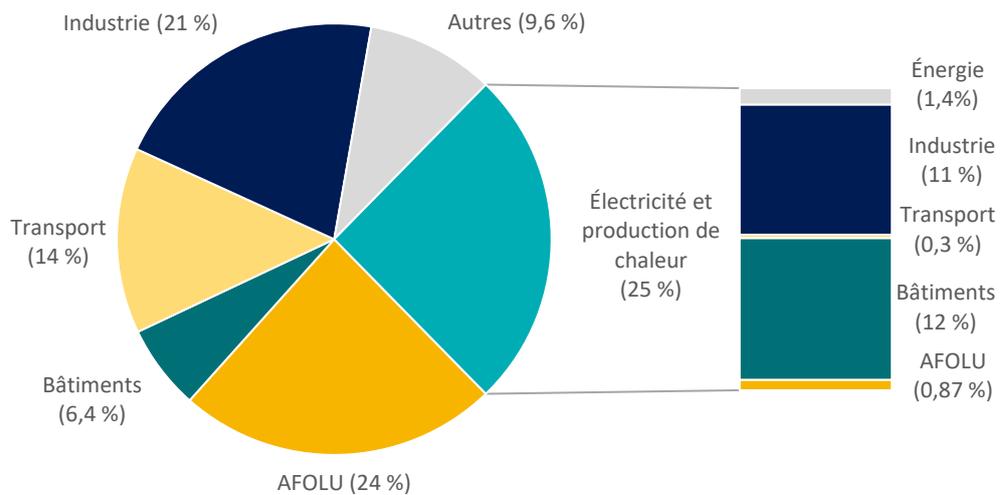
Source : Enerdata



Même si la source renouvelable prédominante est actuellement l'hydroélectricité, **la croissance des capacités éoliennes et solaires a été considérable depuis une vingtaine d'années.** En 2019, il y a ainsi eu plus de capacités de production solaires et éoliennes nouvellement installées que de nouvelles capacités à base d'énergie fossile.

Graphique 5 : Émissions de GES par secteur, 2010

Source : GIEC 2010



Les transports produisent environ 15% des émissions totales de CO₂ (réparties entre le transport routier (74%), aérien (12%), maritime (12%) et ferroviaire (2%)) car ils reposent encore quasi exclusivement sur les produits pétroliers, en particulier le transport aérien et maritime. Pour autant, **un large consensus semble se dessiner sur le fait que l'ère du monopole du pétrole dans le secteur du transport touche à sa fin** (en particulier à cause des préoccupations liées au changement climatique), d'autant que de multiples alternatives technologiques existent et ont atteint leur maturité permettant leur déploiement à grande échelle (électrification du parc automobile, biocarburants, hydrogène, gaz naturel liquéfié (GNL)).

7

LES SCÉNARIOS DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Définir la transition énergétique

Les engagements actuels des pays en matière d'énergie et de climat (à travers notamment leurs contributions nationales) devraient mener à une augmentation de la température moyenne de la planète d'environ 3 °C d'ici 2100, soit largement au-delà de l'objectif officiel de 1,5 °C à 2 °C fixé dans le cadre de l'Accord de Paris. Pour autant, ils représentent un changement significatif par rapport à la trajectoire historique actuelle. Pour les pays développés en particulier, l'ambition affichée est de **parvenir à la neutralité carbone de l'économie à l'horizon 2050**, à travers des stratégies touchant à tous les secteurs émetteurs : la production d'électricité, l'industrie, le transport, l'habitat, l'agriculture et l'utilisation des terres, etc. Certains sous-secteurs (en particulier dans l'industrie et le transport, comme la production de ciment et le transport aérien) sont considérés comme particulièrement difficiles à décarboner. À noter que la neutralité carbone peut être obtenue malgré la permanence d'émissions résiduelles de CO₂ grâce à des systèmes de compensation comme le reboisement, la capture et le stockage du CO₂, etc.

Les scénarios de décarbonation

De nombreux organismes, privés et publics, ont élaboré des scénarios de transition énergétique courant généralement jusqu'au milieu du siècle, dont le principal défi réside dans la nécessité de limiter autant que possible la croissance attendue de la demande globale d'énergie sans compromettre les chances des économies en développement de subvenir à leurs besoins en la

matière, sachant que près d'un milliard de personnes dans le monde n'a toujours pas accès à l'électricité².

Plusieurs organisations développent des scénarios, parmi lesquelles on peut citer :

- l'Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA, Global Renewables Outlook 2020: Energy transformation 2050) ;
- l'Agence internationale de l'énergie (AIE, World Energy Outlook 2019) ;
- le Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization (GEIDCO) ;
- la Lappeenranta University of Technology Research-Energy Watch Group (LUT-EWG) ;
- Shell (scénario «Sky», 2018) ;
- Greenpeace (scénario «Advanced», 2015) ;
- Equinor (scénario de «Renewal», 2019) ;
- l'Institute for Sustainable Futures at the University of Technology Sydney (UTS-ISF, Achieving the Paris Climate Agreement Goals, 2019) ;
- le GIEC (scénarios «Below 1.5°C» et «1.5°C High», 2018) ;
- Enerdata (EnerFuture) ;
- DNV-GL (Energy Transition Outlook 2019. A Global and Regional Forecast to 2050) ;
- McKinsey (New Global Energy Perspectives 2019).

8

À l'exception des deux derniers, tous les scénarios les plus ambitieux développés par ces organismes sont compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris, les plus aboutis étant ceux parvenant à échauffer un cadre suffisamment spécifique pour être politiquement et technologiquement crédible tout en restant assez flexible pour prévoir d'y incorporer les futurs progrès technologiques.

Tous ces scénarios examinés, même lorsqu'ils cherchent à être en cohérence avec les objectifs de l'Accord de Paris, montrent **des visions différentes de l'avenir, reflétant la complexité et les incertitudes de la transition énergétique**. Chacun propose ses propres approches et hypothèses concernant en particulier les futurs besoins en électricité (étant donné les hypothèses sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, la réduction de la consommation, le degré d'électrification) et la part des renouvelables. À titre d'exemple, parmi des scénarios en phase avec l'Accord de Paris, la part de l'électricité dans la consommation finale d'énergie en 2050 varie sensiblement, de 31% pour l'AIE et 38% Enerdata (scénario Energreen) à 49% pour l'IRENA et même 52% pour Greenpeace.

Tous indiquent cependant clairement que **la décarbonation de l'économie d'ici 2050 est techniquement possible**, en privilégiant des sources d'énergie zéro carbone (éolienne, solaire, géothermique, hydroélectrique, océanique, biomasse, nucléaire ou fossile avec capture et stockage du carbone), tant dans le secteur de l'énergie que dans ceux des transports, des bâtiments et de l'industrie. Pour de nombreux experts, la décarbonation est à portée de main, car un bon nombre de ces technologies (solaire photovoltaïque, éolien, y compris offshore) sont déjà compétitives et pourraient voir leurs coûts baisser encore à l'avenir. D'autres technologies (comme le stockage d'électricité et la capture du carbone) nécessitent en revanche encore de

² AIE, *World Energy Outlook*, 2019

futur(e)s développements et/ou économies d'échelle accrues pour entraîner leur déploiement à des niveaux suffisants pour parvenir à une décarbonation complète de l'économie³.

Les progrès les plus substantiels ont souvent été réalisés lorsque des politiques publiques appropriées de soutien ont été définies afin de fournir des signaux clairs aux acteurs économiques. C'est le cas par exemple pour les véhicules électriques (VE), le solaire photovoltaïque (PV) et l'éolien terrestre. En revanche, de nombreux domaines technologiques souffrent d'un manque de soutien politique, ce qui entrave leur déploiement à plus grande échelle. L'efficacité énergétique, les bioénergies et les technologies de capture, utilisation et stockage du carbone (CCUS) sont des exemples notables où un potentiel de progrès technologique important subsiste mais pour lesquels **des signaux politiques forts seront nécessaires de la part des pouvoirs publics pour déclencher les investissements appropriés**⁴.

Éléments clés de la transition énergétique

La transition énergétique vise avant tout à décarboner la production d'énergie (en particulier d'électricité) et le transport, mais doit également prendre en compte les autres secteurs émetteurs de GES, en particulier l'industrie et l'habitat. Avec des équilibres et des priorités variables, tous les scénarios proposent néanmoins un schéma relativement proche, reposant sur 6 piliers principaux (dont l'importance varie cependant considérablement selon les scénarios).

9

- **L'importance des économies d'énergie.** Tous les scénarios compatibles avec les objectifs de l'Accord de Paris insistent sur la nécessité de réduire (parfois substantiellement) la consommation d'énergie, tout en élargissant son accès. Il s'agit notamment de mieux isoler les bâtiments pour réduire les besoins de chauffage et de climatisation et d'améliorer l'efficacité énergétique de l'éclairage. Les stratégies proposées dans cette perspective reposent en grande partie sur des politiques publiques *ad hoc* (réduire le besoin de transport individuel via une meilleure planification urbaine et le développement de l'offre de transports publics ; imposer des normes de construction plus contraignantes) et sur des technologies (matériaux de construction, etc.) qui ne sont pas directement liées à l'énergie. Dans certains scénarios, la décarbonation de l'économie repose à près d'un tiers sur des économies d'énergie (27% pour l'IRENA, 37% pour l'AIE).
- **L'électrification des usages.** Il s'agit de permettre d'utiliser l'électricité pour de nombreux usages où dominant actuellement les énergies fossiles, en particulier dans le transport (VE) et dans certains secteurs industriels nécessitant une grande production de chaleur (sidérurgie, etc.). Les technologies existent et sont disponibles pour parvenir à cette transition dans la plupart des secteurs mais coûtent cher.
- **Le développement de vecteurs alternatifs** comme l'hydrogène, les biocarburants et les carburants de synthèse pour les domaines où l'électrification est difficile comme le transport aérien et maritime.

³ The Energy Transition Commission (ETC), *Mission Possible. Reaching Net-Zero Carbon Emissions From Harder-to-Abate Sectors by Mid-Century*, Novembre 2018

⁴ AIE, *Energy Technology Perspectives 2017. Catalysing Energy Technology Transformations*, 2017, p.49

- **Une production d'électricité décarbonée.** Il s'agit de substituer les énergies fossiles (en particulier le charbon) par des énergies non carbonées, renouvelables et éventuellement nucléaire pour la génération d'électricité. La plupart des scénarios suggèrent que des progrès rapides vers une électricité zéro carbone sont possibles sur la base de ressources énergétiques renouvelables, étant donné la technologie disponible et l'évolution prévisible des coûts. Bien que les différents scénarios utilisent des hypothèses et un calendrier quelque peu différents, tous indiquent un mouvement dans la même direction, qui suggère la faisabilité d'une décarbonation mondiale dans les décennies à venir essentiellement fondée sur le déploiement de l'éolien et du solaire photovoltaïque. Les hypothèses varient en revanche parfois très fortement quant à la place du nucléaire, certains scénarios envisageant son expansion, d'autres son déclin.
- **Le développement de moyens de stockage électrique et de réseaux de distribution électrique intelligents.** Il s'agit notamment de batteries et de technologies de gestion des réseaux (smart grids) comme l'intelligence artificielle et l'internet des objets, permettant de prendre en compte le besoin de flexibilité.
- **Le développement des technologies de captage, utilisation et stockage du CO₂ (CCUS).** Cette solution, généralement critiquée par les militants écologistes, permettrait de parvenir à la neutralité carbone tout en continuant à utiliser des énergies carbonées (en particulier le gaz naturel) à petite échelle, en particulier dans l'industrie mais également dans la production d'électricité.

10

D'autres aspects-clés de la décarbonation comme l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et des processus industriels, ainsi que de l'usage des terres ne concernent pas, à proprement parler, le secteur de l'énergie, et ne seront que brièvement mentionnés dans le cadre de ce rapport⁵.

Une certitude émerge : la **dépendance envers les énergies fossiles est appelée à diminuer drastiquement**, laissant les énergies non carbonées dans le mix énergétique devenir (parfois largement) dominantes d'ici à 2050. Seul le gaz naturel pourrait continuer à jouer un rôle important pour la production d'électricité (couplé à un système de captation du CO₂) ou le transport maritime.

LES TECHNOLOGIES POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

La décarbonation du secteur de l'énergie nécessitera une combinaison de nombreuses technologies, variable d'un pays à l'autre en fonction des conditions locales, des ressources disponibles et des choix industriels et politiques (place du gaz naturel comme énergie de

⁵ Même si les bâtiments représentent environ 20% des émissions mondiales de GES (notamment en raison de la nature des matériaux utilisés), la décarbonation du secteur repose sur des solutions fondées sur des politiques publiques spécifiques (aides et subventions pour la rénovation du bâti existant, normes de construction plus strictes en matière de performance énergétique, etc.) et des évolutions technologiques des matériaux de construction. Ces technologies existent (il n'y a pas d'obstacles techniques pour la construction de bâtiments totalement passifs ou pour la rénovation de l'ancien ; les besoins énergétiques peuvent être assurés par de l'électricité ou, concernant la production de chaleur, par des pompes à chaleur, le chauffage urbain et le solaire thermique), mais elles impliquent un coût non négligeable

transition vers la décarbonation complète, ou celle du nucléaire dans le mix énergétique). Il n'y a pas de solution universelle, même si certaines sont clairement unanimement privilégiées.

Plusieurs technologies sont disponibles pour parvenir à une électricité zéro carbone : les énergies renouvelables (éolien, solaire, hydroélectrique, géothermie, énergies marines), le nucléaire, les bioénergies et la capture et le stockage du carbone lorsque l'électricité est produite à partir de combustibles fossiles. Ces technologies sont à niveaux de maturité différents : certaines comme **l'éolien (onshore et offshore), le solaire PV et l'hydroélectricité sont d'ores et déjà compétitives et devraient l'être encore davantage à l'avenir grâce à la baisse attendue des coûts de production (voir schéma en annexe)**. D'autres, comme le stockage d'électricité, l'énergie solaire concentrée (CSP) et la capture du carbone, nécessitent encore des progrès technologiques et/ou des économies d'échelle accrues pour permettre leur déploiement large⁶.

D'ici 2050, **l'électricité neutre en carbone devrait principalement reposer sur les énergies renouvelables, en particulier éolienne et solaire PV**, dont la part dans la production d'électricité devrait grimper de 26% en 2019 à 50% voire à plus de 80% d'ici 2050 selon les scénarios. Ils devraient ainsi fournir les deux tiers de l'approvisionnement énergétique mondial à cette date (contre 2% aujourd'hui). Cette montée en puissance des renouvelables s'appuie sur la baisse continue de leurs coûts de production de l'électricité. Entre 2012 et 2018, le coût (LCOE, pour levelized cost of electricity) du solaire PV a baissé de plus de 75%, celui de l'éolien terrestre de 35 % et celui de l'éolien offshore de 20 %. Les coûts devraient continuer de baisser pour les technologies solaires et éoliennes jusqu'en 2030. Selon l'IRENA, les quatre cinquièmes des projets solaires PV et éoliens qui seront mis en service en 2020 produiront de l'électricité moins chère que n'importe quelle alternative aux combustibles fossiles ou nucléaires⁷.

11

Cette transformation structurelle du secteur pose néanmoins un problème crucial, car dans un système traditionnel, les centrales à combustibles fossiles assurent la fiabilité et la flexibilité de l'approvisionnement et fournissent l'inertie nécessaire pour adapter en permanence l'offre à la demande (permettant notamment la gestion des pics de consommation), alors que l'éolien et le solaire sont des sources d'énergies intermittentes dont la production ne peut s'adapter à ces mouvements. Cette évolution entraîne une nécessaire réorganisation du système électrique, traditionnellement centralisé, pour intégrer les nouveaux modes de production renouvelables et décentralisés. Le nouveau modèle à bâtir repose d'une part sur le **développement de capacités de stockage de l'électricité** (sous forme de batteries ou de stockage hydraulique pompé, ou via des vecteurs autres comme l'hydrogène, etc.) et, d'autre part, sur la **mise en place de réseaux intelligents** (*smart grids*, dotés de compteurs intelligents bidirectionnels), où les utilisateurs finaux agissent comme des "prosommateurs" qui alimentent le réseau avec la production électrique excédentaire produite par leurs propres moyens (par exemple via des panneaux photovoltaïques) ou, au contraire, stockent la production d'électricité excédentaire du réseau, par exemple dans les batteries de leurs VE. Les technologies numériques et d'intelligence artificielle, capables de coordonner un grand nombre d'intervenants (consommateurs, producteurs, prosommateurs), seront au centre de cette révolution.

⁶ IRENA, *Global Renewables Outlook 2020: Energy Transformation 2050*, 2020, p.60-61

⁷ IRENA, *Global Renewables Outlook 2020: Energy Transformation 2050*, 2020, p.60-61; REN21, *Renewables 2020. Global Status Report*, Juin 2020, p. 144-145

L'énergie éolienne a connu une croissance remarquable au cours des deux dernières décennies, générant plus de 1400 TWh d'électricité en 2019, soit 5,3% de la production mondiale⁸. Alors que les parcs éoliens actuels sont principalement à terre, les installations en mer (offshore), où le vent est généralement plus fort et plus régulier, se développent rapidement. L'éolien offshore étant une technologie relativement immature, il semble d'ailleurs avoir un plus grand potentiel de baisse des coûts⁹. La technologie de l'éolien offshore flottant (encore au stade de projet pilote) pourrait élargir considérablement les zones d'exploitation.

Il existe actuellement deux technologies principales d'éoliennes qui diffèrent par la conception du générateur et le système de transmission : celles à boîte de vitesses et celles à entraînement direct, basées sur des générateurs à aimants permanents. Ces dernières sont plus chères à produire et nécessitent des terres rares¹⁰, mais elles sont aussi moins lourdes et nécessitent moins de maintenance. Elles sont donc privilégiées pour les turbines de grande capacité et pour l'offshore, les deux domaines où les perspectives de croissance sont les plus importantes. Au niveau mondial, les technologies à aimants permanents représentent actuellement un tiers du marché du secteur onshore et les trois quarts du marché offshore. Ces parts de marché devraient sensiblement augmenter d'ici 2050. **Le déploiement d'éoliennes à grande échelle devrait donc faire peser une forte pression sur les approvisionnements en terres rares**, en particulier pour le dysprosium et le terbium, mais aussi pour le néodyme et le praséodyme. En moyenne, un aimant permanent pèse jusqu'à 4 tonnes et contient 28,5% de néodyme, 4,4% de dysprosium, 1% de bore et 66% de fer¹¹.

12

Avec l'éolien, l'autre technologie sur laquelle sera basée la transition énergétique est le solaire, principalement photovoltaïque (PV). Grâce notamment à la forte baisse des coûts, aux généreuses subventions publiques et aux économies d'échelle dans la fabrication des panneaux, l'énergie solaire a enregistré une croissance remarquable au cours de la dernière décennie. En 2019, le PV a généré 724 TWh, soit 2,7% l'électricité dans le monde¹².

Les cellules photovoltaïques des panneaux solaires PV les plus courants peuvent être fabriquées à base de :

- cristaux de silicium (c-Si). Ce sont les panneaux solaires classiques, soit près de 95% du marché, qui peuvent être soit monocristallins (bon rendement mais coût relativement élevé) ou polycristallins (moins coûteux à fabriquer mais proposant un rendement moindre) ;
- tellure de cadmium (CdTe). Cette technologie, développée depuis les années 1960, est meilleur marché que les cellules à base de silicium mais nécessite l'utilisation de

⁸ BP, *Statistical Review of World Energy*, Juin 2020

⁹ The Sustainable Development Solutions Network (SDSN) et la Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), *Roadmap to 2050 A Manual for Nations to Decarbonize by Mid-Century*, 2019, p.48

¹⁰ Dysprosium (Dy), néodyme (Nd), praséodyme (Pr), terbium (Tb) ainsi que bore (B) sont notamment nécessaires dans la confection des aimants permanents

¹¹ Carrara S., Alves Dias P., Plazzotta B. and Pavel C., *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2020, p.17-30

¹² BP, *Statistical Review of World Energy*, Juin 2020

- matériaux rares – Tellure (Te) et cadmium (Cd) – et possède une toxicité potentiellement élevée. Ces panneaux représentent environ 2,5% du marché ;
- de cuivre, d'indium, de gallium et sélénium (CIGS ; 2% du marché), nécessitant également des matériaux rares ;
 - de silicium amorphe (a-Si ; 0,3% du marché), dont le rendement est faible mais qui sont bon marché, peuvent fonctionner par temps couvert et être intégrés sur supports souples.

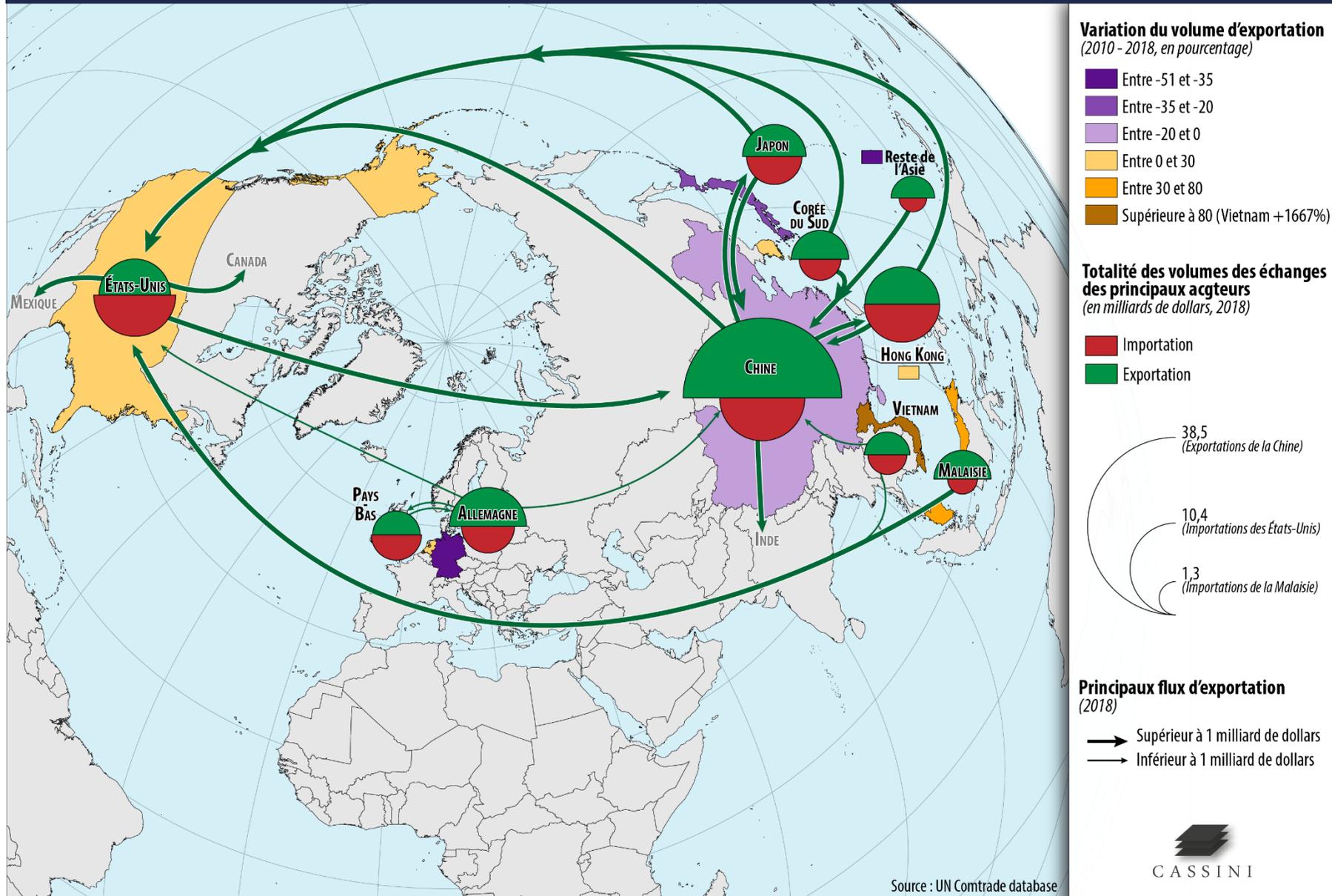
Ces trois dernières technologies (dites “à couches minces”) permettent d’absorber la lumière 10 à 100 fois plus efficacement que le c-Si. Si elles ne représentent collectivement que 5% du marché actuel, leur part va certainement croître rapidement. D’autres technologies PV innovantes telles que les cellules multijonctions ou les dispositifs hybrides à l'échelle nanométrique sont actuellement en cours de développement et promettent une plus grande efficacité et/ou des réductions de coûts à long terme. Il s’agit notamment des cellules à base de sulfure de cuivre, d’étain et de cuivre, des cellules à pérovskite, de PV organique, de PV à point quantique colloïdal, etc. Cependant, le succès commercial de ces technologies émergentes est incertain et il est très peu probable qu’elles soient utilisées à grande échelle dans un avenir proche. **Seules les quatre technologies matures domineront le marché au cours des trois prochaines décennies**¹³.

13

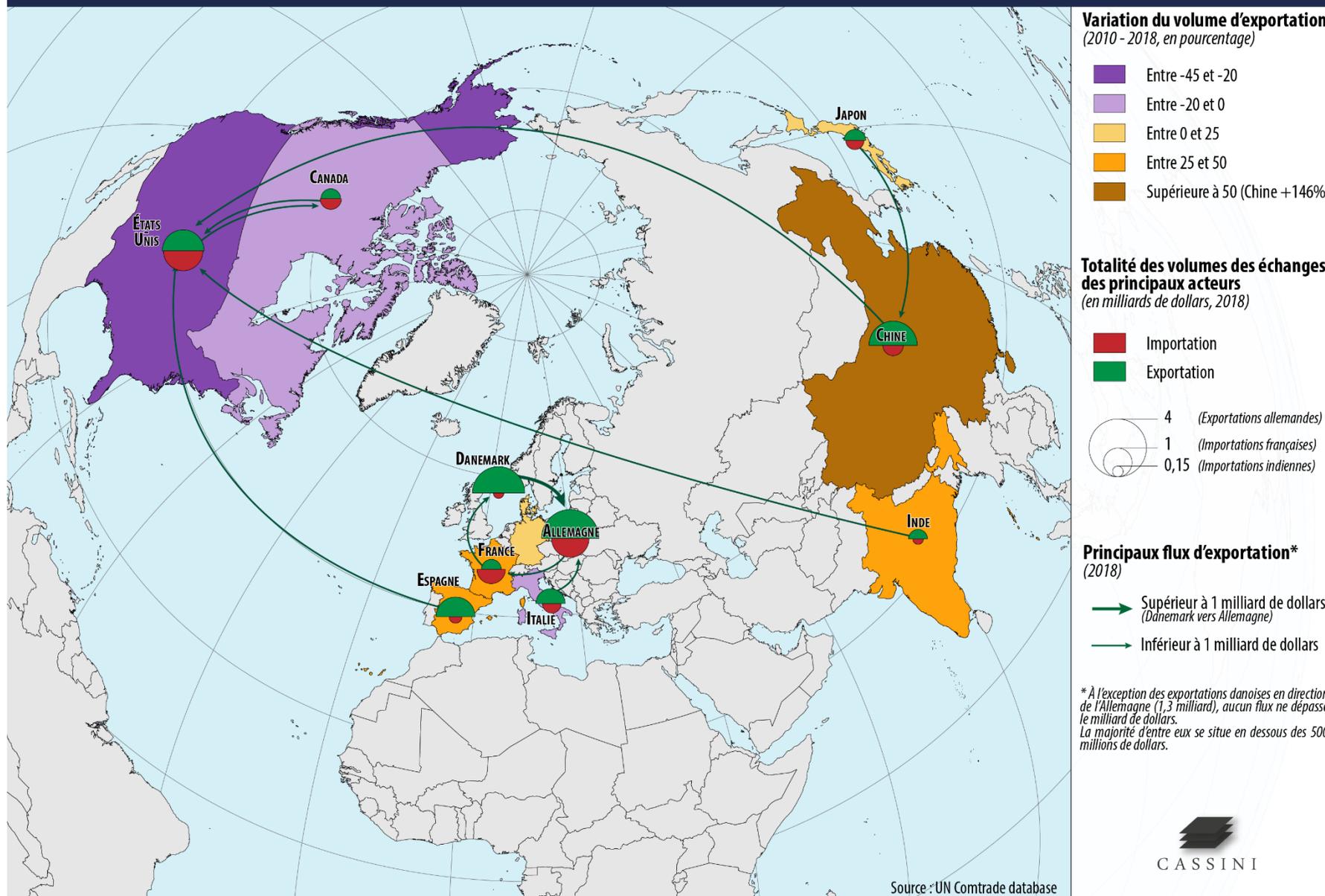
Outre le PV, une autre technologie solaire émerge, même si sa part de marché est encore insignifiante : le solaire thermodynamique à concentration (CSP pour Concentrated Solar Power), dans lequel les rayons du Soleil sont concentrés à l'aide de miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur (par exemple du sel fondu) qui permet de produire de l’électricité via une turbine classique. Même si les coûts de production du CSP demeurent aujourd’hui élevés, plusieurs centrales de ce type existent déjà notamment en Espagne, aux États-Unis, au Maroc, en Afrique du Sud et en Chine. Il s’agit le plus souvent de centrales utilisant des miroirs cylindro-paraboliques, mais des systèmes différents existent aussi, en particulier les tours solaires. Alors que d’importantes baisses de coût sont attendues dans ce secteur, le CSP est appelé, selon la plupart des scénarios prospectifs, à jouer un rôle significatif (jusqu’à 10%) dans la production d’électricité mondiale à l’horizon 2050, d’autant que cette technologie offre un avantage important : elles peuvent stocker la chaleur qu’elles produisent pour pouvoir continuer à fonctionner après le coucher du soleil et assurer une plus grande flexibilité par rapport aux systèmes PV.

¹³ Carrara S., Alves Dias P., Plazzotta B. and Pavel C., Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2020, p.31—38

Le marché des équipements du secteur solaire (photovoltaïque)



Le marché des équipements du secteur éolien



Autres sources d'énergies renouvelables (hydroélectricité, géothermie, énergies marines)

L'hydroélectricité est actuellement la source d'énergie renouvelable la **plus importante pour la production d'électricité**, avec plus de 4200 TWh générés en 2019, soit près de 16% de la production totale d'électricité et environ 60% de la production d'électricité renouvelable¹⁴. Que ce soit sous forme de grands barrages ou de centrales au fil de l'eau, c'est une technologie mature, très bien maîtrisée et peu coûteuse mais dont le **potentiel de croissance est limité** par le nombre restreint de lieux d'implantation possibles et par ses impacts environnementaux et sociaux parfois importants (destruction de la biodiversité, émissions de méthane dues à la décomposition de la végétation submergée, déplacement de population, réduction du débit des fleuves, etc.). Dans tous les scénarios, l'hydroélectricité n'est pas considérée comme un pilier de la décarbonation de la production électrique, mais seulement comme une option complémentaire. L'un des avantages importants de l'hydroélectricité (surtout les barrages) est d'apporter une grande flexibilité au système puisque la production peut être facilement adaptée à la demande.

D'autres sources d'énergies renouvelables existent mais ont actuellement un rôle marginal dans la production d'électricité, notamment la géothermie et l'énergie des mers à travers l'exploitation des vagues (énergie houlomotrice), des courants marins (hydrolienne) et les marées (marémotrice). La géothermie a une longue histoire mais présente un faible potentiel de croissance en raison du nombre limité de sites disponibles dans le monde. Les énergies marines peuvent potentiellement jouer un rôle important dans la décarbonation du secteur de l'électricité, mais ces technologies sont encore actuellement à un stade précoce de développement et ne seront probablement pas commercialisées à grande échelle d'ici 2050.

16

Nucléaire

En dehors des énergies renouvelables, l'autre grande option pour décarboner la production d'électricité est le nucléaire. **Sa place dans le mix énergétique à l'horizon 2050 reste sujet à débat** car les pays diffèrent sensiblement dans leur attitude à son égard. La défiance grandissante envers le nucléaire a déjà conduit la part de cette énergie dans la production mondiale d'électricité à chuter de 17% en 2000 à 10% en 2019. **Même si l'énergie nucléaire reste une option pour un certain nombre de pays à travers le monde, aucun scénario ne prévoit une hausse significative de sa contribution à l'horizon 2050.**

Plusieurs obstacles majeurs handicapent le développement de cette technologie. Premièrement, le nucléaire fait, depuis de nombreuses années, l'objet d'un rejet grandissant de l'opinion publique dans la plupart des pays développés en raison du risque d'accident industriel inhérent (Tchernobyl en 1986, Fukushima en 2011). Ainsi, de nombreux pays (en particulier en Europe de l'Ouest) ont entamé ou annoncé leur sortie progressive du nucléaire, dont l'Allemagne, la Belgique, la Suisse, la Suède, etc. Deuxièmement, l'industrie n'a pas encore pu trouver de véritables solutions aux déchets radioactifs générés par les centrales. Enfin et surtout, le coût des énergies renouvelables ne cesse de chuter (en particulier le solaire PV), tandis que celui du nucléaire augmente continuellement, notamment en raison du renforcement des normes de sécurité suite à l'accident de Fukushima.

¹⁴ BP, *Statistical Review of World Energy*, Juin 2020

Dans ce contexte, la mise au point de petits réacteurs modulaires (SMR pour Small and Modular Reactors), essentiellement par des entreprises d'État russes et chinoises et des start-up nord-américaines, pourrait annoncer un renouveau du secteur. Il s'agit de réacteurs de petite taille aux ingénieries intégrées et standardisées, produits de façon modulaire en usine, permettant une installation sans travaux d'ingénierie civile complexe, sur terre ou sur une barge. Grâce à la standardisation, leurs coûts de production pourraient les rendre compétitifs et répondre à certains besoins de communautés isolées ou de l'industrie (notamment pour la production de chaleur). Il n'existe cependant à l'heure actuelle encore aucun prototype industriel en fonctionnement dans le monde et les premiers modèles ne sont pas attendus avant la seconde moitié de la décennie 2020.

Enfin, la percée potentielle dans la production nucléaire pourrait venir, à moyen terme, de la fusion. Objet de multiples projets de recherche dans le monde, la fusion peut être considérée comme une technologie de rupture. Pour autant, aucun prototype n'a encore atteint un gain énergétique net (c'est-à-dire qu'elles doivent produire plus d'énergie qu'elles n'en consomment), condition nécessaire pour envisager une commercialisation.

Solutions de stockage de l'électricité

Les deux énergies qui domineront le mix énergétique à l'horizon 2050, l'éolien et le solaire PV, sont intermittentes. Leur déploiement à grande échelle implique donc de développer des capacités de stockage et une nouvelle architecture du réseau électrique pour prendre en compte cette intermittence ainsi que la décentralisation des sources d'approvisionnement. **De multiples solutions techniques existent pour le stockage de l'énergie, directement sous forme électrique (batteries, en particulier Lithium-Ion) ou sous une autre forme.** Dans certains cas, le couplage sectoriel peut en effet être utilisé comme moyen de stockage, lorsque le produit peut être à nouveau converti en électricité à un stade ultérieur, comme la production d'électricité à partir d'hydrogène (via les piles à combustibles), l'hydroélectricité pompée, etc. Il s'agit notamment du système de Power to Gas (P2G), dans lequel l'électricité est utilisée pour produire un gaz (généralement de l'hydrogène ou du méthane) lui-même utilisable pour produire de l'électricité ultérieurement, de Power to Liquid (P2L), pour la génération de carburants synthétiques, également appelés électro-carburants, de Power to Vehicules (P2V), qui permet d'utiliser les batteries des véhicules électriques comme support de stockage décentralisé, etc.

17

LES TECHNOLOGIES POUR L'INDUSTRIE

Le secteur industriel, dont les processus de fabrication nécessitent des températures extrêmement élevées (entre 700 °C et 1600 °C) et une forte densité énergétique, consomme plus de la moitié (55%) de l'énergie primaire globale et est responsable de 30% des émissions de GES. Trois secteurs, à forte intensité énergétique, sont cruciaux dans les stratégies de décarbonation en raison de l'importance de leurs émissions de GES et de la difficulté d'électrifier les processus de production : le ciment (un quart des émissions de CO₂ du secteur industriel), la sidérurgie (28%) et la pétrochimie (13%)¹⁵. Les émissions de ces secteurs sont à la fois liées au besoin en énergie et aux procédés chimiques mis en œuvre (la fabrication du clinker pour produire le

¹⁵ The Sustainable Development Solutions Network (SDSN) et la Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), *Roadmap to 2050 A Manual for Nations to Decarbonize by Mid-Century*, 2019, p.61

ciment et la production d'acier par exemple), en plus des émissions indirectes (du fait de l'extraction minière des matières premières et de leur transport notamment).

Pour réduire les émissions du secteur industriel, la plupart des scénarios proposent plusieurs solutions dont l'importance relative peut varier fortement en fonction des hypothèses de départ (sur l'évolution de la demande notamment) et des choix industriels retenus. Tous s'accordent sur le besoin de **remplacer les intrants énergétiques fossiles par de l'électricité** (renouvelables ou nucléaire) ou, lorsque cela s'avère impossible, par une alternative non carbonée (hydrogène, biomasse, carburants de synthèse), tout en **améliorant l'efficacité énergétique des processus industriels** et en œuvrant à la réduction de la demande globale pour ces produits. Certains scénarios considèrent également **le rôle des technologies de CCUS** comme une solution permettant de continuer à utiliser des combustibles fossiles dans certains cas. Cette solution est également applicable au secteur de l'électricité, dans l'hypothèse d'un maintien d'une production à base d'énergies fossiles (gaz naturel notamment).

Il n'y a actuellement plus d'obstacles purement technologique bloquant la décarbonation d'aucun secteur industriel. Les barrières sont économiques puisque les solutions technologiques existent mais sont chères et nécessitent de revoir l'intégralité de la chaîne industrielle dans la mesure où les produits secondaires d'un secteur sont souvent la matière première d'un autre, ce qui implique que tout changement dans les processus de production doit prendre en compte l'ensemble de la chaîne de production¹⁶.

18

Les technologies CCUS

La principale option pour totalement décarboner le secteur industriel est le recours aux technologies CCUS, qui ont pris de l'ampleur ces dernières années mais restent bien en deçà du niveau nécessaire pour avoir un véritable impact au sein des stratégies de décarbonation. **Alors que le CCUS est la seule solution de décarbonation de certains secteurs industriels (cimenteries, incinérateurs de déchets), son développement est lent, entravé par son coût élevé, la lourdeur des investissements nécessaires, une faible acceptabilité sociale et un soutien politique trop erratique pour rassurer les investisseurs.**

Ces technologies consistent à séparer le CO₂ des autres gaz émis par les grandes installations industrielles (centrales électriques au charbon et au gaz naturel, aciéries, cimenteries, raffineries, etc.) afin d'éviter de le rejeter dans l'atmosphère, puis de le séquestrer géologiquement, ou éventuellement de l'utiliser dans des processus industriels nécessitant l'apport de carbone (par exemple pour la fabrication de carburants de synthèse).

Différentes technologies et concepts de CCUS sont disponibles, à la fois dans la captation et dans l'utilisation du CO₂. Il existe plusieurs technologies pour séparer le CO₂ de l'air ou des gaz de combustion : l'absorption, l'adsorption, la séparation par membrane ou l'hydrate de gaz. L'absorption, ou épuration du carbone (carbon scrubbing), est la technologie de capture dominante.

¹⁶ Pour un aperçu complet des options de décarbonation du secteur industriel, voir The Sustainable Development Solutions Network (SDSN) et la Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), Roadmap to 2050 A Manual for Nations to Decarbonize by Mid-Century, 2019, p.58-70

La plus ancienne installation de capture du CO₂ remonte aux années 1970. Depuis les années 2000, cette technologie a connu un **regain d'intérêt** et une cinquantaine de projets ont été lancés, **en particulier aux États-Unis et en Chine**. La plupart visent à séquestrer le CO₂ dans le sous-sol (éventuellement pour améliorer la productivité des puits de pétrole), bien que cette solution soit controversée en raison des risques de fuites (au moment du transport ou du stockage), de son coût énergétique très élevé et des ressources financières nécessaires à son développement (qui pourraient être utilisées plus efficacement dans la lutte contre le réchauffement climatique). En revanche, quelques-uns des projets les plus récents ont pour ambition d'utiliser le carbone pour des applications spécifiques, allant de la production de carburants synthétiques à d'autres produits chimiques, notamment des carbonates, du ciment, des produits chimiques, des plastiques, etc.

Les concepts développés jusqu'à présent sont généralement adaptés pour capter le CO₂ dans les fumées de combustion des centrales thermoélectriques, ce qui est aujourd'hui techniquement au point, avec des rendements d'élimination d'environ 90%. Mais une autre technologie émergente suscite un intérêt grandissant : la capture directe d'air (DAC), dont l'idée est de capter le CO₂ directement dans l'air à l'aide de membranes spécifiques. Les deux principaux défis restent la consommation d'énergie importante de ces processus de captation ainsi que le coût de sa mise en œuvre, bien que l'on puisse espérer que ce dernier baisse en cas de déploiement massif.

19

LES TECHNOLOGIES POUR LE TRANSPORT

Le transport représente environ 28% de la consommation finale d'énergie au niveau mondial. Plus de 90% de l'énergie utilisée provient du pétrole. Ce taux atteint 94% dans le transport routier (environ 75% de la consommation du secteur) et s'approche de 100% pour l'aviation (12%) et le transport maritime (12%)¹⁷. Seul le transport ferroviaire est déjà en grande partie électrifié.

Chaque segment renvoie à des problématiques de décarbonation différentes et s'appuie sur des solutions technologiques également différentes. **Les principaux vecteurs énergétiques qui joueront un rôle dans la décarbonation des transports sont l'électricité (en particulier via des batteries, principalement au lithium, mais également via les piles à combustible à hydrogène), les biocarburants (produits à partir de biomasse)¹⁸ et les carburants de synthèse (produits en utilisant de l'électricité pour produire de l'hydrogène qui est ensuite combiné avec du CO₂, des alcools ou des hydrocarbures, ou de l'azote afin de produire de l'ammoniac ou du méthanol).** Comme les biocarburants durables ne seront disponibles qu'en volumes limités, leur utilisation sera probablement réservée aux modes de transport les plus difficiles à décarboner comme l'aviation. À noter que bien qu'émetteur de GES, le gaz naturel (notamment sous forme liquéfiée (GNL)) pourrait servir d'énergie de transition (avant de parvenir à l'électrification) en remplaçant le diesel et le fioul lourd, en particulier dans le transport maritime et, dans une moindre mesure, dans le transport routier¹⁹.

¹⁷ AIE, *World Energy Outlook*, 2019

¹⁸ Le sujet des biocarburants fera l'objet du rapport 8 (2021)

¹⁹ Voir rapport n°3 de l'Observatoire : Les nouvelles configurations des marchés GNL et leurs implications géopolitiques

L'électrification programmée du transport fait que, dans tous les cas de figure, de grandes quantités d'électricité seront nécessaires, soit directement comme vecteur, soit comme source d'énergie pour produire un autre vecteur d'énergie (hydrogène). La place respective des batteries et de l'hydrogène dans ce secteur dépendra de nombreux aspects liés au coût respectif des batteries et des piles à combustible, au déploiement des bornes de recharge pour le secteur routier, aux coûts de production de l'hydrogène vert et des politiques publiques mises en place pour favoriser une solution plutôt qu'une autre.

Transport routier

Pour les véhicules légers (voitures et camionnettes), la voie vers la décarbonation semble d'ores et déjà tracée : elle passera par **l'électrification du parc automobile**. Les VE à batterie ont connu des améliorations spectaculaires en termes d'autonomie (kilomètres par charge), de coût et de parts de marché. Ils sont considérés dans le monde entier comme une solution privilégiée pour décarboner le secteur automobile tout en améliorant la qualité de l'air des zones urbaines. **Pour les autres modes de transport (poids lourds, aviation, bateaux), la voie est moins claire car plusieurs options restent crédibles (pile à combustible, biocarburants, carburants de synthèse).**

Depuis plusieurs années, les ventes de VE ont crû de manière spectaculaire (même si un tassement des ventes est attendu en 2020). Elles ont dépassé les 2 millions d'unités en 2019, soit 2,5% de part de marché, mais avec une pénétration nettement plus importante dans certains pays comme la Norvège (55%), les Pays-Bas (15%) ou encore la Chine (5,5%). Il y a actuellement 8 millions de VE en circulation dans le monde²⁰. Ce chiffre pourrait atteindre plusieurs centaines de millions en 2050, les **scénarios les plus ambitieux envisageant la conversion à l'électricité de la quasi-totalité du parc automobile d'ici 30 ans.**

20

La baisse du prix des batteries, le développement des infrastructures de recharge et son adoption par les consommateurs (aidée en cela par de généreux soutiens des autorités publiques dans de nombreux pays développés) sont à l'origine de cet engouement pour les VE. L'industrie automobile a, en retour, multiplié ses investissements dans cette direction ces dernières années, qui confirment la dynamique croissante de l'électrification des transports, ainsi que la préférence de l'industrie pour les batteries lithium-ion (Li-ion) sur toute autre solution (pile à combustible ou autre technologie de batterie).

À terme, la technologie V2G (pour Vehicle-to-Grid) permettant un transfert d'énergie bidirectionnel (du réseau vers le véhicule et vice versa) constituait une solution de flexibilité pour la production d'électricité en offrant des capacités de stockage décentralisées. Mais pour l'heure, la grande majorité de la flotte actuelle de VE et de l'infrastructure de charge ne supporte pas encore la technologie V2G. Il existe cependant un certain nombre de projets pilotes dans le monde.

Si la solution des VE à batterie convient aux usages urbains et aux courtes et moyennes distances (voitures, camionnettes, bus, etc.), **l'électrification des véhicules plus lourds est plus difficile, en particulier pour le transport longue distance.** Plusieurs solutions techniques existent pour les poids lourds, mais aucune ne semble s'imposer à l'heure actuelle.

²⁰ Roland Irle, "Global BEV & PHEV Sales for 2019" sur www.ev-volumes.com, 2020

Certains fabricants prévoient de produire des **camions électriques équipés de batterie**, à l'image de Tesla. D'autres envisagent plutôt des **carburants alternatifs** (biocarburants, carburants synthétiques, GNL) ou des **piles à combustible**. Si la technologie des camions électriques semble arriver à maturité, leur coût est encore estimé au double des véhicules diesel courants. Les fabricants estiment cependant que la parité des coûts avec le diesel sera atteinte au cours de la prochaine décennie et que les camions électriques pourront disposer d'une autonomie allant jusqu'à 800 km. Plusieurs constructeurs (Daimler, Iveco, Nikola) devraient également proposer des modèles à hydrogène dans les prochaines années, même si une amélioration rapide des performances des batteries pourrait peser sur la compétitivité de l'hydrogène, malgré ses avantages (moins de masse embarquée, plus d'autonomie (jusqu'à 1200 km), recharge rapide).

Aviation

L'aviation est certainement l'un des secteurs le plus compliqué à décarboner tant il est difficile de rivaliser avec le jet-fuel en termes de densité énergétique (quantité d'énergie par unité de volume) alors que le poids est un élément critique. La faisabilité de l'électrification de l'aviation continue à faire l'objet de débats, même s'il semble de plus en plus probable que si l'électrification peut s'imposer pour les vols court-courriers (par exemple moins d'une heure), les vols long-courriers continueront cependant de nécessiter des carburants liquides à haute densité énergétique.

21

Les biocarburants pour avions à réaction (bio-jet) sont la seule option actuellement disponible pour décarboner la flotte existante et en cours de production. Le marché du bio-jet est actuellement très limité, son utilisation pourrait cependant augmenter rapidement dans les prochaines décennies, surtout si un cadre réglementaire favorable est défini ou si une tarification du carbone importante est imposée.

En plus du biocarburant, **des recherches sont menées pour la production de carburateurs synthétiques à l'aide d'hydrogène, mais les projets ne sont encore qu'au stade de démonstration.** Les carburateurs synthétiques ont encore un long chemin à parcourir avant de devenir compétitifs, d'autant que leur densité énergétique est relativement faible.

À plus long terme, des technologies de propulsion alternatives durables et propres actuellement en développement (comme les avions à propulsion électrique ou solaire, ou à l'hydrogène cryogénique) pourraient émerger, mais ces options ne seront probablement pas prêtes pour une utilisation commerciale avant la seconde moitié du siècle.

Transport maritime

Si la navigation court-courrier (fluviale, côtière, etc.) peut théoriquement être alimentée par des batteries électriques ou des piles à combustible à hydrogène, la navigation long-courrier est au contraire difficile à décarboner pour des raisons similaires à celles de l'aviation.

Les options de carburants alternatifs au fioul (actuellement en situation de quasi-monopole dans le transport maritime) ont toutes des avantages et des inconvénients différents, et il n'y a pas de consensus sur la meilleure option. **Les biocarburants liquides, l'hydrogène et d'autres carburants dérivés de l'hydrogène tels que l'ammoniac, ainsi que les applications éoliennes (comme l'utilisation d'immenses voiles) et solaires, sont envisagés comme alternatives de**

carburant ou compléments. D'un point de vue technologique, les biocarburants liquides sont arrivés à maturité et nécessitent peu d'ajustements des moteurs existants des navires et des infrastructures portuaires. Cependant, trois principaux obstacles limitent le potentiel des biocarburants dans le secteur du transport maritime : le coût, la disponibilité et la durabilité. **L'utilisation de gaz naturel liquéfié (GNL) en lieu et place du fioul lourd consommé par les navires actuels pourrait être une solution transitoire** à court terme vers une décarbonation totale, qui n'interviendra pas avant la seconde moitié du siècle.

ÉVALUATION EMPIRIQUE

Les différents scénarios présentés dans la première section de ce rapport nous permettent de saisir l'ampleur de la transformation technologique qu'implique la transition énergétique. Même si la croissance du marché des technologies bas-carbone observée depuis une vingtaine d'années semble, *a posteriori*, vertigineuse, la hausse des émissions de GES au niveau mondial indique que, si la transition a été amorcée, nous ne sommes qu'au début du processus.

On peut attendre de cette transition qu'elle renforce l'importance de la technologie. Les hydrocarbures, dont le coût d'extraction est déterminant, seront amenés à être en partie remplacés par des énergies faciles d'accès telles que l'éolien et le solaire – ce qui conduit certains analystes à considérer que l'accès à la technologie l'emportera sur l'accès à la ressource dans la nouvelle géopolitique de l'énergie (Criekmans, dans Scholten et al., 2018). Cela peut s'illustrer par un exemple simple : le coût actualisé de l'électricité générée à l'aide d'une centrale à cycle combinée à gaz naturel augmente d'environ 35% quand le coût du combustible augmente de 50%. Pour les technologies éolienne et solaire, les coûts dépendent certes de la qualité du gisement, mais surtout de l'efficacité de la conversion de l'énergie primaire en énergie secondaire, de la durée de vie des installations, de leur fiabilité ou encore de leur intégration au réseau – autant de facteurs qui dépendent de la technologie en elle-même.

23

Le **commerce international sur les technologies bas-carbone** est déjà un marché important et en **pleine évolution** comme en témoignent les cartes sur les échanges d'équipements solaire et éolien. L'avance prise par les pays développés dans ces technologies, **au premier rang desquels le Japon, l'Allemagne et les États-Unis**, se réduit ces dernières années avec l'arrivée de nouveaux concurrents tels que la **Corée du Sud et la Chine**. Dans ce contexte, l'analyse des données de brevets permet, d'une part, de quantifier les dynamiques d'innovation dans ces technologies et, d'autre part, d'analyser les pays dont les efforts sont tournés vers ces technologies dont l'importance ne peut être qu'amenée à se renforcer dans le temps.

LA DIMENSION STRATÉGIQUE DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE

Cette section se fonde principalement sur les données extraites de la base PATSTAT maintenue par l'Office européen des brevets (EPO) qui centralise les informations à propos de plus de 100 millions de documents de brevets émis par les différents offices à travers le monde. Avant de revenir sur les dynamiques d'innovation des technologies bas-carbone, nous donnons quelques éléments introductifs sur les systèmes de propriété industrielle.

Les systèmes de propriété industrielle

Les premiers systèmes de brevets ont été mis en place par les États comme des instruments de souveraineté technologique. Ils permettaient d'attirer les inventeurs étrangers et de s'arroger une forme de contrôle sur les techniques. Le brevet évoluera ensuite vers sa forme moderne pendant le XVIII^e siècle. La nature stratégique des systèmes de brevets se renforce après les trente glorieuses, quand le déclin de la part de l'emploi industriel dans les pays développés les

incite à se tourner vers une économie de la connaissance. Dans ce contexte, il est nécessaire pour les pays développés de s'assurer que la technologie devienne une marchandise et que la propriété sur celle-ci soit reconnue par l'ensemble des États. La création de l'Organisme Mondial de la Propriété industrielle (OMPI, ou WIPO) en 1967, la signature de l'Union Internationale de Coopération en matière de Brevets en 1970 et, enfin et surtout, la signature dans le cadre de l'OMC en 1995 des accords sur les Aspects des Droits de Propriété Intellectuelle qui touchent au Commerce (ADPICs) sont trois événements majeurs qui jalonnent l'harmonisation et le renforcement des règles internationales de propriété industrielle²¹.

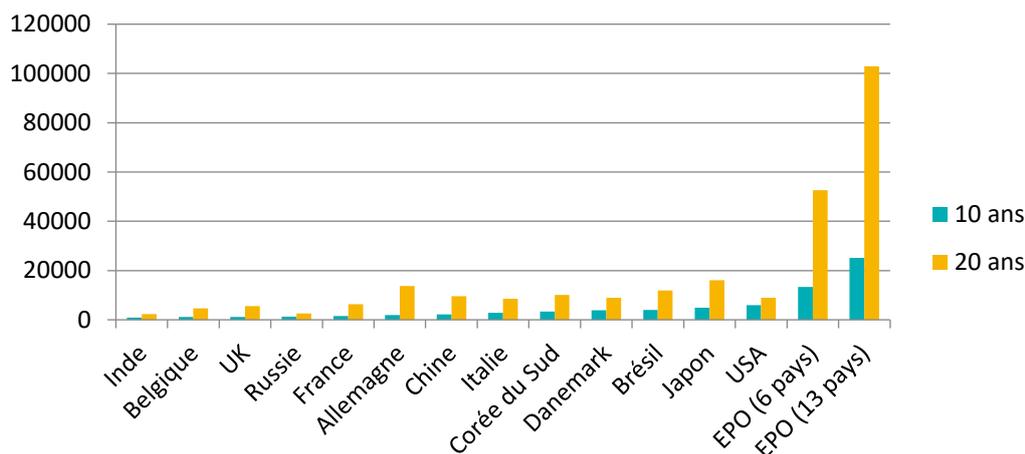
Malgré l'harmonisation des règles, il demeure une forte hétérogénéité entre les offices nationaux de brevets et leurs pratiques. Une entreprise, indépendamment de sa nationalité, peut demander un brevet sur une invention auprès de n'importe quel office dans le monde : on en compte actuellement 206 dont une dizaine d'offices régionaux. Une demande de brevet est examinée selon les critères d'inventivité, d'utilité ou d'application industrielle et de nouveauté. Ces trois critères sont partagés par la majorité des offices ce qui n'empêche pas les procédures d'examen de considérablement varier d'un office à l'autre. L'Office européen des Brevets (EPO) est par exemple réputé pour conduire des examens exigeants qui rendent difficile l'obtention d'un brevet. Au contraire, les examens des demandes de brevets faites auprès de l'USPTO (United States Patents and Trademark Offices) sont plus laxistes, si bien qu'il est plus facile d'obtenir un brevet auprès de l'office américain mais que celui-ci a plus de chances d'être ensuite contesté devant les tribunaux (Van Pottelsberghe de la Potterie, 2010).

24

Un bon indicateur de l'hétérogénéité des brevets délivrés dans le monde est le coût total d'obtention d'un brevet. Il inclut par exemple les frais de dépôt et d'examen de la demande, les frais de renouvellement du brevet qui doivent être payés à certaines échéances par le détenteur du brevet pour qu'il ne rejoigne pas le domaine public, ou encore des frais additionnels liés à la rédaction du document de brevet par des juristes spécialisés.

Graphique 6 :
Estimation du
coût complet
d'un brevet
en euros de
2011

Source :
Commission
européenne



C'est selon la valeur économique qu'espère retirer une entreprise d'une invention qu'elle se décidera ou non à demander un brevet auprès d'un office. **Par exemple, l'importance du coût**

²¹ Par renforcement, on entend, d'une part, l'allongement de la durée maximale de validité d'un brevet et, d'autre part, l'élargissement du champ du brevetable à des nouveaux secteurs comme l'algorithmique, les logiciels, les organismes génétiquement modifiés ou encore, comme c'est le cas dans certains offices de brevets, les pratiques commerciales.

d'un brevet européen implique qu'en moyenne les demandes de brevets qui lui sont adressées concernent des inventions de grande valeur économique, tandis qu'au contraire des demandes de brevets adressées à d'autres offices peuvent l'être pour des inventions de moindre valeur. Ces différences biaisent les comparaisons internationales des statistiques de brevets et nous verrons comment en tenir compte.

Stratégies privées et stratégies publiques

En tant qu'instrument légal, un brevet peut être utilisé de manière stratégique par son détenteur. De même, les règles de propriété industrielle, ainsi que leurs mises en pratique, peuvent servir les intérêts d'un État.

Stratégies privées

Les stratégies des entités privées fondées sur la propriété industrielle dépendent des règles de l'office ayant délivré le brevet. On peut néanmoins distinguer deux grandes catégories de stratégies privées utilisant la propriété industrielle : les « patent trolls » et les brevets bloquants ou supprimeurs.

Les « **patent trolls** » sont des entités qui ont des portefeuilles de brevets mais ne les utilisent pas à des fins de production. Elles ne mènent pas non plus d'activités de R&D et préfèrent racheter directement les brevets déposés. Les « patent trolls » passent alors en revue les activités de production qui pourraient s'avérer litigieuses vis-à-vis de leurs portefeuilles de brevets. Un accord bilatéral est ensuite proposé aux entreprises litigieuses – généralement via la vente d'une licence d'exploitation au prix fort. Si un tel accord n'est pas trouvé entre les deux parties, le litige est porté devant les tribunaux. Cette pratique est répandue dans les pays où la procédure d'examen des brevets est peu méticuleuse, comme c'est le cas aux États-Unis. Dans les faits, certaines entreprises mènent à la fois une activité de « patent troll » et une activité d'utilisation de brevet à des fins de production.

25

Ces litiges sont devenus monnaie courante dans le secteur de l'informatique. À titre d'exemple, 2012 marque la première année où Microsoft et Apple ont dépensé plus d'argent dans des litiges en lien avec la propriété industrielle et dans l'acquisition de brevets que dans le financement d'activités de R&D²².

Détenir un brevet est également un moyen de bloquer l'accès à un marché. Ces brevets dits bloquants, ou supprimeurs quand ils ont pour but d'empêcher la commercialisation d'une invention, sont des actifs importants pour une entreprise. Un exemple bien connu de brevet supprimeur dans le secteur de l'énergie est celui de la lampe à fluorescence. Dans les années 1920, cette technologie était déjà mature, brevetée par les principaux producteurs américains de lampe et surtout reconnue comme plus efficace que les lampes à incandescence. Les détenteurs des brevets se sont néanmoins entendus pour saturer le marché de l'éclairage avant de commercialiser des lampes plus efficaces. La technologie des lampes à fluorescence a donc été « supprimée » jusqu'en 1938, avant qu'un nouvel entrant sur le marché, Sylvania, vienne commercialiser cette technologie.

²² « The Patent, Used as a Sword », *New York Times*, 7 octobre 2012

Plus récemment, l'exemple de General Electric dans le secteur de l'éolien illustre l'usage des brevets dits bloquants. En 2005 le marché des turbines éoliennes est en train de se consolider et environ 75 % des turbines vendues dans le monde sont produites par Vestas (Danemark), Gamesa (Espagne), Enercon (Allemagne) et General Electric (États-Unis) (Lewis et Wiser, 2007). Cette dernière entreprise entre sur le marché seulement en 2002 et accuse un retard technologique par rapport à ses concurrents européens (Kamp et al., 2004). Elle parviendra néanmoins à limiter l'accès au marché américain à l'aide d'un brevet qu'elle détient sur les turbines éoliennes à vitesse variable. Ce brevet, valable de 1992 à 2009, permettra à la firme américaine de profiter d'un marché national subventionné (Sovacool, 2008). L'entreprise General Electric a d'ailleurs été en litige avec sa concurrente Enercon du début des années 1990 à 2002 pour lui bloquer l'accès au marché américain (Syam, 2010). Elle a ensuite conclu un accord avec la firme allemande pour utiliser certaines de ses inventions en l'échange de quoi elle lui laisse accéder au marché américain (Kirchner et Kirchner-Freis, 2013).

Stratégies publiques

Le *design* du système national de propriété industrielle et la mise en pratique de ses règles peuvent être orientés vers la poursuite d'objectifs stratégiques. À cet égard, l'exemple du Japon est intéressant car il a été un modèle pour des pays souhaitant intégrer à leurs économies des technologies étrangères.

La croissance de la productivité totale des facteurs observée au Japon entre 1960 et 1993, imputable au rattrapage technologique qu'a connu le pays à cette époque, s'explique en partie par l'orientation donnée au système de propriété industrielle. Celui-ci était paramétré pour **favoriser le dépôt de brevet pour des modifications mineures de technologies étrangères et encourager des demandes de la part d'entreprises et d'individus japonais** (Kumar, 2002). Le Japon exclura volontairement et jusqu'en 1975 certains secteurs du champ du brevetable pour favoriser l'imitation des innovations de procédés. De même, la Corée du Sud et Taïwan ont mis en place des systèmes de propriété industrielle orientés vers l'absorption de technologies étrangères. Le cas de la Chine est bien sûr particulièrement intéressant puisqu'il illustre comment la propriété industrielle peut être mise au service des objectifs d'un gouvernement en matière de développement technologique. Nous l'évoquons dans la section de ce rapport dédiée au système national d'innovation chinois.

Plus récemment, certains pays ont mis en place des fonds souverains de brevets dont les pratiques s'inspirent du secteur privé. Le premier fonds souverain de propriété industrielle a été créé en 2010 par la Corée du Sud. Soucieux de réduire le déficit de sa balance des paiements technologiques, le **gouvernement a fait l'acquisition de brevets stratégiques dans le secteur de l'informatique pour les mettre à disposition de ses entreprises**. Dans le portefeuille de brevets du fonds, 82 % des brevets sont délivrés par l'USPTO et des licences sont mises à disposition, à un prix préférentiel, aux entreprises coréennes (Ellis, 2016). Le Japon s'est également doté d'un fonds souverain de brevets en 2013, qu'il gère en partenariat avec les grandes entreprises japonaises. Le fonds poursuit deux objectifs : (1) l'acquisition de brevets sur des technologies jugées stratégiques pour l'industrie japonaise et (2) la construction de portefeuilles de brevets qui fédèrent les intérêts des entreprises japonaises et mobilisés comme arme juridique dans la concurrence avec les entreprises étrangères (agrégation de brevets).

La France a mis en place en 2011 le fonds France Brevets. Son objectif est principalement commercial puisqu'il encourage la monétisation, par les entreprises françaises, de leurs actifs technologiques via les brevets. Il détient moins de brevets que les deux fonds mentionnés ci-dessus et sera déclaré incompatible avec le Traité sur le Fonctionnement de l'Union européenne en 2014. Le fonds sera scindé en deux entités, dont l'une est dédiée à l'agrégation de brevets. La position de Bruxelles sur le sujet semble néanmoins évoluer puisque l'idée d'un fonds européen de brevets a récemment émergé²³. La Chine, via son fonds souverain *China Investment Corporation*, investit également dans l'acquisition de technologies étrangères mais on manque d'informations sur la cible de ces investissements et la part dédiée à la propriété industrielle.

Les statistiques de brevets comme instruments de mesure

Les statistiques de brevets sont largement utilisées pour mesurer l'innovation, mais elles peuvent conduire à des interprétations erronées quand elles sont utilisées pour mener des comparaisons internationales. Nous détaillons brièvement ci-dessous deux mesures construites à l'aide des données de brevets et qui permettent de contourner ces problèmes (OECD, 2009).

Le compte des familles de brevet : un proxy du nombre d'inventions

Une invention peut être protégée par plusieurs brevets délivrés par différents offices nationaux ou régionaux. Le comptage du nombre de brevets peut donc facilement conduire à surestimer le nombre d'inventions produites dans un champ technologique. Une famille de brevets rassemble l'ensemble des brevets qui protègent, dans différentes zones géographiques, la même invention. On attribue une année à cette famille de brevet qui est celle du premier dépôt, dans la mesure où l'on reconnaît qu'elle est l'année la plus proche de la date d'invention (OECD, 2009).

Les demandes dans le cadre du Traité de coopération en matière de Brevets (PCT)

Les indicateurs de brevets construits avec des brevets délivrés par un seul office souffrent d'un biais domestique. On observe en effet que les entreprises ont, en moyenne, une propension plus forte à breveter dans leur pays qu'à l'étranger. Une manière de s'affranchir de ce biais est d'utiliser les demandes de brevets PCT (pour Patent Cooperation Treaty) (OECD, 2009).

Le PCT permet à une entreprise de déposer une demande « internationale » de brevets, qui peut dans un second temps être validée plus rapidement et avec une meilleure chance de succès dans plusieurs offices des pays membres du Traité choisis par l'entreprise. Les brevets PCT permettent aux demandeurs d'économiser des frais associés à des demandes de brevets dans de multiples offices et, dans le contexte des comparaisons internationales, présentent deux avantages majeurs.

Premièrement, la nationalité du demandeur de brevet est référencée et donc disponible dans la base PATSTAT dont sont extraites les données de ce rapport. C'est une information précieuse puisqu'il est en réalité rare qu'un office communique la nationalité des détenteurs de ses brevets²⁴. Deuxièmement, la demande d'un brevet PCT de la part d'un agent économique

²³ « L'Europe planche sur un fonds souverain de 100 milliards d'euros », *Les Échos*, 24 août 2019

²⁴ Des statistiques générales à l'échelle d'un office sont souvent disponibles, mais elles ne le sont que très rarement à l'échelle du brevet ou même du champ technologique.

témoigne a priori d'une volonté d'exploiter cette invention dans plusieurs pays à travers le monde. On s'assure ainsi de ne compter que les inventions d'une valeur économique suffisamment forte pour justifier le coût de la démarche.

LES DYNAMIQUES D'INNOVATION DANS LES FILIÈRES DES TECHNOLOGIES BAS-CARBONE

Classification des technologies bas-carbone

Les données de brevets présentent plusieurs avantages vis-à-vis des données de dépenses de R&D (Dechezleprêtre et al., 2011). Elles permettent de mesurer un « output » du processus d'innovation et non un « input ». De plus, les données de brevets peuvent être désagrégées dans un grand nombre de classes technologiques, permettant ainsi une analyse fine des dynamiques d'innovation au sein des différentes filières technologiques. Les données de brevets sur les technologies bas-carbone utilisées dans ce rapport ont été reclassées selon trois échelles de catégories technologiques. On distinguera :

- Un premier niveau de catégorisation par **secteur d'application** (énergie et transport) ;
- Un second niveau, plus détaillé, qui permet de distinguer les différentes **familles techniques** (par exemple : énergies renouvelables, stockage d'énergie, énergie nucléaire, etc.) ;
- Un troisième niveau qui présente le degré de désagrégation le plus fort en rattachant chaque invention à une **technique** précise.

28

Ces trois niveaux de classification sont présentés dans le tableau en Annexe 1.

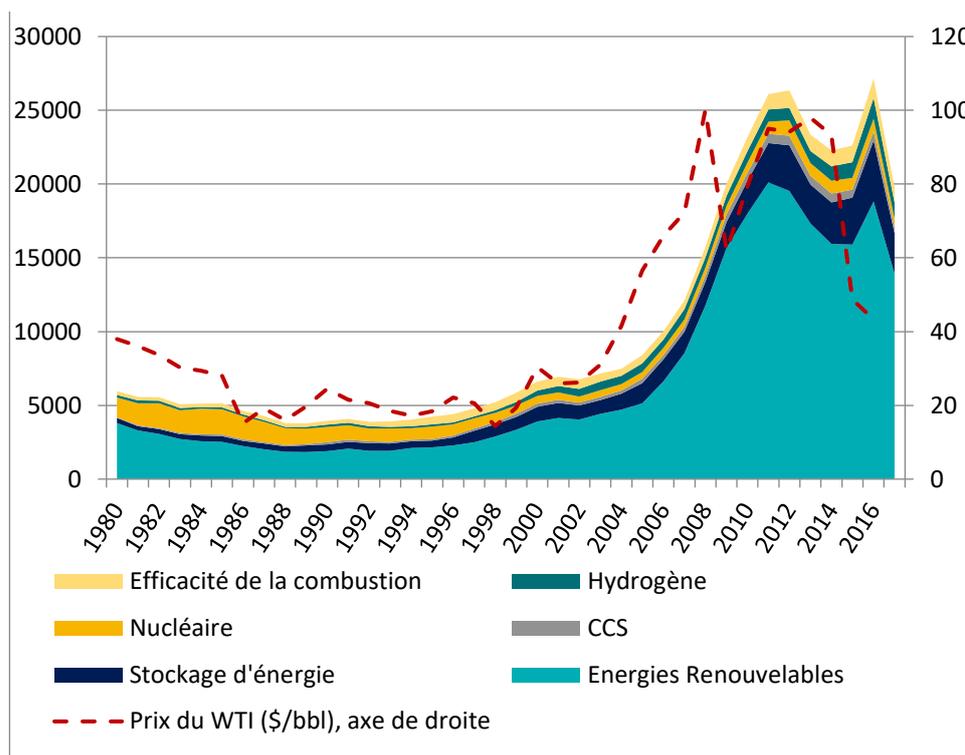
L'innovation bas-carbone dans le secteur de l'énergie

Le développement des technologies bas-carbone dans les secteurs de l'énergie est, sans surprise, porté principalement par les technologies des énergies renouvelables. Depuis la fin des années 2000, on observe également une accélération du changement technique dans les technologies du stockage d'énergie qui s'explique certes par les avancées réalisées dans le secteur des batteries, mais surtout par l'accélération de la production d'inventions dans le secteur des super-condensateurs.

On peut observer sur le graphique 7 le flux annuel d'inventions bas-carbone ayant fait l'objet d'une demande de brevet dans au moins un pays dans le monde. Avant de revenir plus en détail sur des familles techniques spécifiques, nous pouvons souligner le lien entre l'innovation bas-carbone et le prix du pétrole.

Graphique 7 : Flux annuels d'inventions par familles technologiques dans le secteur de l'énergie

Source : PATSTAT & BP statistical review



29

Il existe une vaste littérature économique qui démontre l'existence d'une causalité positive du prix du pétrole vers l'innovation bas-carbone (Newell et al., 2009 ; Popp, 2002 ; Crabb et Johnson, 2010 ; Verdolini et Galeotti, 2011). Cela rappelle la nécessité d'un signal prix, par exemple via une taxe sur les émissions de gaz à effet de serre, pour pouvoir stimuler le développement des technologies bas-carbone. Ce lien entre le prix du pétrole et le développement des technologies bas-carbone explique le ralentissement de l'innovation dans ces secteurs qui s'amorce en 2011, ce qui illustre la « fragilité » des technologies bas-carbone.

L'épidémie mondiale de COVID-19 pourra avoir des conséquences importantes sur ces secteurs et va **ralentir, au moins à court terme, le rythme d'innovation dans les secteurs bas-carbone** en contraignant la capacité d'investissement des acteurs privés et publics. Le choc à la baisse qu'elle génère sur l'ensemble des demandes sectorielles est déjà parvenu, en l'espace de quelques mois, à faire apparaître des prix de marché du pétrole négatifs. S'il est risqué de se prononcer sur les conséquences à moyen terme de cette épidémie, certains enseignements de la crise financière de 2008 peuvent néanmoins nous éclairer. Le ralentissement de l'économie mondiale avait, dans un premier temps, conduit à une baisse des prix de l'énergie ainsi que des émissions de GES. Les émissions globales de GES sont ensuite rapidement reparties à la hausse en 2010 pour atteindre un niveau supérieur à celui d'avant crise (Peters et al., 2012). Cette augmentation s'explique par la modification des prix relatifs de l'énergie aux dépens des énergies alternatives et des investissements publics tournés vers une reprise rapide, en moyenne plus polluants.

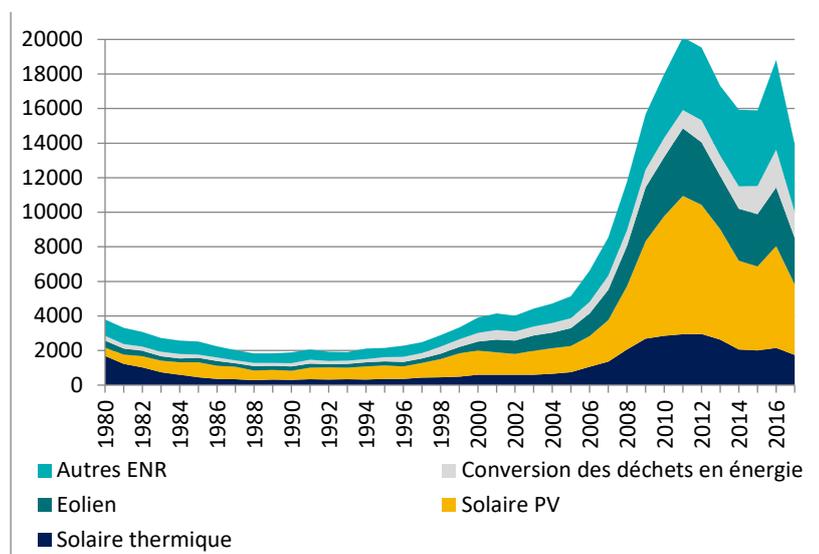
Les énergies renouvelables

La famille technologique des énergies renouvelables est largement dominée par le solaire PV et l'éolien. On peut observer sur le graphique 8 le flux annuel d'inventions produites, à l'échelle globale, dans l'ensemble des technologies des énergies renouvelables. Nous distinguons les

secteurs les plus dynamiques (solaire PV, solaire thermique, éolien et déchets-énergie) des autres techniques de cette famille dont les inventions sont rassemblées au sein d'une catégorie unique.

Graphique 8 : Flux annuels d'inventions produites dans le monde dans les technologies des ENR

Source : PATSTAT



Le grand nombre d'inventions produites dans les secteurs du solaire PV et de l'éolien s'explique par la mise en place de tarifs subventionnés à l'énergie renouvelable, d'abord aux États-Unis (1978), en Espagne (1980) et au Danemark (1981), puis dans la majorité des pays de l'OCDE durant les années 1990 (dont la France, en 1996). Ces aides visaient dans un premier temps le solaire PV et thermique et l'éolien terrestre, avant d'être étendues à d'autres technologies. Dans certains pays, elles ont permis le développement d'une filière nationale compétitive et d'un leadership fondé sur l'avantage de « first-mover ».

30

C'est par exemple le cas de la filière éolienne danoise qui profite des tarifs subventionnés d'achat à l'électricité d'origine éolienne, que les fermes éoliennes danoises reçoivent à condition de respecter des **obligations de contenus locaux** qui assuraient au gouvernement danois que les éoliennes subventionnées soient effectivement produites par des entreprises résidentes. La Chine a également mis en place une stratégie similaire dès 1997 pour soutenir son industrie éolienne, avec succès (Kuntze et Moerenhout, 2013). En France, un pas a été fait en cette direction en 2012 quand le soutien à l'énergie d'origine solaire PV a pu bénéficier d'une prime si les installateurs pouvaient justifier que plus de 60 % de la valeur ajoutée des panneaux solaires installés était générée en Union européenne. Ce mécanisme a bénéficié aux pays européens qui avaient développé en amont des filières de production de panneaux solaires comme l'Allemagne et l'Espagne.

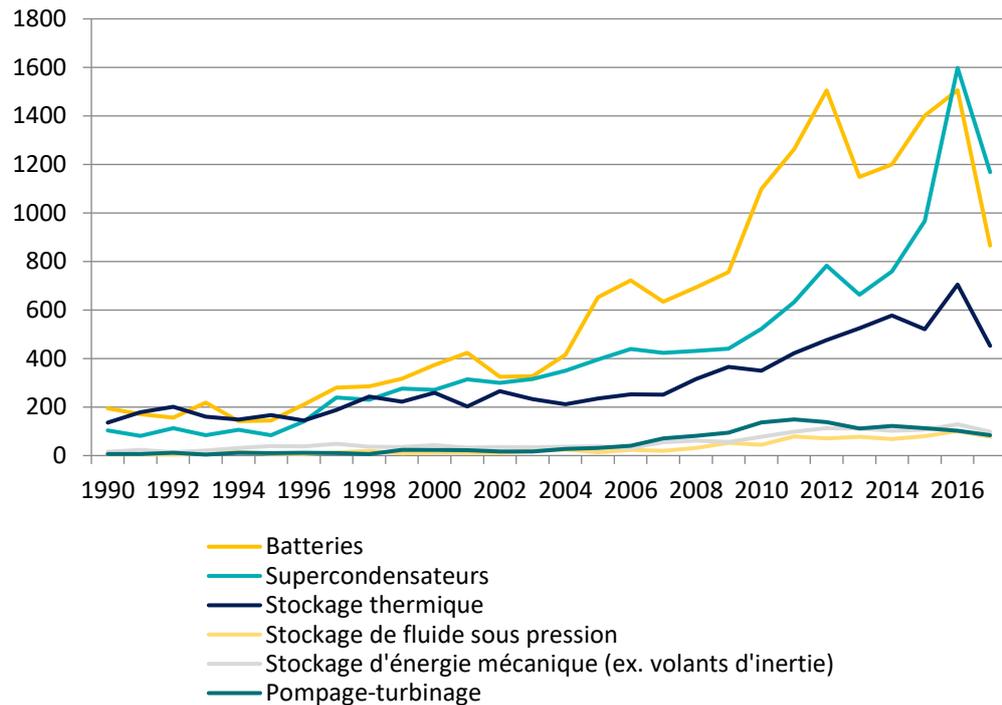
La période faste dans les années 2000 des technologies du solaire PV et de l'éolien s'explique ainsi par les tarifs d'achat subventionnés qui ont alimenté une forte demande. Ces instruments économiques se sont ensuite révélés relativement inefficaces à plus long terme puisqu'ils font peser une charge financière considérable sur les contribuables ou les consommateurs (selon le mode de financement) sans garantir à un gouvernement que ces subventions bénéficient aux entreprises nationales.

Les techniques de stockage

Le déploiement des énergies non-pilotables et les difficultés qu'il entraîne pour maintenir l'équilibre sur le réseau électrique ont stimulé la demande pour des technologies de stockage permettant de gagner en flexibilité. On peut observer sur le graphique 9 que **le dynamisme de ce secteur tient principalement aux inventions produites en lien avec les technologies des batteries et des super-condenseurs**, qui sont complémentaires des batteries et non substitués²⁵. Néanmoins, le flux annuel d'inventions produites dans la technologie du stockage thermique a également connu une croissance soutenue depuis la fin des années 1990.

Graphique 9 : Flux annuels d'inventions produites dans les techniques du stockage d'énergie

Source : PATSTAT

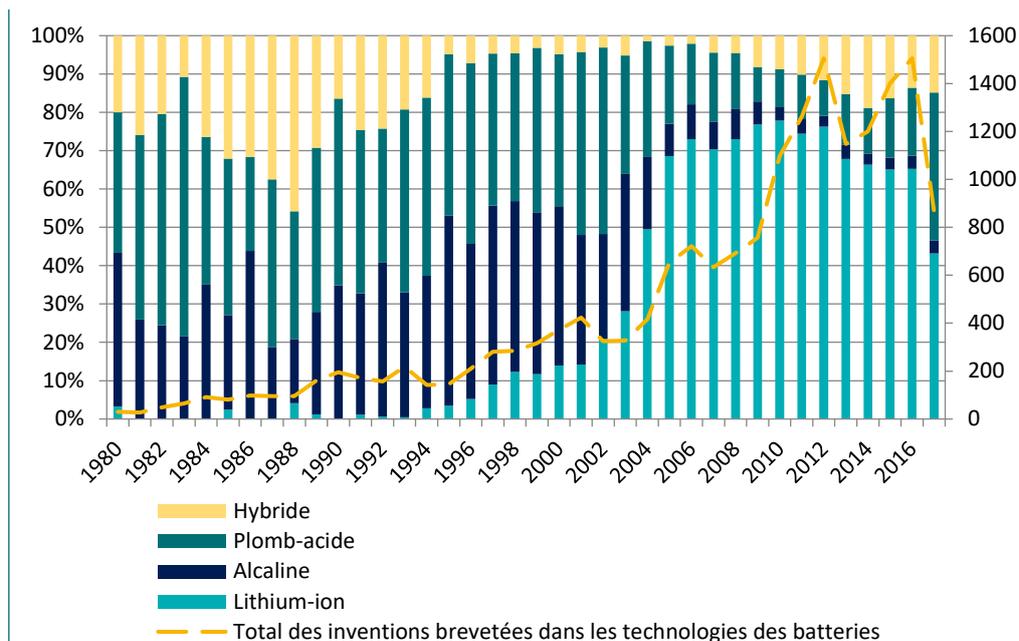


Malgré l'importance des super-condensateurs, les batteries restent néanmoins une famille technologique centrale qui met en concurrence plusieurs technologies (voir focus Li-ion en annexe). Le graphique 10 rend compte de cette concurrence.

²⁵ Les super-condensateurs (et ultra-condensateurs, inclus dans la même classe technologique) se distinguent des batteries par leur forte densité de puissance qui leur permet de restituer plus rapidement l'énergie. Ils sont donc amenés à jouer un rôle important dans un réseau électrique avec un important taux de pénétration des énergies non-pilotables pour pouvoir réagir rapidement à une hausse de la demande.

Graphique 10 :
Évolution de la
distribution, par
types de
batteries, des
inventions
brevetées dans
cette famille
technologique

Source : PATSTAT



On voit se refléter dans les données l'avantage technologique que présentent les batteries Lithium-ion sur les technologies concurrentes. En l'espace de quelques années, elles ont représenté plus de 70 % des inventions nouvellement produites dans le secteur des batteries. Néanmoins le prix du lithium a connu une importante hausse entre 2014 et 2017, passant de 4,9 \$/kg à 10,6 \$/kg (IHS Markit 2018). Cette augmentation peut expliquer le ralentissement de la production d'inventions dans ce secteur que l'on peut observer à partir de 2014.

32

On peut enfin souligner le renouveau de la technologie des batteries au plomb. Si celles-ci disposent d'une densité de puissance moindre que les batteries lithium-ion, l'augmentation du nombre de cycles qu'elles peuvent supporter (qui englobe la charge et la décharge) et l'allongement de leur durée de vie les rendent plus efficaces que les autres technologies pour des applications dans le stockage d'énergie stationnaire – comme dans le cas du solaire PV (May et al., 2018). Par ailleurs, les batteries au plomb étant efficacement recyclées la question de la criticité de la ressource est de moindre importance.

Les techniques complémentaires

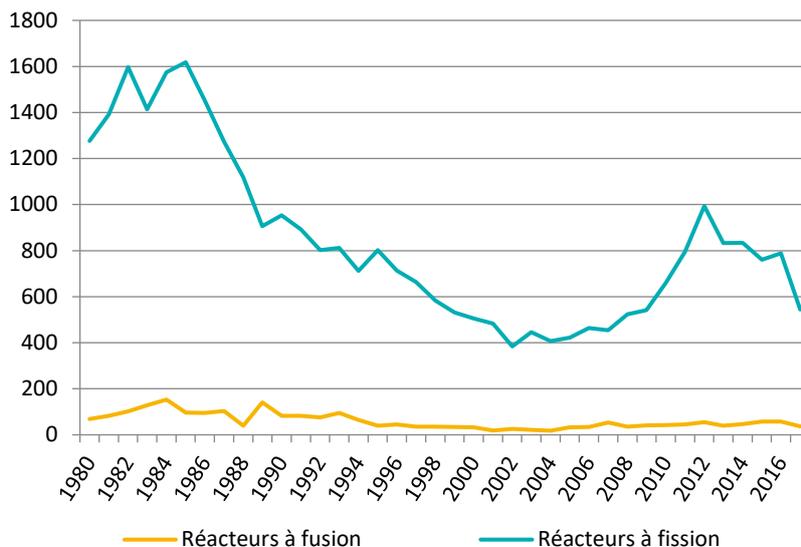
Si le couple énergies non-pilotables – stockage s'affirme comme le pilier central de la transition énergétique, les scénarios de transition insistent également sur la place du nucléaire et l'importance des CCUS pour réaliser les objectifs de réduction des émissions de GES.

Le rythme de production annuelle d'inventions dans la technologie du nucléaire **s'est considérablement ralenti après l'accident de Tchernobyl** et ce jusqu'au début des années 2010.

On assiste pourtant depuis le début des années 2010 à une reprise de l'activité d'innovation dans ce secteur, et ce pour la technologie de la fission nucléaire.

Graphique 11 : Évolutions des flux annuels d'inventions produites dans les techniques des réacteurs à fusion et à fission

Source : PATSTAT



Une analyse plus fine des données de brevets déposés dans la filière des réacteurs à fission doit se concentrer sur les brevets délivrés par l'EPO. Ils permettent, entre autres, d'identifier la nationalité de l'entreprise ayant demandé le brevet et ils **protègent des inventions d'une valeur économique significative**.

33

On rapporte dans le tableau ci-dessous le nombre de brevets délivrés par l'EPO pour des inventions dans le domaine de la fission nucléaire ainsi que la taille moyenne de la famille de ces brevets. Le premier indicateur est donc une quantification du nombre d'inventions produites dans ce domaine par les pays de notre échantillon, tandis que le second mesure le nombre moyen de pays dans lesquelles ces inventions sont protégées. Les pays inclus sont les sept pays ayant obtenu le plus de brevets délivrés par l'EPO pour des inventions dans le domaine de la fission nucléaire entre 2010 et 2017.

| | | Canada | France | Japon | Corée du Sud | Russie | Suède | USA |
|-----------|---|------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|-------------|
| 2010-2013 | Nombre de brevets délivrés par l'EPO | 9,0 | 28,0 | 15,0 | 3,0 | 2,0 | 6,0 | 64,0 |
| | <i>Taille moyenne de la famille des brevets</i> | 11,0 | 9,8 | 4,6 | 5,3 | 8,0 | 6,7 | 7,7 |
| 2014-2017 | Nombre de brevets délivrés par l'EPO | 1,0 | 13,0 | 5,0 | 4,0 | 7,0 | 6,0 | 20,0 |
| | <i>Taille moyenne de la famille des brevets</i> | 5,0 | 6,8 | 4,0 | 3,8 | 10,1 | 4,5 | 7,4 |

Durant les périodes 2010-2013 et 2014-2017, les États-Unis sont le pays qui a déposé le plus de brevets auprès de l'EPO pour des inventions dans le domaine de la fission nucléaire. La France se place à chaque période en deuxième position. Pourtant, la période 2014-2017 est une illustration de la dégradation, en moyenne, des performances des pays de l'échantillon. Le Canada, la France, le Japon et les États-Unis obtiennent moins de brevets délivrés par l'EPO pour des

inventions dans la fission nucléaire et ces inventions sont protégées dans moins de pays à travers le monde.

Le seul pays à faire preuve d'une amélioration de sa performance d'innovation dans le domaine de la fission nucléaire durant la période 2014-2017, en comparaison avec la période 2010-2013, est la Russie. On assiste à une augmentation significative du nombre de brevets déposés auprès de l'EPO et ces brevets européens protègent des inventions dans, en moyenne, 10 pays à travers le monde durant la période 2014-2017. Ces chiffres illustrent la place prise par la Russie dans la production de technologie nucléaire civile. Une analyse conduite sur 738 coopérations internationales en matière de nucléaire civil entre 2000 et 2015 démontre que **les États-Unis surpassent de peu la Russie en termes de coopération internationale**. Les deux pays participent à un grand nombre de coopérations avec de nombreux pays différents. Néanmoins, **la Russie s'illustre en étant également le principal fournisseur de technologie nucléaire dans le cadre de ces coopérations internationales** (Jewell et al., 2019). Le travail de collecte de données des auteurs indique que la Russie a vendu de la technologie nucléaire civile à 35 pays différents entre 2000 et 2015, contre 16 pour la France et 11 pour les États-Unis.

Comme le nucléaire civil, le CCUS est supposé accompagner l'introduction des énergies non-pilotables.

34

L'étude des données de brevets déposés dans le domaine du CCUS révèle un profil qui contraste avec les autres technologies bas-carbone dans le domaine de l'énergie. Entre 1980 et 2005, le rythme d'innovation dans ce domaine est faible. En 1980, on identifie 44 inventions différentes dans le domaine du CCUS ayant fait l'objet d'une délivrance de brevet, ce chiffre atteindra seulement 120 inventions en 2004. Entre 1994 et 1998, les inventions dans le CCUS dédiées à la capture du CO₂ sont systématiquement protégées dans plus de trois pays, alors qu'en moyenne les inventions bas-carbone dans le domaine de l'énergie sont protégées dans 1,5 à 2 pays différents durant la même période. C'est une période durant laquelle les anticipations des acteurs à propos du marché du CCUS étaient optimistes.

Durant les années 2000, la taille moyenne des familles de brevets protégeant ces inventions décroît significativement et plus rapidement que la taille moyenne des familles protégeant des inventions bas-carbone dans le domaine de l'énergie, qui commence à diminuer elle aussi durant la seconde moitié de la décennie.

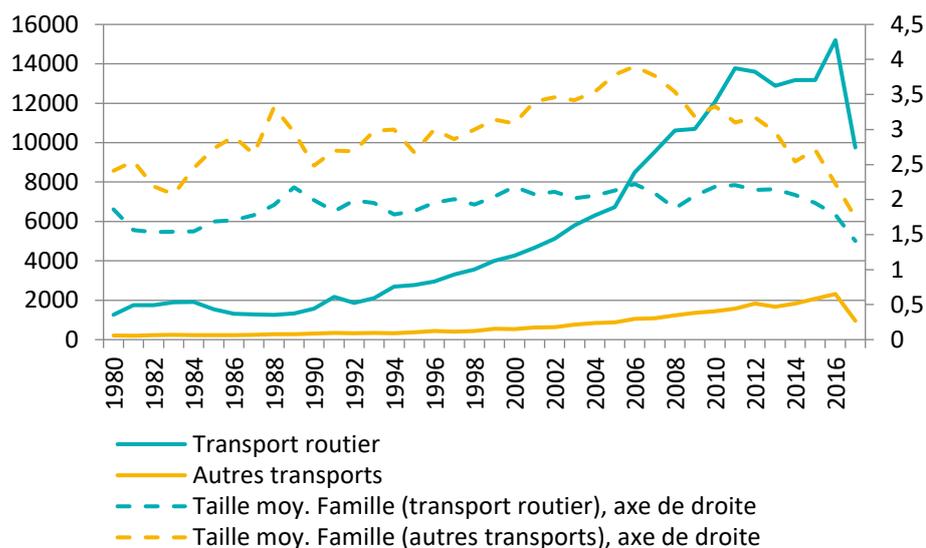
Plusieurs facteurs peuvent expliquer le doute grandissant vis-à-vis de la rentabilité future des investissements dans le CCUS. Premièrement, les acteurs impliqués dans son développement anticipent une exploitation commerciale débutant en 2020 ou en 2030 au plus tard (Evar et al., 2012). Pourtant, l'exploitation commerciale de cette technologie n'est profitable qu'à condition que les émissions de GES soient taxées à des niveaux importants. De plus, la technologie semble encore immature : on comptait seulement 15 projets à grande échelle en 2016 dont un seul récupère effectivement du CO₂ émis par une centrale électrique ; les autres récupérant directement le CO₂ émis lors de l'extraction d'hydrocarbures. Deux tiers de ces projets étaient d'ailleurs orientés vers une injection du CO₂ à des fins de récupération assistée du pétrole (Krüger, 2017).

L'innovation bas-carbone dans le secteur des transports

L'innovation bas-carbone dans le secteur des transports est **principalement orientée vers le secteur du transport routier**. On peut observer la dynamique d'innovation dans ce secteur sur le graphique 12 qui rapporte le flux annuel d'inventions bas-carbone produites. Les trois autres secteurs, soit les transports ferroviaire, aéronautique et maritime, sont rassemblés au sein de la catégorie autres transports. Il ressort de ce graphique que depuis le début des années 1990 l'innovation bas-carbone dans le secteur du transport routier suit une dynamique qui lui est propre et laisse loin derrière les autres secteurs.

Graphique 12 :
Dynamiques
d'innovation
bas-carbone
dans le
secteur du
transport

Source :
PATSTAT



35

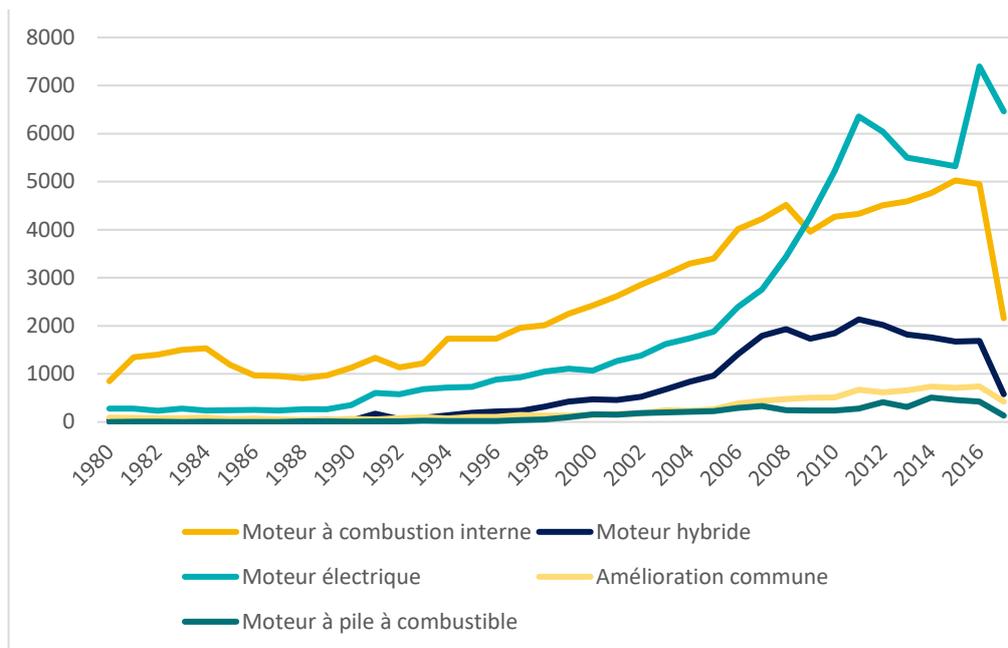
La comparaison du nombre d'inventions dans le secteur routier et les autres secteurs peut néanmoins induire en erreur. En effet le secteur du transport routier propose une diversité des produits plus forte dans les secteurs des transports aéronautiques, ferroviaires et maritimes. Cette diversité explique le plus grand nombre d'inventions bas-carbone produites, alors que les inventions développées dans les autres secteurs doivent s'intégrer à des systèmes techniques complexes et sujets à une forte inertie. Cela explique que si le nombre d'inventions bas-carbone dans les autres secteurs des transports est moindre, elles sont en moyenne protégées dans un plus grand nombre de pays que les inventions bas-carbone dans le secteur routier.

Le transport routier

La classification technologique des inventions nous permet de diviser l'innovation bas-carbone dans le secteur routier en quatre technologies : (1) l'efficacité des moteurs à combustion interne, (2) les moteurs hybrides, (3) les moteurs électriques et (4) les moteurs à pile à combustible. À ces quatre technologies s'ajoute une cinquième qui rassemble les inventions qui bénéficient à l'efficacité des quatre technologies précitées (progrès réalisés dans le domaine de l'aérodynamisme par exemple). Le compte annuel du nombre d'inventions produites chaque année dans ces technologies est représenté sur le graphique 13.

Graphique 13 : Évolutions des flux d'inventions bas-carbone dans les techniques du transport routier

Source : PATSTAT



L'innovation bas-carbone dans le secteur du transport routier s'est longtemps limitée à une amélioration de l'efficacité des moteurs à combustion interne, à l'amélioration de leurs propriétés techniques, à la récupération d'énergie dans ces moteurs pour la réutiliser, au traitement de l'échappement ou encore à l'utilisation de carburants alternatifs. L'innovation dans le véhicule électrique est initialement corrélée à celle dans le domaine du moteur à combustion interne puis connaît une forte accélération en 2005 (hausse de la production d'inventions dans cette technologie).

36

Au sein de ce groupe de technologies, celle du moteur à pile à combustible se distingue. Le rythme de production d'inventions dans ce secteur reste relativement faible, mais elles sont en moyenne protégées dans un plus grand nombre de pays ce qui signale des anticipations optimistes de la part des acteurs du secteur quant au futur marché pour cette technologie. On rapporte dans le tableau ci-dessous la taille moyenne des familles de brevets protégeant les inventions produites dans les technologies du transport routier entre 2000 et 2017.

| | Moteur à combustion interne | Moteur hybride | Moteur électrique | Moteur à pile à combustible | Améliorations communes |
|--|-----------------------------|----------------|-------------------|-----------------------------|------------------------|
| Taille moyenne des familles de brevets protégeant les inventions (2000-2017) | 2 | 2,1 | 1,9 | 2,9 | 2 |

Le fait que les inventions dans le domaine des moteurs à pile à combustible soient protégées, en moyenne, dans plus de pays que les autres inventions bas-carbone dans le secteur du transport routier illustre le caractère potentiellement disruptif de cette technologie. Si ce dernier est désormais largement évoqué dans le débat public, il est pertinent de revenir sur sa signification exacte. Une innovation disruptive est faiblement compétitive du point de vue coûts. Son intérêt réside dans le fait qu'elle propose un ensemble d'attributs nouveaux à ses adoptants. Une innovation disruptive ne vient pas se substituer à une ancienne génération de technologies pour répondre à une demande existante, elle crée son marché.

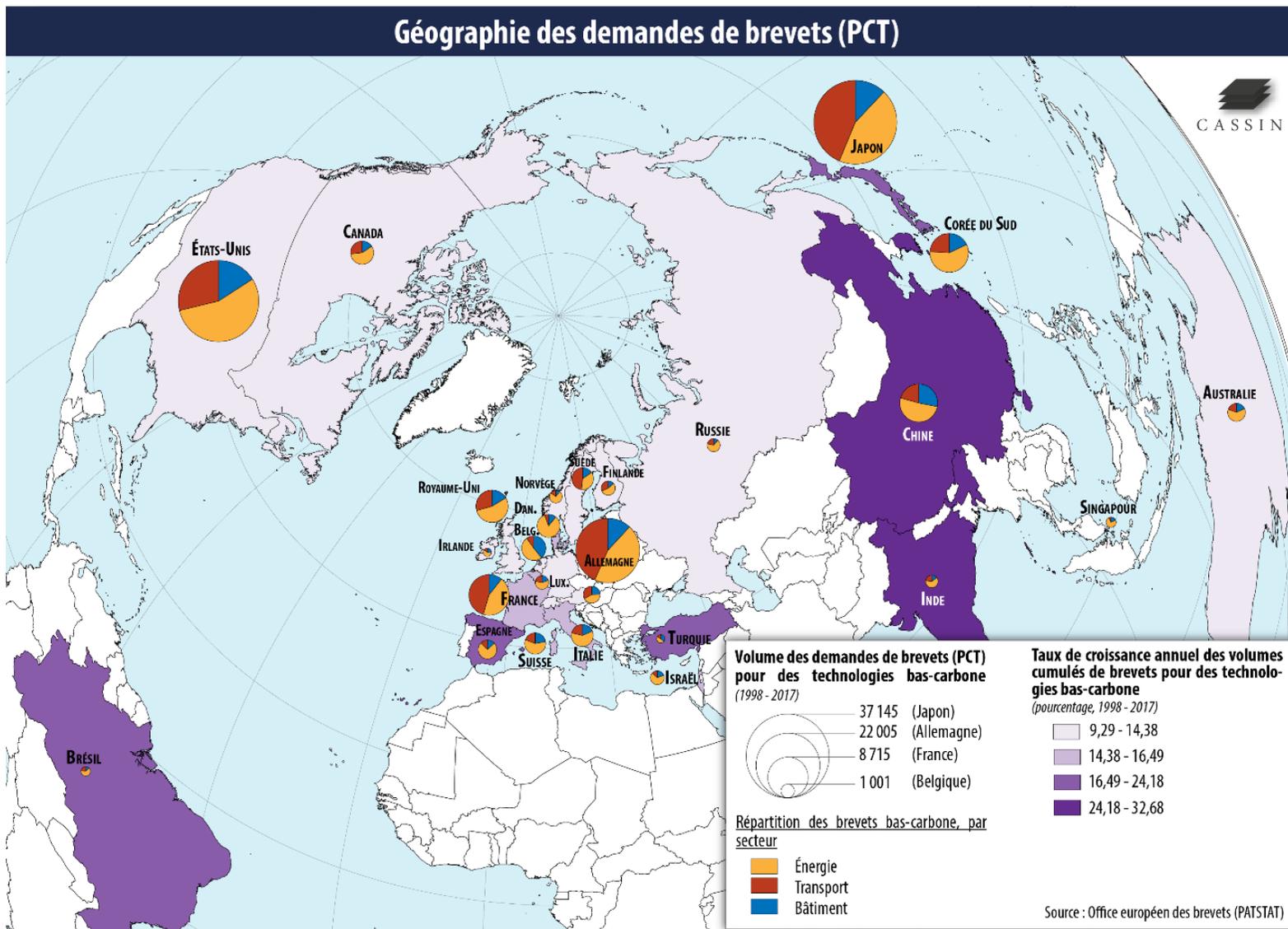
On comprend alors que **le véhicule à pile à combustible n'est pas, en soi, disruptif** puisqu'il propose des attributs assez semblables aux autres technologies de véhicules. C'est la mise en place d'un système énergétique qui repose sur l'utilisation de l'hydrogène qui peut s'avérer disruptif, et le véhicule à pile à combustible pourrait s'affirmer dans ce contexte comme une application à la mobilité de cette évolution technique. Les brevets déposés dans le domaine du véhicule à pile à combustible s'apparentent donc à des options retenues par les acteurs économiques qui seront privilégiées à condition qu'un système énergétique fondé sur l'hydrogène se mette en place. Une analyse de l'innovation dans le secteur de l'hydrogène apporte donc un complément d'information dans l'étude de son application au transport routier (voir encadré 1).

Encadré 1 : Dynamiques d'innovation dans la filière hydrogène : l'absence de vision systémique ?

La classification technologique des inventions brevetées permet de distinguer trois catégories technologiques en lien avec l'utilisation de l'hydrogène : sa production, sa distribution et son stockage. À l'échelle mondiale, peu de nouvelles inventions sont brevetées dans ces domaines avant 1997. La production d'inventions dans la production et le stockage d'hydrogène connaît ensuite une forte accélération jusqu'en 2003, passant d'une cinquantaine d'inventions produites annuellement dans chacun de ces secteurs en 1997 à 330 (stockage) et 261 (production) en 2003. Le nombre d'inventions produites dans le secteur de la production d'hydrogène continuera d'augmenter pour atteindre un maximum de 1 043 inventions produites en 2016, tandis que, dans le domaine du stockage, ce chiffre plafonnera autour de 300. Parallèlement, la production d'inventions dans le domaine de la distribution d'hydrogène ne dépassera jamais plus de 20 inventions produites annuellement entre 1980 et 2017. **Pour résumer, entre 1997 et 2017 les inventions dans le secteur de l'hydrogène dédiées à sa production représentent 61 % du total, contre 37,5 % pour les activités de stockage et 1,5 % pour les activités de distribution.**

Ces trois activités de la filière hydrogène font donc l'objet d'efforts de R&D très inégaux à l'échelle mondiale et les trajectoires d'innovation semblent totalement décorrélées. On peut, dès lors, douter de la capacité de l'hydrogène à devenir un vecteur énergétique utilisé à l'échelle systémique pour pallier les limites des énergies non-pilotables et parvenir à décarboner le secteur du transport. Cette déconnexion apparente entre les trois activités qui constituent la filière rappelle l'expérience du CCUS et ses échecs. Certains analystes ont en effet considéré que le développement de la technologie du CCUS avait constitué une décennie perdue résumée par le décalage criant entre les espoirs placés dans cette technologie et ses échecs techniques (Hirschhausen et al., 2012). Parmi les facteurs qui expliquent la lenteur de la réaction des parties prenantes, les auteurs insistent sur le fait que les activités de capture, de transport et de stockage étaient existantes et maîtrisées par les acteurs de la filière. Cette maîtrise a naturellement conduit les parties prenantes à penser que la combinaison de ces éléments ne constituerait pas en soi une barrière au développement de la filière. Pourtant, c'est cette combinaison qui a fait défaut et qui n'existe toujours pas à l'échelle commerciale. La filière de l'hydrogène devra faire face au même défi consistant à mettre en relation des activités distinctes, arrivées à des degrés de maturité différents, au sein d'un système énergétique nouveau. Dans ce contexte, le rôle de la puissance publique en tant que coordinateur est crucial.

LES SPÉCIALISATIONS TECHNOLOGIQUES RELATIVES DES PRINCIPAUX PAYS INNOVATEURS



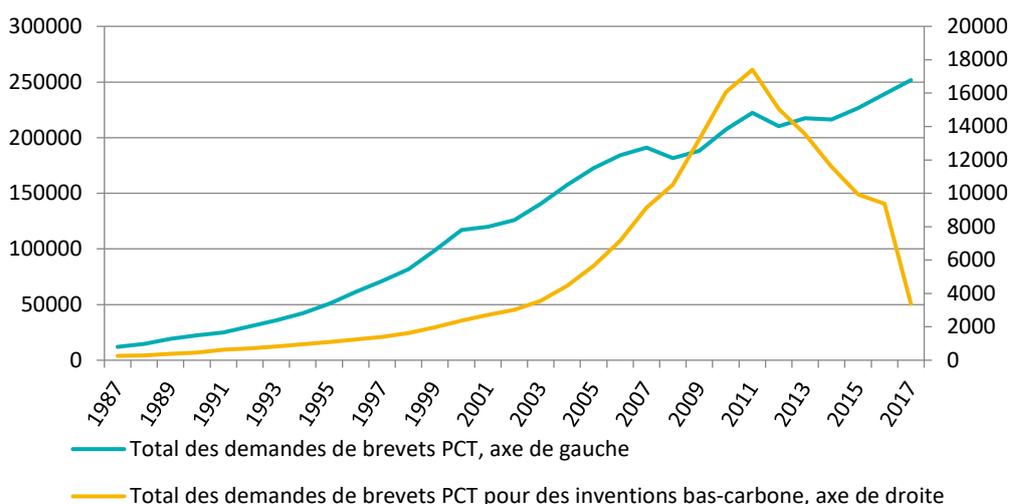
Comme nous le précisons ci-dessus, notre analyse des spécialisations techniques relatives dans les principaux pays innovateurs est construite sur l'utilisation des données de demandes de brevets PCT.

Le déclin de l'innovation bas-carbone

La sensibilité de l'innovation bas-carbone au prix des hydrocarbures a entraîné un déclin de l'innovation bas-carbone qui débute en 2011, année durant laquelle les prix du pétrole ont cessé de croître avant de chuter en 2014. On peut saisir l'ampleur du ralentissement de l'innovation bas-carbone en comparant le nombre de demandes de brevets PCT déposées pour des technologies bas-carbone et les comparer avec les demandes déposées pour des inventions dans l'ensemble des techniques.

Graphique 14 :
L'essoufflement
de l'innovation
bas-carbone

Source : PATSTAT



Les cours du pétrole ne sont pas le seul facteur expliquant ce rapide déclin de l'innovation bas-carbone. En 2011, le Japon est le pays qui demande le plus de brevets PCT pour des inventions bas-carbone. Parmi les conséquences de l'accident de Fukushima figure la baisse subite des demandes de brevets PCT dans les secteurs bas-carbone. La baisse du prix du pétrole réduira ensuite les incitations de l'économie japonaise à retrouver son dynamisme dans les technologies bas-carbone.

Encadré 2 : Mesurer la spécialisation technique relative d'un pays

Un indice largement utilisé permettant de mesurer la spécialisation technique d'un pays dans une technologie, relativement à l'ensemble de son activité d'innovation, est l'indice d'Avantage Technique Révélé (ATR). Il est défini comme le ratio entre le poids d'un pays dans les demandes de brevets PCT déposées dans une technologie et le poids de ce même pays dans l'ensemble des demandes de brevets PCT déposées durant la même période, toutes technologies confondues. Cet indicateur est adapté aux comparaisons internationales car il permet de tenir compte des différences de propension à breveter qui existent d'un pays à l'autre et qui ne sont pas liées à sa performance d'innovation. L'indice est ensuite normalisé. Un indice supérieur à 0 indique ainsi qu'un pays est spécialisé dans une technologie, relativement à l'ensemble de son activité d'innovation. Inversement, un indice négatif indique au contraire que cette technologie est relativement moins développée que les autres technologies développées par le pays en question.

Les sections suivantes sont dédiées à l'analyse des spécialisations techniques relatives d'un échantillon de dix pays. Ces dix pays sont ceux qui en 2020, selon les prédictions du FMI, auront les plus forts PIB en parité de pouvoir d'achat. Nous excluons de cette liste l'Indonésie, qui dépose peu de brevets, pour inclure la Corée du Sud qui suit une stratégie efficace de construction d'un leadership technologique, y compris dans les technologies bas-carbone.

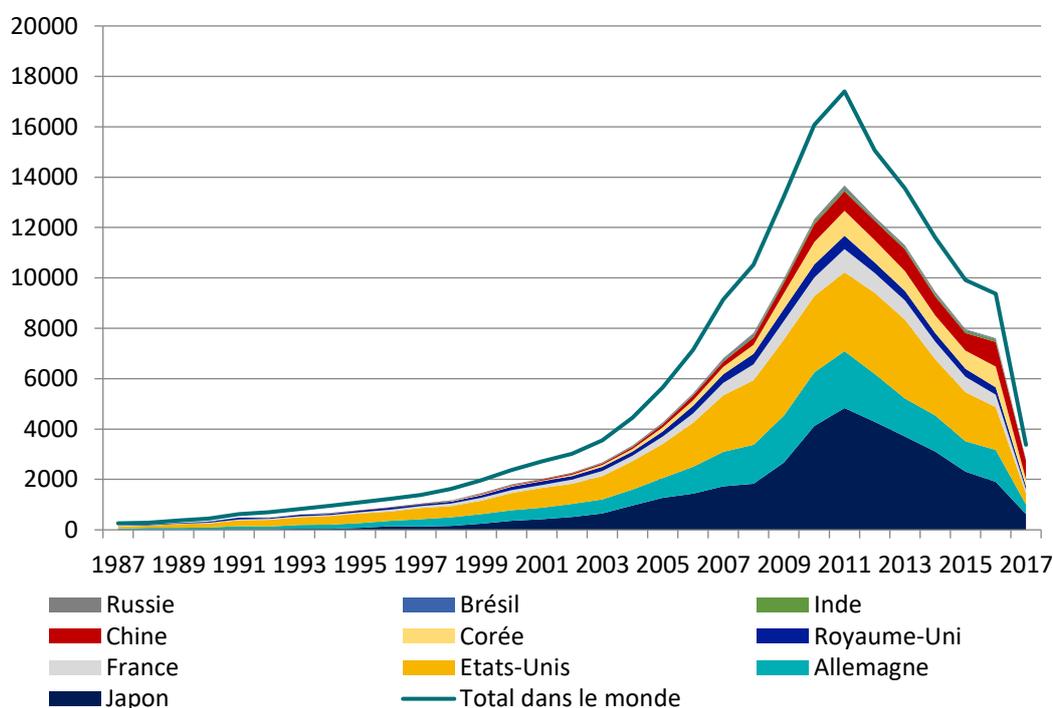
Nous représentons sur le graphique 14 le nombre de demandes pour des brevets PCT sur des inventions bas-carbone de la part de ces dix pays et rapportons également le compte total de ces demandes, tous pays confondus. Ces pays représentent 78 % des demandes de brevets PCT pour des inventions bas-carbone effectuées entre 1990 et 2017, dernière année complète de la base de données utilisée. Les brevets PCT pour des inventions bas-carbone sont demandés principalement par les États-Unis, le Japon et l'Allemagne.

Une nouvelle géoéconomie des brevets bas-carbone s'esquisse néanmoins depuis 2011 puisque la Corée du Sud et la Chine s'affirment comme des acteurs majeurs de ce secteur. La Corée du Sud a accusé une baisse relativement faible du nombre de ses demandes de brevets PCT bas-carbone tandis que la Chine est parvenue, à contre-courant des autres économies, à maintenir voire augmenter le nombre de ses demandes d'année en année. L'analyse des spécialisations techniques relatives de ces pays distinguera donc deux périodes : les années 2000-2011 pendant lesquelles l'innovation bas-carbone est menée principalement par les pays européens, le Japon et les États-Unis ; et les années 2012-2017 qui voient se mettre en place un nouveau régime d'innovation bas-carbone.

40

Graphique 15 : Flux annuels des inventions bas-carbone produites par les leaders du secteur

Source : PATSTAT



Les grands pays innovateurs : Allemagne, Japon et États-Unis

L'Allemagne, le Japon et les États-Unis représentent 58 % des demandes de brevets bas-carbone PCT entre 1990 et 2017. Le Japon s'est très tôt orienté vers le développement des énergies renouvelables pour renforcer sa sécurité énergétique à la suite des chocs pétroliers. Il a privilégié

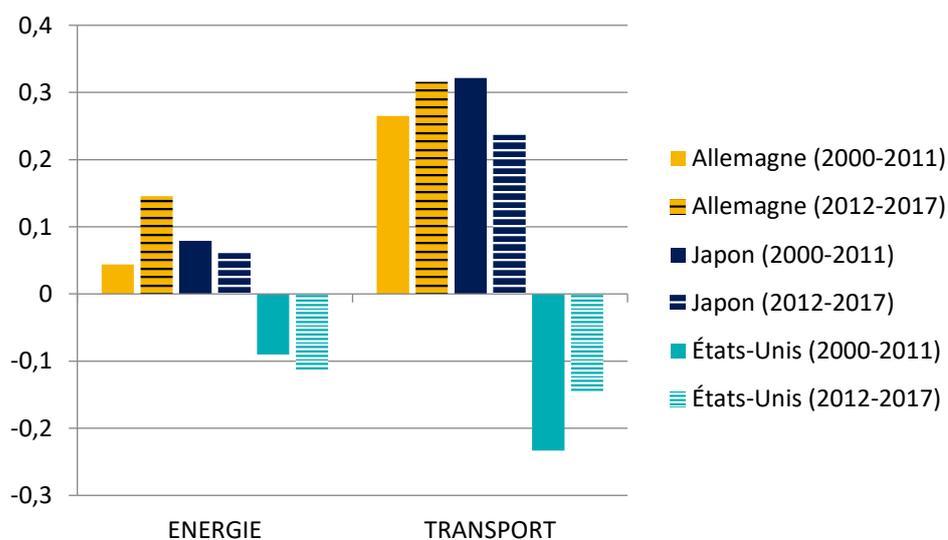
la technologie du solaire PV et a été le pays le plus spécialisé dans cette filière entre 1992 et 2001, avant d'être rattrapé par certains pays européens entre 2002 et 2008 puis par Taïwan et la Corée du Sud après 2009 (Bonnet et al., 2019).

C'est également pour améliorer sa sécurité énergétique que l'Allemagne s'oriente vers les énergies renouvelables. L'accident de Tchernobyl renforcera cette volonté et conduira le gouvernement à mettre en place les premiers grands programmes de déploiement des énergies solaire PV et éolienne. Aux États-Unis, les politiques de soutien par la demande aux énergies renouvelables varient d'un État à l'autre et le pays n'est pas parvenu à construire de réel leadership dans une technologie bas-carbone. Par exemple, 990 millions d'euros ont été investis dans la R&D dans le domaine de l'éolien entre 2000 et 2016. Ces ressources financières ont été très tôt dirigées vers le développement de turbines multi-MW et ont, dans les faits, bénéficié principalement au secteur américain de l'aérospatial. Ce financement de la R&D s'est avéré assez peu efficace (Lewis et Wiser, 2007) et explique la sous-spécialisation relative de ce pays dans le secteur de l'éolien terrestre.

Les indices d'ATR sont calculés pour ces trois pays, sur les périodes 2000-2011 et 2012-2017, dans les deux grandes catégories d'innovation bas-carbone : l'énergie et le transport.

Graphique 16 :
Spécialisations relatives
dans les secteurs
d'application
(Allemagne, États-Unis
et Japon)

Source : PATSTAT



Entre 2000 et 2011, le Japon et l'Allemagne présentaient des profils similaires : une forte spécialisation dans le secteur des transports et une spécialisation intermédiaire dans le secteur de l'énergie.

Après 2011, les demandes de brevets PCT de la part du Japon, toutes technologies confondues, plafonnent avant de repartir à la hausse en 2016. Les secteurs des technologies bas-carbone pâtissent plus que les autres de ce ralentissement de l'activité d'innovation au Japon, d'où la baisse de la spécialisation relative du Japon durant la période 2012-2017 dans les trois secteurs.

L'Allemagne parvient au contraire, durant la période 2012-2017, à renforcer sa spécialisation relative dans les secteurs de l'énergie et des transports. Pourtant la crise financière de 2008 a fortement impacté les secteurs de l'innovation en Allemagne. Comme c'est le cas pour la France,

le nombre de demandes de brevets PCT en provenance d'Allemagne, toutes technologies confondues, est resté assez stable d'une année sur l'autre depuis 2008 alors qu'il suivait une tendance croissante avant la crise. Les technologies bas-carbone destinées aux secteurs des transports et de l'énergie ont donc pris une importance de plus en plus grande dans l'activité d'innovation de l'Allemagne depuis 2011, relativement aux technologies conventionnelles.

L'analyse des indices d'ATR de l'Allemagne pour la période 2012-2017 fait ressortir plusieurs résultats :

- Le pays est relativement spécialisé dans les domaines de l'hydrogène (indice de 0,27) et des technologies des énergies renouvelables (0,16) ;
- Des indices proches de zéro pour les technologies du CCUS et du stockage d'énergie pointent son absence de spécialisation relative dans ces domaines ;
- La sortie du nucléaire amorcée par l'Allemagne se traduit dans les données de brevets par une forte sous-spécialisation relative dans cette technologie (indice de -0,35) ;
- L'Allemagne est relativement spécialisée dans le transport ferroviaire et routier, et au contraire sous-spécialisée dans le maritime et l'aéronautique.

Dans le secteur du transport routier, l'Allemagne est spécialisée dans l'ensemble des technologies de propulsion. Pourtant, c'est dans le véhicule à pile à combustible que la spécialisation est la plus forte (indice de 0,52). **L'hydrogène est donc devenu une technologie prioritaire pour les secteurs de l'innovation en Allemagne** qui se spécialise dans le développement de ses applications tant au secteur de l'énergie qu'au secteur des transports. La spécialisation de l'Allemagne dans la technologie de l'hydrogène semble se traduire par un *leadership*, au moins en Europe.

Extraire la totalité des brevets délivrés par l'EPO pour des inventions dans la technologie hydrogène entre 2012 et 2017 permet d'évaluer ce *leadership*. 125 de ces brevets ont été délivrés à l'Allemagne, 95 au Japon, 87 aux États-Unis et 85 à la France - les autres pays en obtiennent moins de 20. Par ailleurs, les dépôts de brevets EPO par l'Allemagne sur la technologie hydrogène sont répartis de manière plus équilibrée entre la production d'hydrogène à base de source non carbonée et de stockage d'hydrogène, quand ceux de ses concurrents précités se focalisent sur le stockage d'hydrogène.

Dans le domaine des énergies renouvelables, c'est dans la technologie éolienne que l'Allemagne s'est spécialisée. Elle présente dans ce domaine un indice d'ATR de 0,38 pour la période 2012-2017. On observe également un certain degré de spécialisation relative dans les technologies du solaire, mais d'une ampleur plus faible.

Toutes technologies confondues, les États-Unis sont le pays qui dépose le plus grand nombre de demandes de brevets PCT. Ils représentaient 28% des demandes cumulées entre 2000 et 2017, se plaçant loin devant le Japon (17%), l'Allemagne (10%) et la Chine (8,3%). Malgré cet écart, le nombre de demandes déposées chaque année par les États-Unis est resté relativement stable depuis la crise financière de 2008 tandis que **le nombre de demandes en provenance de la Chine n'a cessé de croître**, illustrant l'ampleur du rattrapage technologique qu'a connu le pays pendant cette période.

Dans ce contexte, le développement des technologies bas-carbone ne semble pas être une priorité pour les secteurs de l'innovation aux États-Unis. Les indices de spécialisation du pays dans ces technologies sont négatifs. Cela indique que **le poids des États-Unis dans les secteurs bas-carbone est relativement plus faible que dans l'ensemble des technologies brevetables**. Dans les faits, les États-Unis sont relativement spécialisés dans les technologies de l'information et de la communication, les biotechnologies et les nanotechnologies.

Cette sous-spécialisation relative ne doit pas occulter la **qualité technologique des inventions produites par les États-Unis**. La méthode communément employée pour identifier les inventions qui représentent les plus fortes avancées technologiques consiste à se focaliser sur les inventions brevetées à la fois aux États-Unis, au Japon et en Europe. Plus récemment, le rattrapage technologique de la Chine et de la Corée du Sud a poussé les analystes à restreindre encore l'analyse aux inventions dites IP5, c'est à dire brevetées également auprès des offices chinois et coréen (Dernis et al., 2015).

Le compte du nombre d'inventions IP5 produites entre 2011 et 2017 dans les domaines des technologies bas-carbone est rapporté dans le tableau ci-dessous.

| 2011-2017 | Japon | États-Unis | Corée du Sud | Allemagne | France | Royaume-Uni |
|-----------|-------|------------|--------------|-----------|--------|-------------|
| Énergie | 297 | 89 | 226 | 147 | 49 | 13 |
| Transport | 420 | 68 | 177 | 55 | 48 | 11 |
| Bâtiment | 56 | 28 | 18 | 13 | 6 | 9 |

Source : PATSTAT

Les données rapportées dans le tableau ci-dessus indiquent que **les États-Unis n'appartiennent plus au trio des pays les plus innovants dans les secteurs des technologies bas-carbone**. S'ils continuent de produire une part importante des inventions IP5, ils sont largement dépassés par le Japon, la Corée du Sud et l'Allemagne. La réaction de l'innovation bas-carbone au prix du pétrole indique bien que, plus qu'un impératif écologique, le développement technologique de ces secteurs répond à la volonté de gagner en indépendance énergétique et d'acquérir la maîtrise d'une énergie moins coûteuse. Dans ce contexte, l'augmentation de la part des gaz de schiste dans le mix énergétique américain qui débute en 2010 n'est pas étrangère à la dégradation des performances d'innovation du pays dans les secteurs bas-carbone.

Les avantages techniques relatifs de la France et du Royaume-Uni

En comparaison de l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni se sont engagés plus tardivement dans le développement des technologies bas-carbone. Les efforts en direction de ces secteurs s'intensifient durant les années 2010 et l'effort français est bien supérieur à celui du Royaume-Uni. Le tableau ci-dessous indique, pour un panel de pays européens, les dépenses annuelles moyennes de R&D à destination des secteurs des énergies renouvelables ainsi que la part consacrée à ces mêmes technologies dans la R&D totale des secteurs de l'énergie. Deux périodes de temps sont distinguées.

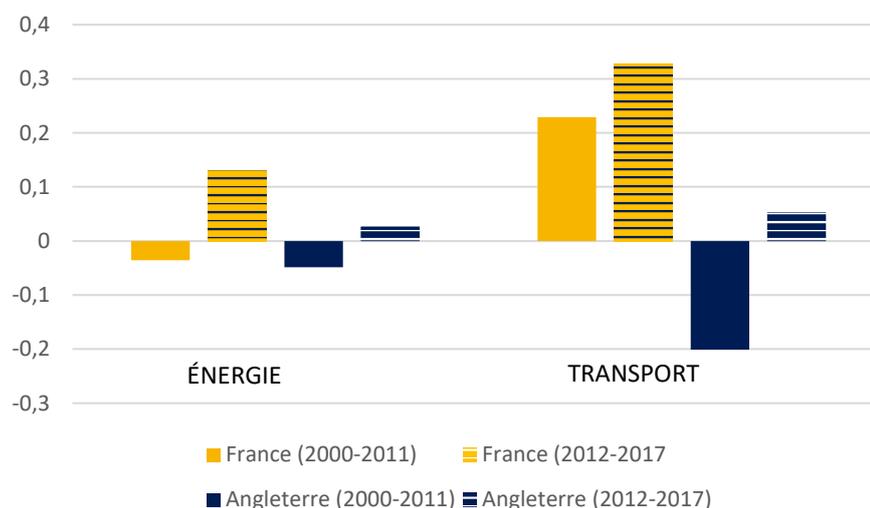
| | | Danemark | Allemagne | France | Royaume-Uni | Espagne |
|--|-----------|----------|-----------|--------|-------------|---------|
| Dépenses annuelles moyennes de R&D (secteurs des ENR), millions d'euros 2017 | 2000-2011 | 41,2 | 130,1 | 72,4 | 64,1 | 45,7 |
| | 2012-2017 | 60,2 | 268,3 | 172 | 81 | 54,1 |
| Parts de la R&D des secteurs de l'énergie destinée aux ENR, en % | 2000-2011 | 44,6 % | 26 % | 7,8 % | 31,8 % | 46,9 % |
| | 2012-2017 | 44,4 % | 30,5 % | 16,1 % | 17,8 % | 50,8 % |

Source : IEA R&D Budgets Database

Durant la période 2000-2011, les dépenses de R&D dans les secteurs des ENR de la France et du Royaume-Uni sont assez proches. Elles représentent pourtant 7,8 % des dépenses totales de R&D dans le secteur de l'énergie en France, contre 31,8 % au Royaume-Uni. Cette différence est bien sûr imputable aux dépenses du secteur français du nucléaire, qui se chiffrent à 540 millions d'euros en moyenne par an entre 2000 et 2011. Passé 2011, qui marque le début du déclin de l'innovation bas-carbone, les stratégies des deux pays divergent. La France intensifie son effort de R&D à destination des secteurs des ENR. Le Royaume-Uni semble miser davantage sur d'autres secteurs en augmentant notamment ses dépenses dans le secteur du nucléaire.

Graphique 17 : Spécialisations relatives dans les secteurs d'application (France et Grande-Bretagne)

Source : PATSTAT



Les deux pays ont en commun d'être parvenus à renforcer leurs spécialisations relatives dans les technologies bas-carbone appliquées à l'énergie et au transport entre 2000 et 2017. Dans le secteur de l'énergie ils présentent des profils de spécialisations techniques très proches si on laisse de côté la technologie nucléaire qui tient un rôle particulier en France (indice d'ATR de 0,43).

Dans les technologies des énergies renouvelables, **la France et le Royaume-Uni ressortent comme très faiblement spécialisés** avec des indices proches de zéro. Ils accusent un retard technologique dans le développement des technologies historiques de ce secteur comme l'éolien et le solaire PV et ont choisi d'orienter leurs efforts vers le développement des technologies des énergies des mers et des déchets-énergie.

De même, les deux pays semblent miser sur les technologies de l'hydrogène et du CCUS. La France ressort comme relativement plus spécialisée que le Royaume-Uni dans la technologie de

l'hydrogène avec un indice d'ATR de 0,39 contre 0,18 pour le Royaume-Uni. Au contraire, le Royaume-Uni est relativement plus spécialisé dans le domaine du CCUS avec un indice d'ATR de 0,24, contre 0,16 pour la France. Dans le domaine du stockage d'énergie, les deux pays présentent encore des profils similaires puisque leurs indices d'ATR proches de zéro pointent à l'absence de spécialisation relative.

Les profils de ces deux pays semblent plus complémentaires dans le domaine des transports. Les demandes de brevets PCT déposées entre 2012 et 2017 indiquent que :

- La France est relativement spécialisée dans le secteur du ferroviaire (0,34), mais sous-spécialisée dans celui du transport maritime (-0,11) ;
- Le Royaume-Uni se trouve dans une situation opposée : une spécialisation relative dans le domaine du transport maritime (0,22) qui contraste avec sa sous-spécialisation dans le ferroviaire (-0,29)

Dans le secteur du transport routier, les deux pays semblent privilégier le développement du véhicule à pile à combustible comme en témoigne leurs indices d'ATR sont de 0,76 pour la France et 0,62 pour le Royaume-Uni. Cette technique est encore à un stade peu avancé de son développement et sa réussite est sujette à une forte incertitude. C'est peut-être ce qui explique que chaque pays s'est parallèlement spécialisé dans une technique de propulsion « moins risquée ». La France, d'une part, est relativement spécialisée dans le développement du véhicule hybride (0,22) tandis que le Royaume-Uni, d'autre part, privilégie la recherche d'efficacité dans le moteur thermique (0,18). Par ailleurs, les deux pays font preuve d'une sous-spécialisation relative dans le domaine du véhicule électrique.

45

La Chine et la Corée du Sud

La Chine et la Corée du Sud se distinguent des autres pays de notre échantillon par le profil de leurs activités d'innovation bas-carbone sur la période 2012-2017.

Pour la première fois en 2010 **la Corée du Sud est devenue le 4^{ème} pays demandant le plus de brevets PCT pour des inventions bas-carbone**, se plaçant après le Japon, les États-Unis et l'Allemagne. Le nombre de ces demandes s'est stabilisé autour de 800 jusqu'en 2016 pour accuser une baisse en 2017.

Le profil d'évolution des demandes de brevets PCT sur des inventions bas-carbone de la Chine est semblable à celui de la Corée du Sud, mais apparaît comme décalé dans le temps. C'est en 2013 que la Chine dépasse la Corée du Sud et devient le 4^{ème} pays qui demande le plus de brevets PCT pour des inventions bas-carbone. Le pays échappe au ralentissement de l'innovation bas-carbone. Le nombre d'inventions bas-carbone produites chaque année par l'Allemagne, le Japon et les États-Unis diminue depuis 2011 et, en 2017, **la Chine devient pour la première fois le pays qui demande le plus de brevets PCT pour des inventions bas-carbone**. Les données qui seront publiées dans les années à venir permettront d'évaluer dans quelle mesure cette hiérarchie nouvelle peut être amenée ou non à se pérenniser.

Le développement des technologies bas-carbone en Chine et en Corée du Sud s'inscrit dans des stratégies nationales de long terme. L'intérêt pour les technologies bas-carbone se manifeste de la part de la Corée du Sud en réponse au premier choc pétrolier. En 1972, le « Promotion Act for

New & Renewable Energy Development, Utilization, and Deployment » amorce le développement et le déploiement des ENR et accorde un soutien croissant à ces technologies jusqu'à la fin des années 2000. Un nouveau plan gouvernemental a été mis en place en 2008 et vise à la fois le développement d'industries nationales dans le domaine des technologies bas-carbone et la pénétration de ces énergies dans le mix énergétique (Chen et Kim, 2014). Un palier a été franchi à l'occasion du 60^e anniversaire de la République de Corée, quand le gouvernement a annoncé un nouveau plan national de « Low Carbon Green Growth » qui définit une stratégie de développement de ces technologies pour les 50 prochaines années à venir. Les technologies prioritaires dans cette stratégie sont l'éolien, le solaire, les piles à combustibles, les cycles combinés à gazéification intégrés et les biocarburants.

Le développement des technologies bas-carbone en Chine est également le résultat d'une stratégie de long-terme amorcée qui se focalise initialement sur la technologie éolienne. On associe généralement le début de la transition énergétique chinoise à la loi de 2005 sur les énergies renouvelables qui se fixe pour objectif de stimuler le déploiement des ENR en vue de créer un marché à l'attention des industries nationales. Pourtant le gouvernement chinois commence la R&D dans le domaine de l'éolien dès les années 1950 (Lew, 2000). Une campagne d'électrification des zones rurales se met en place durant les années 1970 en combinant des petites éoliennes et des panneaux solaires PV. Le gouvernement réalise plus tard la nécessité d'acquérir des technologies étrangères pour accélérer le développement du secteur.

46

Des coopérations internationales avec l'Allemagne, l'Italie, la Suède ou encore les Pays-Bas permettent à la Chine de gagner en compétences dans le secteur du petit éolien. Parallèlement, le gouvernement obtient des licences pour exploiter quatre technologies éoliennes étrangères en provenance des États-Unis, de la France et de la Suède. Par exemple, la Chine obtient une licence de production d'une turbine suédoise de 650 W en 1988. La technologie a ensuite été améliorée et adaptée à des plus petites puissances et deviendra la plus vendue en Chine. **Dès 1996, la Chine devient le pays qui produit le plus de turbines éoliennes dans le monde** (Banque Mondiale, 2006).

La loi sur les énergies renouvelables de 2005 est entrée en application en 2006. Elle combine un soutien généreux par la demande, via le rachat de l'électricité d'origine renouvelable à des tarifs supérieurs au prix de marché, à des obligations de contenus locaux. Les obligations de contenus locaux avaient déjà été utilisées par le gouvernement chinois dans le cadre des appels d'offres pour le déploiement de parcs éoliens dès 2003. L'obligation de contenu local était fixée à 50 %, puis à 70 % en 2004 avant de varier entre 20 et 35 % ensuite.

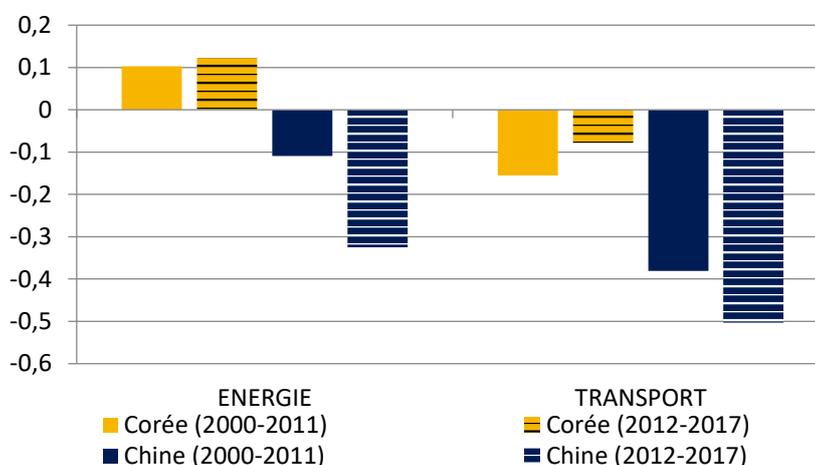
L'octroi des tarifs de rachat subventionnés pour l'électricité produite est, dans le cadre de ces appels à projets, conditionné aux obligations de contenu local pour encourager les firmes étrangères à venir s'implanter sur le territoire. Les firmes européennes ont joué ce jeu, plutôt que d'attaquer la Chine devant l'OMC pour ces obligations de contenus locales, car la combinaison d'incitations mises en place leur permettait d'augmenter leur profit (Bradler, 2010). Par ailleurs, aux obligations de contenu local et aux tarifs de rachat subventionnés s'ajoutaient les crédits des Mécanismes de Développement Propre qui, dans le cadre du Protocole de Kyoto, offraient une incitation supplémentaire aux investisseurs étrangers à venir s'implanter en Chine. Or, l'attribution du crédit nécessite que le projet habilité soit une propriété chinoise ou l'objet d'un partenariat entre la Chine et des investisseurs étrangers.

Une demande profitable, des obligations de contenus locaux, des incitations aux collaborations internationales et, enfin, des subventions massives par les pouvoirs publics chinois aux dépôts de brevets par des entreprises chinoises ont permis **une absorption massive de technologie éolienne étrangère mise ensuite à disposition des champions nationaux chinois**, qui pouvaient par ailleurs compter sur la connaissance accumulée dans le secteur du petit éolien. Les conséquences de cette stratégie sont les suivantes : en 2004 la part de marché des entreprises étrangères dans le secteur de l'éolien chinois était de 75 %, elles sont passées à 42 % en 2007 puis 13 % en 2009. Cette même année, Sinovel, Goldwind et Dongfang représentent quant à eux 63 % du marché chinois de l'éolien (EWEA, 2009).

L'analyse des données de brevets PCT demandés pour des inventions bas-carbone par ces deux pays permet de resituer leurs performances dans ces secteurs dans le contexte plus général de leur activité d'innovation (toutes technologies confondues).

Graphique 18 :
Spécialisations relatives
dans les secteurs
d'application (Chine et
Corée)

Source : PATSTAT

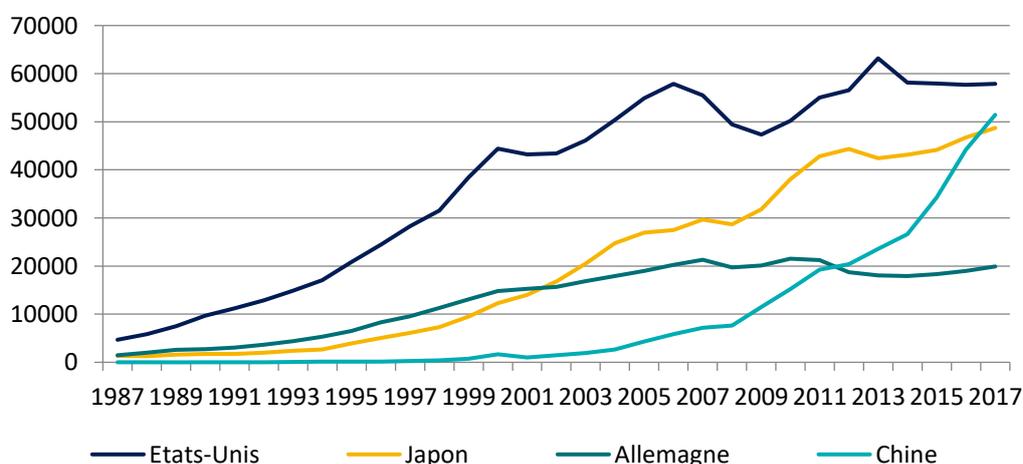


47

La Corée du Sud a développé une spécialisation relative dans l'innovation bas-carbone appliquée au secteur de l'énergie. Pour ce qui est de la Chine, les ATR négatifs dans les deux secteurs d'application durant la période 2012-2017 nous indiquent que son poids, en termes de demandes de brevets PCT, est moindre dans les secteurs bas-carbone que dans l'ensemble des secteurs technologiques. Comme pour les États-Unis, ce résultat s'explique par la très forte activité de dépôts de brevets par la Chine dans les autres technologies.

Graphique 19 :
Flux annuels
d'inventions
brevetées,
toutes
technologies
confondues

Source :
PATSTAT



La différence entre la Chine et les États-Unis est évidente. Les demandes de brevets PCT en provenance des États-Unis connaissent une baisse après la crise financière, avant de revenir au niveau d'avant-crise et de sembler s'y stabiliser. **La Chine, elle, voit depuis 2008 croître le nombre de demandes de brevets PCT déposées chaque année par ses entreprises.** Si la Chine est relativement moins spécialisée dans les technologies bas-carbone durant la période 2012-2017 en comparaison de la période 2000-2011, ce n'est pas parce que l'innovation bas-carbone ralentit, mais simplement qu'elle accélère moins vite que dans les autres secteurs. Nous évaluons dans un premier temps comment la Corée du Sud se spécialise dans l'innovation bas-carbone appliquée au secteur de l'énergie avant de revenir sur le cas de la Chine.

Le tableau ci-dessous comporte les indices d'ATR de la Corée du Sud dans les familles technologiques du secteur de l'énergie, entre 2012 et 2017. Le pays ressort comme relativement spécialisé dans le secteur des ENR, du nucléaire et comme fortement spécialisé dans le domaine du stockage d'énergie. Cette dernière spécialisation est d'autant plus importante que le secteur du stockage d'énergie n'est pas un secteur de niche, comme celui de l'énergie des mers, et qu'une spécialisation relative dans ce secteur indique une très forte activité de dépôt de brevets ; le nombre de demandes de brevets PCT venant de la Corée du Sud dans chacune de ces familles technologiques est indiqué sous les indices de spécialisation.

48

| 2012-2017 | CCUS | Hydrogène | ENR | Nucléaire | Stockage |
|------------------------|--------|-----------|------|-----------|----------|
| ATR normalisé | -0,004 | -0,15 | 0,06 | 0,1 | 0,36 |
| Nombre de demandes PCT | 104 | 87 | 1359 | 1020 | 5524 |

Source : PATSTAT

Dans le domaine des ENR, la Corée du Sud est relativement spécialisée dans le domaine du solaire PV (indice de 0,2), de l'énergie des mers (0,24) et de l'énergie hydraulique (0,21). Les indices de la Corée sont négatifs dans les autres technologies, y compris le secteur de l'éolien.

La spécialisation relative de la Corée du Sud dans la technologie du solaire PV ne traduit pas uniquement un effet quantité. Entre 2012 et 2017, il y a eu dans le monde 113 inventions IP5 produites dans le domaine du solaire PV, 50 l'ont été par la Corée du Sud, 27 par le Japon, 15 par l'Allemagne. **L'écart qu'a creusé la Corée du Sud avec ses concurrents dans le domaine du solaire PV place désormais le pays dans une situation de leadership** qui a notamment été rendu possible par le ralentissement de l'activité d'innovation bas-carbone en Allemagne et au Japon.

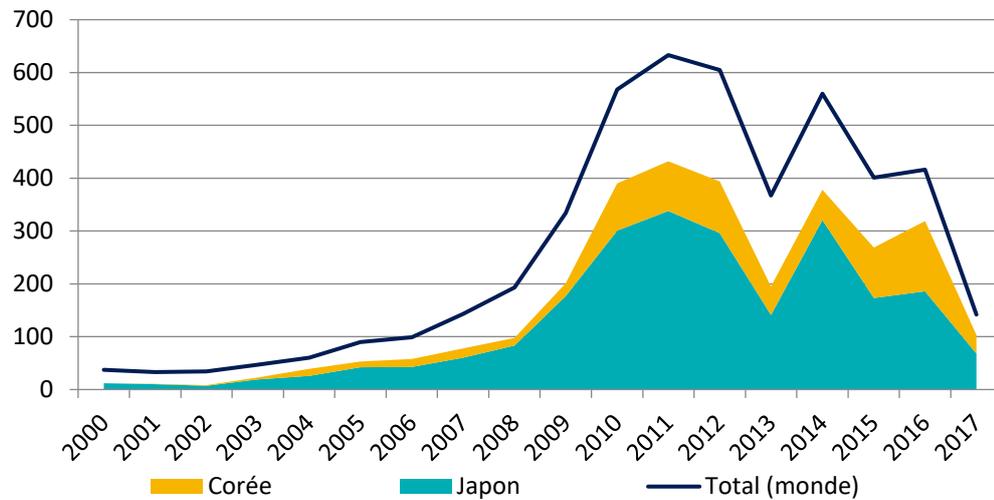
La spécialisation de la Corée du Sud dans le stockage de l'énergie appelle une analyse plus fine des brevets déposés dans les technologies des batteries, ces dernières faisant l'objet de plus de dépôts de brevets que les autres modes de stockage de l'énergie. Entre 2012 et 2017, 19 % des demandes de brevets PCT pour des inventions bas-carbone dans le domaine des batteries provenaient de Corée du Sud, contre 46 % venant du Japon, 17 % des États-Unis et 10,7 % d'Allemagne.

La Corée du Sud et le Japon se positionnent comme les leaders dans les technologies des batteries. On peut observer sur le graphique 20 leurs places respectives dans le flux total de

demandes PCT pour des inventions dans les domaines des batteries lithium, alcaline, plomb-acide et hybride.

Graphique 20 :
L'importance
de la Corée du
Sud et du
Japon dans le
secteur des
batteries

Source :
PATSTAT



La plus petite taille de la Corée du Sud pousse le pays à se spécialiser dans le développement d'un nombre restreint de technologies. À cet égard la différence avec le Japon est importante. L'analyse des indices d'ATR montre que la Corée du Sud privilégie la technologie des batteries lithium-ion dans laquelle elle est fortement spécialisée (indice de 0,56) ; ses indices d'ATR dans les autres technologies des batteries sont négatifs à l'exception de la technologie des batteries hybrides qui présente un indice de 0,22. Le Japon, au contraire, est relativement spécialisé dans toutes les technologies de batteries : lithium-ion (indice de 0,4), alcaline (0,5), plomb-acide (0,38) et hybrides (0,12).

49

Si le Japon produit une quantité d'inventions plus grande dans le domaine des batteries, il semble être à égalité avec la Corée du Sud dans la production des inventions de plus grande valeur économique. L'extraction des inventions IP5 produites entre 2012 et 2017 dans le domaine des batteries indique que le Japon en a produit 75 et la Corée 72. Les autres pays arrivent loin derrière puisque les États-Unis se placent en troisième position avec 8 inventions IP5 et la France avec 7 inventions IP5 dans cette famille technologique.

Comme expliqué plus tôt, le grand nombre de brevets PCT en provenance de la Chine, toutes technologies confondues, rend plus difficile pour ce pays l'interprétation des indices de spécialisation. **L'analyse des données permet néanmoins d'estimer que dans le domaine de l'énergie, le pays privilégie le développement des énergies renouvelables et du nucléaire.** Ses efforts en direction du développement du CCUS, de l'hydrogène et du stockage sont plus faibles. On peut évaluer la compétitivité des entreprises chinoises en comparant quels sont les pays qu'elles privilégient quand elles demandent des brevets à l'étranger.

Le biais domestique des dépôts de brevets en Chine est très fort. Il signifie que les inventeurs chinois brevettent d'abord leurs inventions en Chine avant d'aller les protéger dans des offices étrangers. De plus, la quasi-totalité des demandes de brevets auprès de l'office chinois sont déposées par des Chinois ; cette part atteint en 2018 90,4 % (WIPO report 2018). Même si les informations sur la nationalité des demandeurs ne sont pas référencées pour les brevets délivrés par l'office chinois, nous pouvons inférer la nationalité d'un détenteur d'une invention en

considérant que si elle a été protégée pour la première fois en Chine, puis dans d'autres pays, son détenteur a de très grandes chances d'être de nationalité chinoise. Cette hypothèse nous permet d'identifier quels sont les marchés privilégiés par les inventeurs chinois dans le domaine des énergies renouvelables. Nous rapportons cette information dans le tableau suivant qui contient la distribution géographique des brevets demandés entre 2012 et 2017 pour des inventions dans le domaine des énergies renouvelables dont on peut considérer qu'ils appartiennent à des entreprises chinoises.

| 2012-2017 | États-Unis | Europe (EPO) | Japon | Australie | Corée du Sud | Taiwan | Canada | RdM |
|---|------------|--------------|-------|-----------|--------------|--------|--------|--------|
| Poids du pays destinataire des demandes de brevets sur des inventions chinoises (ENR) | 35,2 % | 15,9 % | 7,9 % | 7,8 % | 7 % | 6 % | 3,5 % | 16,7 % |

Source : PATSTAT

Ces chiffres concernent principalement des inventions produites dans le solaire PV et l'éolien. **La Chine protège donc ses inventions principalement dans les pays consommateurs comme les États-Unis et les pays européens.** L'importance des États-Unis s'explique également par le fait que le coût d'acquisition d'un brevet auprès de l'USPTO est plus faible qu'auprès de l'EPO.

50

Dans le domaine du nucléaire, les demandes de brevets de la part d'entreprises chinoises sont moins nombreuses. Entre 2012 et 2017 elles concernaient principalement le Royaume-Uni (22 demandes), les États-Unis (18 demandes), l'Afrique du Sud (9 demandes), l'Europe (6 demandes) et l'Argentine (6 demandes). Les demandes semblent donc être déposées soit pour protéger les inventions chinoises lors des opérations d'installation de centrales, soit dans des pays en concurrence directe dans le développement de cette technologie.

Brésil, Inde et Russie : la priorité donnée à l'énergie

Entre 2000 et 2017, le Brésil, la Russie et l'Inde sont les pays de notre échantillon qui déposent le moins de brevets PCT, toutes technologies confondues. Ils se placent également en dernières positions dans les secteurs des inventions bas-carbone.

Le **Brésil est un pays qui présente une faible activité d'innovation dans les technologies bas-carbone.** La seule dans laquelle on peut en effet identifier une forme de spécialisation relative de la part de ce pays est celle des bio-carburants. Et même dans cette filière, **le Brésil peine à concurrencer les grands pays innovateurs.** Les États-Unis avaient produit 50% des inventions IP5 classées dans la technologie des bio-carburants et brevetées entre 2012 et 2017 tandis que le Brésil n'en avait produit aucune.

L'Inde présente un profil intéressant puisque le pays semble réaliser des efforts pour développer un large éventail de technologies bas-carbone dans le secteur de l'énergie : le CCUS, les énergies renouvelables et l'hydrogène. C'est une stratégie ambitieuse car ces technologies sont également les cibles d'importants efforts de R&D de la part des pays les plus innovants. Il semble que malgré le nombre important de demandes de brevets PCT dans ces technologies, relativement aux demandes en provenance de l'Inde toutes technologies confondues, le pays ne parvient pas à développer d'inventions à la pointe de ces technologies. En effet, l'Inde n'a pas produit une seule invention IP5 dans les secteurs des énergies renouvelables entre 2012 et 2017.

Le secteur de l'éolien indien est une illustration des difficultés de l'Inde à construire un leadership. La firme indienne Suzlon avait fait partie des leaders du marché, parvenant à devenir la 6^e plus grande productrice d'éoliennes dans le monde en 2014. Elle avait accumulé une dette importante suite à la crise financière de 2008 et, après plusieurs échecs, son cours boursier a commencé à rapidement chuter. Si elle reste un producteur et un installateur important de turbines éoliennes, sa santé financière ne lui laisse qu'une marge de manœuvre très réduite pour relancer ses investissements en R&D.

Le cas de la Russie est particulier puisque sa spécialisation relative dans le domaine de l'énergie bas-carbone est entièrement imputable à sa spécialisation dans la technologie du nucléaire, dont nous traitons dans l'analyse de la filière nucléaire. Les ATR de la Russie sont négatifs dans les domaines du CCUS, de l'hydrogène, des ENR ou encore du stockage d'énergie. Le pays témoigne d'une **très forte spécialisation relative dans la technologie du nucléaire durant la période 2012-2017** avec un ATR normalisé de 0,88. Cette spécialisation s'accompagne de réussites concrètes puisque, comme nous le soulignons, le pays est le seul à être parvenu entre 2014 et 2017 à obtenir plus de brevets pour des inventions dans la technologie des réactions à fission nucléaire et à protéger, en moyenne, ces inventions dans un plus grand nombre de pays en comparaison de la période 2010-2013.

FOCUS 1 : LES INTERACTIONS ENTRE LES ÉTATS-UNIS, L'EUROPE ET LA CHINE DANS LA FILIÈRE ÉOLIENNE

51

Il n'existe pas de marché mondial de l'éolien, puisque les demandes régionales valorisent différemment les caractéristiques d'une turbine éolienne (puissance, adaptabilité au réseau, fonctionnement à des vents faibles, etc.). Il faut ajouter à cela l'importance des coûts de transport des turbines qui pousse les producteurs d'équipements à s'implanter directement dans les zones dans lesquelles ils souhaitent vendre. Ces dynamiques régionales étaient d'une importance secondaire quand le marché était encore jeune, au début des années 2000, et que l'avance technologique prise par les équipementiers européens permettait de compenser certains coûts associés à la standardisation de la technologie. Désormais, la segmentation géographique du marché est plus forte et n'est pas imputable uniquement au coût de transport mais bien à des dynamiques technologiques tractées par les demandes régionales.

Comme nous l'expliquons dans la première section de ce rapport, les éoliennes peuvent être classées en deux grandes catégories : celles à boîtes de vitesse et celles à entraînement direct, ces dernières utilisant de plus en plus souvent des générateurs à aimants permanents.

La technologie qui a dominé le secteur de l'éolien durant les années 2000, aussi bien sur les marchés européens, nord-américain et asiatique, a été la technologie à boîte de vitesse. Les anciennes générations de cette technologie correspondaient aux modèles produits par Micon, Vestas et Suzlon. L'introduction de la double alimentation a été une avancée majeure avec des modèles comme les turbines Vestas V90, Gamesa G80 et General Electric GE 1.5.

La segmentation géographique du marché de l'éolien se faisait alors selon la nationalité des équipements, sauf dans le cas du marché asiatique. **En Europe, les mécanismes de soutien par la demande ont permis à l'Allemagne, au Danemark et à l'Espagne de profiter de leurs marchés nationaux et de ceux de leurs voisins.** En 2008, 94% et 93% de la puissance éolienne installée en

Italie et au Portugal provenaient de turbines fabriquées par 7 firmes allemandes, espagnoles et danoises. **Aux États-Unis, la politique agressive de General Electric (GE) en matière de propriété industrielle a permis de réguler l'entrée des concurrents sur le marché.** Nous avons rappelé dans le corps de texte comment GE avait pu limiter l'accès au marché à ses concurrents européens à l'aide d'un brevet entre 1992 et 2009. La firme a depuis également attaqué Mitsubishi pour violation de brevet et a gagné son procès en 2012, bloquant ici aussi l'accès au marché américain. Plus récemment, c'est la firme danoise Vestas qui a été attaquée à l'aide du même brevet par GE. Un accord à l'amiable a été trouvé, engageant des compensations financières de Vestas à GE et un partage de technologie entre les deux firmes.

L'évolution du marché asiatique est intéressante car elle montre la réussite de la stratégie chinoise. On observe entre 2005 et 2014 une pénétration de plus en plus forte de la technologie des turbines à entraînement direct sur les marchés européens et asiatiques. La différence majeure réside dans le fait que sur le marché européen, ce sont les turbines à entraînement direct avec des électro-aimants qui dominent très largement le marché. Sur le marché asiatique, la part des turbines à entraînement direct à aimants permanents dans la totalité des turbines installées augmente d'année en année ; le leader de cette technologie étant la firme chinoise Goldwind. L'aspect intéressant est que **la Chine semble avoir mis en place une stratégie payante d'acquisition de licences d'exploitation de technologies développées en Europe.** La firme Goldwind a commencé par acquérir en 1999 une licence auprès d'une petite firme allemande, Jacobs, pour produire des petites turbines. Elle a ensuite acheté une licence auprès d'un des leaders allemands, RE-Power, pour produire des turbines intermédiaires. L'une des conditions du contrat était l'interdiction pour Goldwind d'exporter hors de Chine les turbines produites (Lewis, 2007). Enfin, Goldwind a acheté plusieurs licences à une autre firme allemande, Vensys, pour produire des turbines à entraînement direct. En l'espace de quelques années la firme est parvenue à produire localement presque 100% des composants des turbines. Elle a donc pu être privilégiée dans l'attribution des aides gouvernementales conditionnées aux obligations de contenus locaux et elle assume pleinement dans sa communication sa stratégie d'implanter en Chine des technologies étrangères modernes : deux tiers de ses employés avaient participé à des échanges internationaux ou suivi des formations internationales spécialisées dans ce secteur.

52

Goldwind entre désormais dans une nouvelle étape puisqu'après avoir appris à maîtriser la technologie européenne, **elle peut s'attendre à profiter du monopole chinois sur la production des terres rares qui permettent de produire les aimants permanents nécessaires au fonctionnement des turbines à entraînement direct à aimants permanents.** Entre 2007 et 2013, la technologie des turbines à entraînement direct avec électro-aimants, produites sous licences, a rapidement laissé place à celle utilisant des aimants permanents à terres rares. En 2015, le centre de recherche de l'UE estimait que 23% des turbines installées dans le monde utilisent des aimants permanents à terres rares et anticipe que cette part devrait passer à 41% en 2020 et 72% en 2030.

FOCUS 2 : LA FILIÈRE CHINOISE DU SOLAIRE PV

La stratégie du gouvernement chinois dans le secteur du solaire PV est un peu différente de celle mise en place dans le secteur de l'éolien. Dans ce dernier, la Chine disposait déjà d'un solide socle de connaissance qui lui a permis de plus facilement rattraper son retard. Par ailleurs,

L'importance des coûts de transport dans le secteur de l'éolien entrave la mise en place d'une division internationale du travail trop fragmentée – ce qui n'est pas le cas du solaire PV.

Six étapes se succèdent dans la chaîne de valeur du solaire PV : (1) la R&D, (2) la production des machines-outils nécessaires à la production des cellules et des panneaux PV, (3) la production du poli-silicone, (4) la production des panneaux, (5) l'ajout des composantes de la « Balance-of-system » et (6) l'installation des panneaux. La mise en abscisses de ces étapes et de leurs niveaux de rentabilité en ordonnées donne une courbe en U et la Chine est initialement entrée dans ce secteur par le bas de cette courbe ; soit l'étape de production des panneaux qui présente la plus faible rentabilité mais dans laquelle la Chine pouvait faire jouer l'avantage comparatif du faible coût de sa main-d'œuvre (Zhang et al., 2016). **Cette position, bien qu'initialement peu profitable, lui a permis de progressivement intégrer les étapes en amont et en aval de la chaîne de valeur.**

L'entrée de la Chine dans le segment de la production de panneaux solaires PV s'est faite entre 1998 et 2004. Pendant cette période, la Chine a acheté des machines-outils étrangères, fait former ses travailleurs et recruté de nombreuses personnes ayant accumulé de la connaissance dans le secteur PV en travaillant ou en étudiant à l'étranger. Suntech par exemple, qui était la firme qui produisait le plus de panneaux solaires PV dans le monde en 2005, a été créée en 2001 par un entrepreneur chinois ayant étudié cette technologie en Australie. Il profite à son retour du programme 863 qui lui permet de financer un centre de recherche spécialisé dans le secteur (Sergi, 2011). En seulement trois années la productivité de la firme a été multipliée par douze (Karplus, 2007). La création d'une telle firme en si peu de temps s'explique par l'accès à un financement abondant à un prix dérisoire, de la part du gouvernement central comme des provinces - en l'occurrence celle de Jiangsu pour Suntech. Le gouvernement américain attaquera d'ailleurs en 2011 la Chine pour les aides déguisées versées à la firme. Plus généralement, 61% des membres des directions des trois plus larges firmes du secteur PV avaient travaillé ou étudié à l'étranger (De la Tour, 2011).

53

Alors que durant la première période la Chine importait la plupart des composantes et des machines nécessaires à la production des panneaux solaires, une stratégie d'intégration verticale s'est amorcée en 2005 et permet d'intégrer la production des composantes nécessaires à la manufacture des panneaux, tout en améliorant la marge des entreprises chinoises. À la fin de cette période d'intégration verticale, qui s'étend de 2005 à 2014, les entreprises chinoises ont essayé, sans succès, d'aller plus loin et d'acquérir les technologies étrangères sur la production des machines-outils et du poli-silicone. La plupart des firmes étrangères refusent de s'installer en Chine. Une exception importante est la firme japonaise Ferrotec qui accepte de construire une filiale en Chine pour produire des fourneaux permettant la production de mono et de poli-silicone. Cela, couplé à des pratiques d'ingénierie inverse et aux programmes de R&D menés par les entreprises en partenariat avec les universités chinoises, permet au secteur chinois de réduire considérablement sa dépendance aux imports étrangers. Pendant cette période, la demande intérieure pour le solaire PV est faible, contrairement à celle pour l'éolien. Ce sont les marchés européens qui garantissent des débouchés à la filière chinoise qui misent sur les rendements d'échelle et l'intégration verticale pour faire baisser ses prix de vente. Pour Suntech, les recettes proviennent en 2007 à 51% de ventes allemandes et 35% de ventes espagnoles. La réduction des dispositifs d'aides par la demande qui fera suite à la crise financière en Europe impactera lourdement le secteur du solaire chinois : la firme Suntech a perdu 750 millions d'euros en 2011 et déposé son bilan en 2013.

On estime également que plus de la moitié des PME arrêtent alors de produire (IEA PVPs National Report : China 2012). En réaction, **le gouvernement a substitué la demande intérieure à la demande européenne** en mettant en place un système de tarifs d'achat à l'électricité solaire en 2011. La Chine installe 500 MW de solaire PV en 2010, 12 000 MW en 2013 et 50 000 MW en 2017.

Si la Chine est le leader de la production de panneaux solaire PV, elle accuse encore un retard certain en termes d'innovation. Elle a réussi à intégrer verticalement et à monopoliser les opérations de production de cellules et de panneaux solaires PV. Elle subit une concurrence plus rude dans la production du poli-silicone, étape qui précède la production des cellules. Dans les étapes de R&D et de production de machines-outils, les firmes les plus performantes sont généralement japonaises, américaines et coréennes. De même, dans les étapes en aval qui consistent à intégrer les panneaux aux réseaux électriques, la concurrence est plus intense.

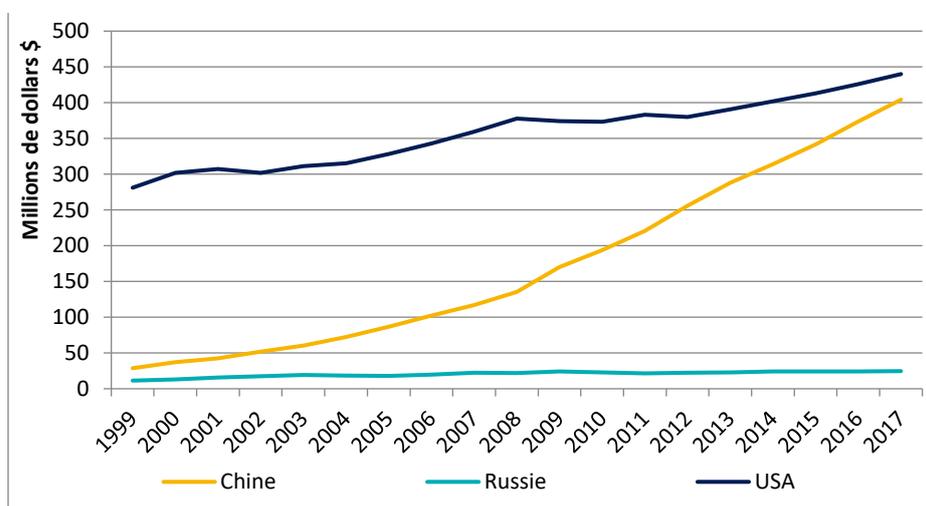
LES SYSTÈMES NATIONAUX D'INNOVATION

COMPARAISON INTERNATIONALE

Les données pour évaluer les systèmes d'innovation russe, chinois et américain sont assez peu nombreuses. On dispose de variables assez générales sur les dépenses de R&D mais les informations sur les systèmes éducatifs sont plus rares. Par exemple, ces trois pays participent moins, en comparaison des pays européens, à l'alimentation de la base de données de l'institut de statistiques de l'UNESCO sur l'éducation et la science. La représentation des dépenses intérieures brutes de R&D, en \$2005 PPA, sur le graphique 21 montre l'ampleur des différences des dynamiques de R&D dans ces trois pays. **La Chine n'est pas, en 2017, le pays qui investit le plus en R&D mais la tendance suivie laisse à penser que ce le sera dans les prochaines années.**

Graphique 21 :
Évolution des
dépenses de R&D
en Chine, en Russie
et aux États-Unis

Source : UNESCO



55

La croissance des dépenses de R&D chinoises est principalement alimentée par le secteur privé. Si les firmes multinationales étrangères ont joué un rôle important lors de la transformation de l'économie chinoise, ce sont désormais les firmes domestiques qui ont pris le relais. On peut observer sur le tableau ci-dessous ces différences dans la structure du financement de la R&D au sein des trois systèmes d'innovation. On rapporte la part de chaque source de financement dans les dépenses de R&D réalisées entre 2012 et 2017. Les valeurs absolues en millions de \$2005 PPA sont indiquées en dessous entre parenthèses.

| | États-Unis | Chine | Russie |
|--|--------------------|-------------------|----------------|
| Financement Public (gouvernement et éducation supérieure) | 29,15 % (714,2) | 21,2 % (407,1) | 69 % (98,1) |
| Financement privé (domestique) | 65,7 % (1611,1) | 78 % (1489,7) | 28 % (39,8) |
| Financement du Reste du Monde | 5,15 % (125,9) | 0,8 % (15,25) | 3 % (4,1) |

Source : UNESCO Institute for statistics

Les trois systèmes d'innovation se distinguent également par leurs performances. Les États-Unis dominent très largement la production d'inventions de grande valeur technologique et économique, mesurée par le flux annuel de production d'inventions IP5. Entre 2008 et 2017, toutes technologies confondues, les États-Unis ont produit 11 441 de ces inventions, contre 1 791 pour la Chine et 38 pour la Russie. Ces différences s'expliquent par la performance du système d'innovation et également par son orientation vers les marchés internationaux. Comme nous le verrons, **l'industrie russe est très peu tournée vers les marchés étrangers**, tandis que les États-Unis souhaitent s'assurer de protéger leur technologie dans les pays les plus innovants pour réduire les risques d'imitation. L'intérêt des secteurs de l'innovation pour les marchés étrangers peut être évalué via la distribution géographique de leurs dépôts de brevets. Une invention est produite dans un pays puis protégée dans des pays étrangers selon les visées commerciales de son détenteur. Nous représentons sur le tableau ci-dessous la part de chaque pays (ou région dans le cas de l'Europe) destinataire des dépôts de brevets sur des inventions produites en Chine, en Russie et aux États-Unis, toutes technologies confondues et pour l'année 2018²⁶.

| | États -Unis | Chine | Russie | EPO | Inde | Japon | Corée | RdM |
|-------------------|-------------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|
| États -Unis (59%) | ... | 19,6 % | 1,6 % | 22,1 % | 5 % | 11,6 % | 6,6 % | 33,3 % |
| Chine (95,7%) | 52,3 % | ... | 1,2 % | 15 % | 4,5 % | 8,5 % | 5 % | 13,2 % |
| Russie (92,4%) | 53,4 % | 9,5 % | ... | 11 % | 3,7 % | 5 % | 3,7 % | 13,6 % |

Source : WIPO Report 2019

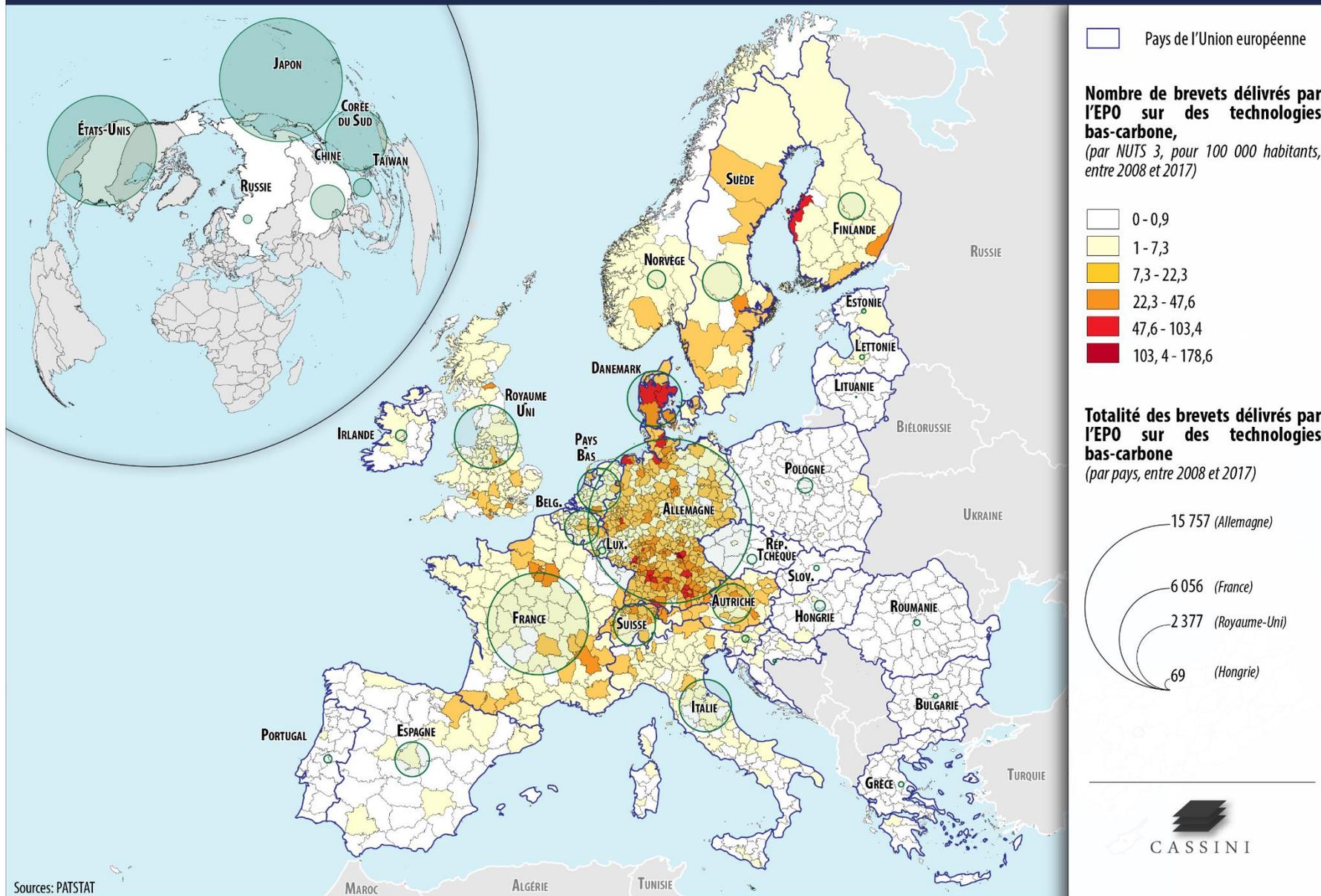
Dans ce tableau, la part des brevets déposés par des agents économiques au sein de l'office de leur nationalité est indiquée entre parenthèses dans la colonne de gauche. **Ainsi les dépôts de brevets par des agents chinois et russes sont majoritairement domestiques** alors que **l'innovation américaine est beaucoup plus tournée vers les marchés étrangers**.

Ce tableau indique la distribution géographique des dépôts de brevets à l'étranger uniquement par des agents économiques russes, chinois et américains. La Chine et la Russie partagent la caractéristique de privilégier comme destinataire l'USPTO (respectivement 52,3 % et 53,4 %). Les dépôts de brevets par des Russes et des Chinois en Europe et au Japon sont bien moins nombreux.

Les dépôts de brevets par des Américains sont plus équitablement distribués dans le monde. Les zones privilégiées sont la Chine et l'Europe qui représentent respectivement 19,6 % et 22,1 % des dépôts de brevets à l'étranger par des Américains en 2018.

²⁶ Ces données proviennent d'une source complémentaire à la base PATSTAT. Nous sommes contraints de présenter des chiffres pour l'ensemble des technologies, ne disposant pas des chiffres pour les technologies bas-carbone uniquement

Géographie des activités d'innovation bas-carbone ayant conduit à l'attribution de brevets délivrés par l'EPO



LE SYSTÈME D'INNOVATION DES ÉTATS-UNIS

Les grandes caractéristiques du système américain

La description du système national d'innovation américain est une tâche difficilement réalisable en quelques pages. On peut souligner trois traits caractéristiques de ce système.

Premièrement, l'abondance des financements militaires à la R&D qui irriguent l'ensemble de l'économie. Entre 1981 et 2010, **la part de la R&D publique orientée vers le secteur de la défense varie entre 50 % et 70 %** (Mowery, 2012). À titre de comparaison, elle se situe autour de 29 % en France en 2008, 6 % en Allemagne et 21 % au Royaume-Uni.

Deuxièmement, on peut souligner l'absence de stratégie centralisée d'innovation. L'orientation des activités de R&D est en large partie organisée par des agences nationales ou fédérales indépendantes qui disposent de fortes capacités de financement et suivent un agenda de R&D qui leur est propre. L'organisation est la suivante : la Chambre des représentants évalue l'efficacité de la dépense fédérale dans tous les secteurs (sauf militaire), le Sénat évalue l'impact du changement technique sur la loi fédérale et la branche exécutive du gouvernement coordonne les programmes de recherche des agences fédérales. Dans les faits, **90 % des fonds fédéraux sont alloués par deux agences**, la NASA et la National Science Foundation, qui disposent d'une forte autonomie.

58

Troisièmement, il faut insister sur le rôle des entreprises dans la commercialisation des inventions financées par le secteur public. À cet égard le rôle du Bayh-Dole Act passé en 1980 est déterminant. Il encourage le dépôt de brevets sur les activités de R&D publique, plutôt que celles-ci ne restent dans le domaine public. Cette loi a amorcé l'essor du secteur des biotechs aux États-Unis dans lequel une partie importante des nouvelles entreprises étaient des spin-offs de laboratoires d'Universités largement financés par les agences publiques (Mazzucato, 2013). Le système d'innovation américain repose donc sur **la conversion de la R&D publique en marchandises via le système de brevet**. À cet égard, l'internationalisation des standards américains de propriété industrielle a été déterminante pour que le pays puisse s'assurer de valoriser ses activités de R&D sur les marchés étrangers.

Le secteur de l'énergie dans le système américain

Les acteurs centraux de l'innovation dans le secteur de l'énergie aux États-Unis sont les laboratoires de recherche du Département de l'Énergie, dont 16 sur 17 sont financés par des fonds fédéraux. À eux tous, ces 17 laboratoires disposaient d'un budget annuel de 14 milliards de dollars en 2015 (Anadon et al., 2016).

Le département a conduit en 2015 un exercice d'évaluation du transfert de technologie de ces laboratoires vers le secteur privé ; considérant que ce transfert est pertinent pour mesurer la valeur sociale des fonds alloués à ces laboratoires. Le résultat est intéressant car il montre, pour plusieurs métriques différentes, que le transfert de technologie résultant de la R&D de ces laboratoires vers les entreprises privées a tendance à diminuer entre 1997 et 2013, dernière année de disponibilité des données. **Cette tendance reflète une déconnexion de plus en plus forte entre les attentes du secteur privé et les activités de ces laboratoires**. Cette déconnexion

s'explique par le décalage de l'horizon temporel des parties prenantes. Les laboratoires se focalisent sur des objectifs de long-terme tandis que le secteur privé est guidé par le court-terme. Or le développement de l'extraction des gaz de schiste aux États-Unis a rapidement modifié les attentes du marché. Une opposition se joue donc entre le secteur privé et le secteur public comme en témoigne un rapport du Congrès publié en 2012. Il rappelle en substance que **l'objectif de transfert de technologie des laboratoires fédéraux ne doit pas être confondu avec une assistance à la commercialisation de ces technologies**. Le rapport insiste sur le fait que ces laboratoires ont été créés pour mener des activités de R&D permettant d'atteindre les objectifs du gouvernement qui n'ont pas de raisons d'être alignés sur ceux du marché²⁷.

LE SYSTÈME D'INNOVATION DE LA RUSSIE

La difficile modernisation de l'industrie russe

Si durant les années 1992-1998, la restructuration de l'économie russe est laissée aux forces du marché, l'État revient sur le devant de la scène en 1999 avec une nouvelle stratégie. Il est important de le souligner puisque ce retour est particulièrement marqué dans le secteur de l'énergie (Vercueil, 2013). Nous pouvons citer le contrôle de l'État retrouvé sur l'entreprise Gazprom ainsi que le démantèlement, par décision de justice, de la firme privée Loukos et la récupération en 2007 d'une bonne part de ses actifs par l'entreprise nationale Rosneft. Cette stratégie est assumée par le gouvernement russe qui a passé une loi en mars 2008 conditionnant à l'autorisation de l'État les prises de participations étrangères dans les entreprises appartenant aux secteurs-clés de l'économie. L'État cherche ainsi à créer des champions nationaux dans les domaines de la construction navale, de l'aéronautique, de l'armement, de la finance et des nouvelles technologies. Ce n'est pas une re-nationalisation aveugle qu'engage le gouvernement russe, mais une sélection réfléchie des secteurs dans lesquels il s'engage. Cette action n'empêchera pas la part de l'emploi privé d'augmenter dans l'économie.

59

En 2008, le gouvernement a franchi une nouvelle étape et lancé sa « **stratégie 2020** » qui a pour **objectif la diversification de la structure industrielle russe**. Elle a bien sûr pour objectif de sortir le pays de sa dépendance aux recettes des hydrocarbures. **Le financement de cette stratégie sera considérablement impacté à la baisse par la crise de 2008** et la réallocation des dépenses publiques vers le traitement de sortie de crise qui laissera peu de ressources financières disponibles à la stratégie 2020. De plus, le pays peut difficilement compter sur les financements étrangers : les flux nets de capitaux deviennent négatifs après 2007.

La crise de 2008 aurait pu conduire à simplement décaler de quelques années la stratégie de modernisation de l'industrie russe. Mais **le pays essuie un nouveau choc suite à l'annexion de la Crimée en mars 2014**. Les sanctions occidentales ont certes contribué au ralentissement de l'économie russe, mais l'incertitude géopolitique nouvelle a également impacté les échanges commerciaux et considérablement fragilisé le rouble. La chute des cours des hydrocarbures à partir de 2014 a réduit l'entrée des devises étrangères et a contribué davantage à la baisse du cours du rouble. La Russie s'est enfoncée en 2014 dans la stagflation (Vercueil, 2015). Dans ce contexte, la modernisation de la structure industrielle russe devient un luxe que l'économie russe peut difficilement se permettre.

²⁷ SCHACHT (W.), *Technology Transfer: Use of Federally Funded Research and Development*, Congressional Research Service, 2012

Forces et faiblesses du système national d'innovation russe

Les forces du SNI russe sont bien connues : un capital humain important en raison de la qualité de son enseignement supérieur et des capacités accumulées dans la recherche scientifique fondamentale héritées de l'Union soviétique. Ce potentiel reste largement sous-exploité en raison de l'importance des barrières administratives et d'institutions publiques de mauvaise qualité. La crise ukrainienne de 2014 évoquée ci-dessus a rendu encore plus difficile l'accès aux financements et l'activité d'innovation au sein du pays semble d'un intérêt secondaire pour les firmes privées. Il en résulte une déconnexion entre la R&D, conduite principalement au sein des organisations de recherche publique, et les besoins de l'industrie. La part des dépenses intérieures brutes de R&D dans le PIB du pays est restée relativement stable entre 2000 et 2014, alors que **la part de la contribution du secteur privé à ces dépenses a connu pendant la même période une lente diminution pour atteindre 27 % en 2014.**

La faible contribution du secteur privé aux dépenses de R&D en Russie s'explique par le fait que moins de 10 % des firmes industrielles du pays s'engagent dans des activités d'innovation technologique. Au sein de ce groupe de firmes innovantes, la part des dépenses de R&D dans leurs ventes totales est passée d'environ 1 % en 1995 à 2 % en 2014 (Global Innovation Index Annual Report, 2016). De plus, **les données d'enquêtes auprès des firmes russes montrent que leurs activités d'innovation sont rarement orientées vers les marchés internationaux.** Cet isolement de la Russie ressort dans les statistiques de brevets. Les demandeurs de brevets d'origine russe ont demandé, en 2018, environ 25 000 brevets à l'office de brevets russe. En comparaison, les demandes réalisées par des entités russes auprès d'autres offices sont très faibles : 226 en Europe, 195 en Chine et 1100 aux États-Unis (WIPO, 2019). La construction d'indices de spécialisation relative sur la base des publications scientifiques produites en Russie montre que les activités de R&D y sont spécialisées dans les secteurs de l'astronomie et de l'astrophysique, de la physique, des géosciences, des mathématiques, de la chimie et des sciences des matériaux.

60

LE SYSTÈME D'INNOVATION DE LA CHINE

La réforme du système d'innovation de la Chine

La transformation du SNI chinois commence en 1978 quand, lors de la Conférence Scientifique Nationale, le progrès technique est défini comme l'un des quatre piliers de la modernisation. Parmi les grands changements que connaît le système, il faut insister sur la décentralisation et la restructuration de 242 instituts de recherche régionaux qui débute à la fin des années 1990. Ces instituts étaient auparavant contrôlés par le gouvernement central et déjà très important dans les activités de R&D chinoises. La réforme de ces instituts les pousse à engager des collaborations avec les entreprises privées. **L'une des réussites de la Chine est d'être parvenue à faire croître la participation du secteur privé aux activités de financement de la R&D.** En 2017, les entreprises privées finançaient 76,5 % des dépenses intérieures brutes de R&D, contre 30,2 % en Russie et 63,6 % aux États-Unis (source : UNESCO).

Ce résultat est imputable à la décentralisation que connurent les instituts régionaux de recherche mais aussi à l'accroissement du capital humain via le système éducatif chinois et la libéralisation du secteur manufacturier qui a attiré de nombreuses firmes étrangères. **Les multinationales**

étrangères ont apporté des financements en Chine mais également des technologies nouvelles intégrées avec succès au système productif chinois. Les firmes étrangères n'étaient pas réticentes à ce transfert de technologie dans la mesure où la capacité d'absorption de la technologie étrangère du système chinois était encore relativement faible. Les firmes domestiques se limitaient à l'imitation sans être en mesure d'améliorer radicalement les technologies étrangères (Boeing et Sanders, 2011). Elles profitaient alors d'une main-d'œuvre relativement peu coûteuse et de marchés encore peu compétitifs et non saturés.

Le système de brevets chinois

Durant cette période de transformation de l'économie chinoise est mis en place le système de propriété intellectuelle avec une première loi de brevet en 1984. Le système est renforcé en 1992 en étendant la durée maximale d'un brevet à 20 ans au lieu de 15, la Chine rejoint ensuite le traité de l'Union internationale de Coopération en matière de Brevets en 1994 avant de réformer à nouveau son système en 2000 en prévision de son entrée dans l'OMC. En 2005, la protection conférée par un brevet chinois atteint un score de 4,08 contre 4,67 au Japon, 4,88 aux États-Unis et 4,67 en France sur une échelle de 5 (Park, 2008). Le système de propriété industrielle chinois a été fortement critiqué et on peut remettre ces critiques en perspectives en se fondant sur l'audition de Mark A. Cohen par la Maison des Représentants le 7 juin 2016. Les principaux points mis en évidence par le directeur de la « China team » de l'USPTO sont :

61

- Contrairement à une croyance répandue, notamment dans les entreprises américaines, **les litiges autour de la propriété industrielle en Chine concernent principalement des entreprises chinoises**. En 2011, la Chine est devenue le pays avec le plus grand nombre de litiges en lien avec la propriété industrielle dont 98 % impliquent des personnes de nationalité chinoise attaquant juridiquement des personnes de nationalité également chinoise.
- Il semble assez clair que le gouvernement chinois, notamment via les programmes de subventions à l'obtention de brevets, cherche à s'assurer que **les brevets délivrés par la Chine le soient à des entités chinoises**. En 2018, **90,4 % des brevets délivrés par la Chine le sont à des inventeurs résidents en Chine**, contre 47,7 % dans le cas des États-Unis et 46,8 % dans le cas de l'Office européen des Brevets.
- Les litiges en lien avec la propriété intellectuelle sont, a priori, d'une importance secondaire pour les entreprises étrangères. Seulement 1,3 % de ces litiges concernaient des étrangers en 2015 et les amendes en jeu sont relativement faibles. Ce n'est pas sur la base des lois de propriété industrielle que des entreprises étrangères ont été condamnées à des amendes records, mais sur la base de la loi antitrust chinoise. Elle a par exemple permis à l'ancienne Commission Nationale à la Planification chinoise d'imposer à Qualcomm une amende de 975 millions de dollars.

Le gouvernement chinois organise donc, via son système de propriété industrielle, un marché de la technologie dynamique dans lequel les brevets sont délivrés principalement à des entreprises chinoises. Qu'importe si **les brevets délivrés à des entreprises chinoises sont, en moyenne, d'une valeur économique plus faible** que ceux délivrés à des entreprises étrangères (Gupeng et Xiangdong, 2012), ils encouragent la recodification de la technologie étrangère dans des standards nationaux et permettent au gouvernement chinois de s'assurer que la technologie

utilisée en Chine soit principalement détenue par des acteurs chinois. Le gouvernement se permet ensuite des interventions ponctuelles quand les intérêts stratégiques sont menacés. C'est ce qu'illustre le cas Vringo (entreprise US) vs. ZTE (entreprise chinoise) qui montre comment le gouvernement chinois a protégé ZTE malgré son utilisation illégale durant 10 ans de la technologie, pourtant brevetée en Chine, développée par Vringo.

Plus généralement, une étude conduite sur un demi-million de brevets chinois nous permet de mieux saisir la stratégie du gouvernement. Il n'y a pas de preuve statistique de traitement discriminant des demandeurs de brevets chinois selon leur nationalité. Néanmoins, quand l'analyse se focalise uniquement sur des demandes de brevets déposées dans **les secteurs technologies stratégiques** (identifiés comme prioritaires par le « National Medium and Long Term Program for Science and Technology Development 2006-2020), alors on obtient la preuve statistique que **l'office des brevets chinois est plus favorable aux inventeurs chinois qu'aux inventeurs étrangers**. Dans les secteurs des télécommunications, des biotechnologies et de l'énergie, une faible discrimination s'observe : un inventeur étranger a en moyenne 4 à 7 % moins de chance que sa demande de brevet soit acceptée (de Rassenfosse et al., 2016).

FOCUS 3 : L'OFFICE DE BREVET AMÉRICAIN

62

L'utilisation stratégique de ses brevets par General Electric pour limiter l'accès au marché américain à ses concurrents dans le domaine de l'éolien interroge sur le fonctionnement de l'office de brevets américain, l'USPTO.

Une comparaison entre l'office européen (EPO), japonais (JPO) et américain (USPTO) montre que c'est dans ce dernier que la procédure d'examen des demandes est la plus laxiste (van Pottelsberghe de la Potterie, 2010). Les brevets sont distribués plus facilement et c'est devant les tribunaux que leur validité est ensuite testée. La loi américaine est d'ailleurs assez vague puisqu'elle dispose que « Quiconque invente ou découvre tout procédé, machine, fabrication ou composition de matières, ou tout perfectionnement nouveau et utile de ceux-ci, peut en obtenir un brevet, sous réserve des conditions et prescriptions du présent article » (35 U.S. Code § 101). C'est donc par jurisprudence qu'a évolué la définition du champ du brevetable aux États-Unis. Au fur et à mesure les cas de jurisprudence élargissent le champ du brevetable aux États-Unis, si bien que désormais les pratiques commerciales elles-mêmes peuvent faire l'objet de dépôt de brevet (le « one-click patent » d'Amazon est par exemple délivré à ce titre). **L'élargissement du champ du brevetable est rétrospectivement analysé comme un problème aux États-Unis** où la multitude de brevets en vigueur contribue à la multiplication des litiges juridiques en lien avec la propriété industrielle.

L'un des critères d'attribution d'un brevet est celui d'inventivité. Selon les pays, la notion d'inventivité se traduit par des pratiques très différentes. L'USPTO considère que le critère d'inventivité est respecté si l'invention n'est pas évidente dans le sens où un professionnel du secteur n'aurait pas pu la produire. Ainsi, il faut que l'invention soit le fruit de recherche et de développement, et non seulement le résultat de l'exercice des compétences d'un professionnel représentatif. En Europe et au Japon, en plus de ne pas être évidente une invention doit représenter un « pas inventive » dont l'appréciation est de la responsabilité des examinateurs.

On comprend qu'une demande brevet engendre des coûts de recherche importants pour le demandeur comme pour l'office. Le rôle des examinateurs est dans ce contexte déterminant. Aux

États-Unis une demande de brevet est généralement suivie par un seul examinateur. Les examinateurs sont relativement mal payés par rapport à ce qu'ils pourraient gagner dans l'industrie et se servent souvent de leur expérience dans l'office comme d'un tremplin pour des carrières mieux rémunérées dans le secteur privé. Au sein de l'USPTO, le turn-over annuel des examinateurs de brevets est de 33% si bien que 80% des examinateurs ont moins de 3 ans d'expérience (*ibid.*). Le processus d'examen est rapide, peu méticuleux et c'est la justice qui est en charge de réparer les erreurs potentiellement réalisées dans l'attribution des brevets. Au contraire, la carrière d'examineur au sein de l'EPO est bien rémunérée et les contrats de travail encouragent les examinateurs à rester auprès de leur employeur si bien que le turn-over observé est faible. Par ailleurs, les examinateurs suivent une formation interne de 5 ans avant d'être pleinement opérationnels et les évaluations sont faites par des équipes d'examineurs.

Le fonctionnement de l'USPTO encourage les utilisations stratégiques de la propriété industrielle, décrites dans le corps de texte, qui permettent de bloquer des concurrents. Il est néanmoins difficile d'évaluer avec certitude dans quelle mesure l'office participe à une stratégie nationale de protectionnisme technologique, les informations sur les refus de délivrance et les litiges étant très difficiles d'accès. Néanmoins, **l'ampleur des litiges juridiques en lien avec la propriété industrielle laisse penser que le rôle de l'État est secondaire** et que ce sont d'avantages les grandes entreprises innovantes et leurs services juridiques qui comptent. Marc A. Cohen, le directeur de la « China team » de l'USPTO dont nous citons l'audition, reconnaît avec une pointe de jalousie lors d'une conférence une différence fondamentale entre l'USPTO et son équivalent chinois : ce dernier est orienté vers les buts définis par le gouvernement en ce qui concerne les technologies stratégiques, ce qui n'est pas le cas aux États-Unis où le marché fait sa loi.

63

FOCUS 4 : RESSOURCES MINÉRALES ET STRATÉGIES « MADE IN CHINA 2025 »

La stratégie "Made in China 2025" mise en place en 2015 par le gouvernement chinois a pour objectif de développer les capacités de production du pays dans les industries des nouvelles technologies telles que les énergies renouvelables, la robotique, l'intelligence artificielle ou encore les nouveaux matériaux.

La réussite de cette stratégie relève de deux enjeux :

- Elle amènera la Chine à modifier ses avantages comparatifs, fondés actuellement sur le faible coût de sa main-d'œuvre, et donc sa place dans le commerce international
- Elle lui permettra de conquérir des étapes de la division internationale du travail à plus forte valeur ajoutée

Dans ce contexte, **le pays anticipe une forte augmentation de ses besoins en matières premières dans les décennies à venir**. En plus d'alimenter les industries chinoises tournées vers l'export, les consommations de matières premières chinoises devront également permettre d'alimenter une demande intérieure en pleine croissance. L'intervalle de temps dont dispose la Chine pour mener à bien ce projet est assez court dans la mesure où elle passera de « société vieillissante » à « société super-vieillissante » en 2035 ; ce qui signifie que plus de 14% de la population aura plus de 65 ans.

Les efforts de la Chine pour développer ses industries des technologies bas-carbone vont considérablement augmenter ses besoins en métaux. Les technologies conventionnelles comme

le nucléaire, les turbines à gaz ou les centrales au charbon requièrent principalement du béton et de l'acier. La plupart des technologies bas-carbone sont beaucoup plus intensives en métaux.

Le cas des terres rares a été largement évoqué dans le débat public. Une éolienne à aimants permanents nécessitera par exemple jusqu'à 25 kg de dysprosium, 186 kg de néodyme et 35 kg de praséodyme par MW de puissance installée (Banque Mondiale, 2017). Les propriétés de certaines terres rares font d'elles des ressources stratégiques pour la production de nouvelles technologies comme les véhicules électriques ou les capteurs intelligents. **Dans ce contexte, le quasi-monopole de la Chine sur la production des terres rares fait craindre qu'elle choisisse de privilégier ses industries domestiques pour, plutôt que d'exporter des matières premières à faible valeur ajoutée, directement exporter les produits qui les incorporent** (Seaman, 2010). Le monde a réalisé cette dépendance notamment suite au conflit entre la Chine et le Japon en 2011, quand les revendications territoriales du Japon sur les îles Senkaku ont conduit la Chine à imposer un embargo sur les exportations de terres rares.

Mais la position dominante de la Chine ne se limite pas aux terres rares. Les travaux du projet GENERATE menés par l'IRIS et l'IFPEN tendent à montrer que l'on sous-estime les risques de criticité qui pèsent sur les métaux dits structurels – c'est-à-dire utilisés pour un grand nombre d'applications comme c'est le cas du cuivre, du fer, du zinc ou de l'aluminium.

64

Le cas du cuivre est parlant. Si on peut imaginer des progrès techniques qui permettront de se passer des terres rares pour produire des technologies bas-carbone, c'est plus difficile à croire pour le cuivre. Il est utilisé dans la totalité des technologies bas-carbone et dans des proportions bien plus grandes que pour les technologies conventionnelles. Dans ce contexte, une transition énergétique permettant de respecter les objectifs de l'Accord de Paris pourrait mener le monde à connaître une situation de criticité pour le cuivre à horizon 2050 (Bonnet et al., 2019).

La stratégie chinoise démontre qu'elle a pleinement conscience de sa dépendance au cuivre et ce *a fortiori* dans le contexte de la stratégie « Made in China 2025 ». En 2015, la Chine représentait 44% des imports mondiaux de cuivre brut dans le monde, et 31% du cuivre raffiné. Elle n'a cessé pourtant d'augmenter ses capacités de raffinage depuis le début des années 2000, tandis qu'elles ont stagné dans le reste du monde. **La Chine est devenue dès 2006 le premier producteur de cuivre raffiné, dépassant ainsi les États-Unis, et a depuis multiplié sa production par 3.**

La Chine développe une forte industrie de raffinage des métaux et s'assure via ses investissements directs à l'étranger (IDE) de sécuriser ses approvisionnements en matières premières. **Ces IDE sont fortement règlementés par le gouvernement chinois et le secteur minier est identifié comme une priorité** (Andreff, 2016). Selon l'American Enterprise Institute, 12% des IDE chinois entre 2005 et 2018 visaient les secteurs des métaux.

ANNEXES

ANNEXE 1 - FOCUS

FOCUS : LES BATTERIES LI-ION

Après les batteries au plomb, qui ont historiquement équipé les voitures électriques, puis celles au Nickel-Cadmium (NiCd) et au Sodium-chlorure de nickel dans les années 1990, ce sont aujourd'hui les batteries Lithium-Ion (Li-ion) qui équipent la quasi-totalité du marché actuel du véhicule électrique, en pleine expansion (densité énergétique élevée, efficacité de Coulomb élevée, masse limitée, bonne fiabilité et faible autodécharge). Cette technologie est dorénavant adoptée par la quasi-totalité des constructeurs automobiles et bénéficie aujourd'hui de larges capacités de production, qui devraient permettre de poursuivre la baisse structurelle des coûts grâce aux économies d'échelle, et ainsi probablement assurer sa domination sur le marché au cours de la prochaine décennie. Toute percée technologique potentielle basée sur d'autres solutions n'aura probablement un impact qu'à moyen et long terme.

65

Actuellement, cinq technologies principales de batteries au lithium existent : oxyde de lithium cobalt (LiCoO₂, en abrégé LCO), oxyde de lithium manganèse (LiMn₂O₄, LMO), phosphate de fer et de lithium (LiFePO₄, LFP), oxyde d'aluminium et de lithium nickel cobalt (LiNiCoAlO₂, NCA) et l'oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt (LiNiMnCoO₂, NMC). Les cellules NMC sont l'option la plus largement utilisée (environ 40% de la part de marché des VE) - Tesla préfère cependant utiliser principalement des cellules NCA. En raison de leur énergie spécifique inférieure, le LFP a trouvé une application plus limitée dans les véhicules hybrides rechargeables et les bus électriques. Les batteries LCO, qui offrent une densité d'énergie élevée mais sont plus chères, ne sont pas utilisées dans le secteur automobile. La R&D actuelle porte sur les batteries lithium-soufre (Li-S), qui offrent une capacité théorique très élevée et l'avantage de réduire les besoins en cobalt et en nickel, ainsi que sur les batteries lithium-air, dont l'énergie spécifique est 5 à 15 fois supérieure aux batteries lithium-ion actuelles.

En plus du marché des véhicules électriques, les batteries Li-ion trouvent également un débouché dans le stockage d'énergie stationnaire en plein développement.

Début 2019, la capacité de fabrication mondiale de batteries au lithium était d'environ 316 GWh, dont les trois quarts se situaient en Chine. De manière générale, le marché des batteries au lithium est dominé par trois pays, la Chine, le Japon et la Corée du Sud, tandis qu'une poignée d'entreprises occupe l'essentiel du marché, dont Samsung SDI, LG Chem, Sanyo-Panasonic, Sony, BYD, etc. Ces dernières années, les acteurs qui opèrent traditionnellement dans la fabrication de batteries, tels que Ningbo Shanshan, Toyota Tsusho et Great Wall Motors, ont montré un intérêt croissant pour les investissements dans l'extraction et le traitement des minéraux en amont. Cette intégration verticale le long de la chaîne de valeur de la batterie vise à réduire l'exposition à la volatilité des prix des matières premières, à soutenir la demande incrémentale de matières premières et à améliorer la chaîne de commercialisation, à l'image de la compagnie Lithium

Australia, dont les opérations couvrent l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement en lithium, de l'exploitation minière au recyclage des piles usagées. De même, des entreprises de différents secteurs dépendant des batteries cherchent à investir ce secteur, à l'image de Total, qui a acquis le fabricant de batteries Saft en 2016 pour 1 milliard d'euros, ou de Dyson, qui a acheté Sakti3.

Deux aspects pourraient cependant freiner l'expansion de cette technologie : les interrogations sur la disponibilité des matériaux nécessaires à sa fabrication (lithium, cobalt, nickel, etc.), et sur les performances environnementales de toute la chaîne d'approvisionnement, y compris le problème du recyclage alors qu'il est actuellement moins coûteux de produire de nouvelles batteries Li-ion que de récupérer le lithium, le cobalt et d'autres matériaux à partir de batteries usagées. Si le cobalt peut représenter un goulot d'étranglement dans la diffusion de la batterie Li-ion, le risque de criticité sur le lithium, dans le cadre de la transition énergétique, demeure faible bien que l'on puisse craindre un décalage à court terme entre la hausse rapide de la demande et l'adaptation de l'offre (Hache et al., 2019).

FOCUS : L'HYDROGÈNE

Produit industriel déjà couramment utilisé comme intrant chimique dans le secteur du raffinage et pour la production de l'ammoniac des engrais nitrates, l'hydrogène peut également être considéré comme une source d'énergie grâce à sa polyvalence. Il peut en effet être utilisé dans une grande variété d'applications, telles que le transport et le chauffage, ou converti en électricité, ou transformé en combustibles à base d'hydrogène, tels que le méthanol et l'ammoniac. Il peut également fournir une option de stockage à long terme pour la production électrique d'origine renouvelable intermittente. Ces solutions n'ont cependant de sens dans le cadre d'une politique de décarbonation que si l'hydrogène est produit sans recours aux énergies fossiles.

66

On distingue trois types d'hydrogène en fonction du procédé de fabrication. Produit à partir de combustibles fossiles (le plus souvent par vaporeformage du gaz naturel) sans captage du CO₂, il est appelé hydrogène gris - l'essentiel de la production mondiale actuelle est de ce type. Fabriqué avec captage du CO₂, c'est de l'hydrogène bleu. Ce n'est que s'il est fabriqué à partir d'énergie renouvelable par électrolyse qu'il peut être considéré comme un vecteur énergétique réellement décarboné : c'est l'hydrogène vert. Aujourd'hui, moins de 1% est de l'hydrogène produit dans le monde est vert, car les coûts de production actuels (entre 4 et 8 US\$/kg) sont encore deux à trois fois plus élevés que pour l'hydrogène bleu²⁸. Avec la baisse attendue des coûts de production de l'hydrogène vert (entre 1 et 2 US\$/kg en 2050) grâce aux effets combinés de la réduction du coût de l'électrolyseur et de l'énergie renouvelable moins chère, cet **écart de coût devrait être comblé au cours des 10 à 15 prochaines années** et faire de l'hydrogène vert une option plausible pour la décarbonation²⁹. De rapides progrès sont en cours, avec notamment la mise en service début 2020 au Japon de la plus grande usine de production d'hydrogène vert au monde avec une capacité d'électrolyseur de 10 MW.

Dans le transport, l'usage le plus fréquemment envisagé pour l'hydrogène est celui de la pile à combustible. Mais il se heurte à de nombreux obstacles dont le coût excessif par rapport aux solutions alternatives (notamment le VE avec batterie, dont les coûts baissent tandis que les

²⁸ AIE, World Energy Outlook, 2019, p. 590.

²⁹ IRENA, Global Renewables Outlook 2020: Energy Transformation 2050, 2020, p.30-31.

capacités de stockage augmentent rapidement³⁰) et la nécessité de développer un vaste réseau de stations de recharge. Pour ces raisons, il semble peu probable que l'hydrogène puisse s'imposer dans le segment des véhicules légers. Pour les poids lourds ou dans la marine, la possibilité d'utiliser l'hydrogène reste une option envisageable.

L'hydrogène peut également être utilisé directement comme carburant (hydrogène liquide à très basse température, utilisée notamment dans le domaine spatial) ou comme intrant pour la production d'ammoniac ou de méthanol, des carburants synthétiques pouvant être utilisés dans la marine ou l'aviation.

Enfin, l'hydrogène est également envisagé comme une solution de stockage de l'électricité. Les technologies power-to-gas (P2G) proposent ainsi de produire de l'hydrogène en exploitant l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables intermittentes (solaire, éolien, etc.). L'hydrogène peut ensuite être utilisé pour reproduire de l'électricité (mais le rendement global de l'opération est faible), ou être mélangé au gaz naturel pour être injecté dans les réseaux de distribution.

Cependant, même en faisant de très optimistes hypothèses sur la baisse des coûts de production de l'hydrogène vert et l'augmentation des capacités d'électrolyse, **aucun scénario n'envisage un rôle central pour l'hydrogène**, qui ne devrait couvrir qu'au mieux 7% à 8% de la demande globale d'énergie à horizon 2050 selon l'AIE et l'IRENA.

ANNEXE 2 – TABLEAU ET SCHÉMA

Tableau 1 :
Classification des technologies par secteur

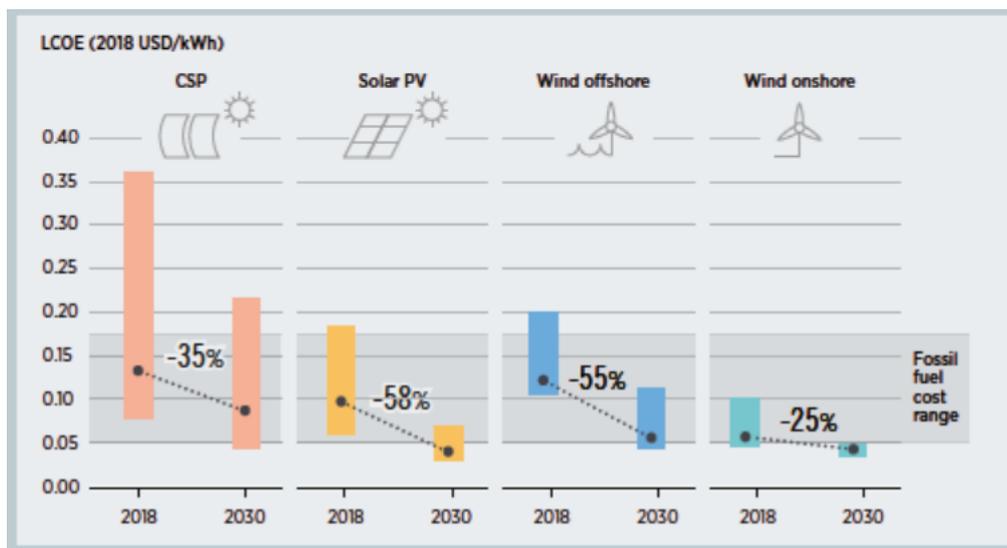
| Énergies | Énergies renouvelables (ENR) | Géothermie |
|----------|------------------------------|--------------------------------|
| | | Énergie hydraulique |
| | | Énergies des mers |
| | | Solaire thermique |
| | | Solaire PV |
| | | Solaire hybride thermique / PV |
| | | Énergie éolienne |
| | | Biocarburants |
| | | Combustion des déchets |
| | | Smart grids (électricité) |

³⁰ L'hydrogène à 70 MPa a une densité d'énergie plus élevée que celle des batteries actuelles : elle est environ 2 à 4 fois plus élevée par unité de volume et environ 150 à 220 fois plus élevée par unité de poids. Voir The Sustainable Development Solutions Network (SDSN) et la Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM), *Roadmap to 2050 A Manual for Nations to Decarbonize by Mid-Century*, 2019, p.84.

| | | |
|--|---|---|
| | Stockage d'énergie | Lithium ion (batterie) |
| | | Alcaline (batterie) |
| | | Plomb/acide (batterie) |
| | | Cellules hybrides (batterie) |
| | | Ultra & super condensateurs |
| | | Stockage thermique |
| | | Stockage par fluide pressurisé |
| | | Stockage d'énergie mécanique |
| | | Pompage-turbinage |
| | Carbon Capture, Utilization and Storage (CCS) | Capture et stockage du CO2 |
| | | Capture et stockage d'autres gaz à effet de serre |
| | Énergie nucléaire | Par fusion nucléaire |
| | | Par fission nucléaire |
| | Hydrogène (énergie) | Stockage (hydrogène) |
| | | Distribution (hydrogène) |
| | | Production par sources non-carbone (hydrogène) |
| | Efficacité de la combustion | Combustion combinée |
| | | Efficacité dans la combustion et la production de chaleur |
| | Transports | Transport routier |
| Véhicule hybride | | |
| Véhicule électrique | | |
| Amélioration commune à tous véhicules | | |
| Applications de la pile à combustible au transport (hydrogène) | | |
| Autres modes de transport | | Transport par rail |
| | | Transport maritime |
| | | Transport aéronautique |

Schéma 1 :

Évolution prévisible des prix des énergies solaire et éolienne (source : IRENA)





Observatoire
de la sécurité des flux
et des matières énergétiques

RAPPORT #4 – Juin 2020

LA COMPÉTITION INTERNATIONALE POUR LES TECHNOLOGIES BAS-CARBONE : VERS UNE NOUVELLE GÉOPOLITIQUE DE L'ÉNERGIE ?

Par

CLÉMENT BONNET

PHILIPPE COPINSCHI

70

L'**Observatoire de la sécurité des flux et des matières énergétiques** est coordonné par l'Institut de relations internationales et stratégiques (IRIS), en consortium avec Enerdata et Cassini, dans le cadre d'un contrat avec la Direction générale des relations internationales et de la stratégie (DGRIS) du ministère des Armées.

Au travers de rapports d'études trimestriels, de séminaires et de travaux cartographiques, l'objectif principal de cet observatoire consiste à analyser les stratégies énergétiques de trois acteurs déterminants : la Chine, les États-Unis et la Russie. Le consortium vise également à :

- Proposer une vision géopolitique des enjeux énergétiques, en lien avec les enjeux de défense et de sécurité ;
- Croiser les approches : géopolitique, économique et sectorielle ;
- S'appuyer sur la complémentarité des outils : analyse qualitative, données économiques et énergétiques, cartographie interactive ;
- Réunir différents réseaux : académique, expertise, public, privé.

L'Observatoire est coordonné par Antoine Diacre, coordinateur de la recherche à l'IRIS, et Bastien Alex, chercheur à l'IRIS, et rassemble une équipe d'une vingtaine de chercheurs et professionnels.