CERI
Centre de recherches internationales

Structuration des filières de la transition énergétique à l'échelle nationale et territoriale : Union européenne, France, Danemark, Allemagne

Étude conduite avec le soutien de

L'Institut pour la recherche de la Caisse des Dépôts

François Bafoil
Rachel Guyet
Gilles Lepesant

Paris - septembre 2019

A propos des auteurs

François Bafoil

est Directeur de recherche au CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) en sociologie, enseignant à Sciences Po et co-directeur du programme du Master in Global Energy Transition and Governance au CIFE (Centre international de formation européenne, Nice/Berlin).

Rachel Guyet

co-dirige le programme du Master in Global Energy Transition and Governance au CIFE (Centre international de formation européenne, Nice/Berlin). Elle enseigne à Sciences Po en sociologie. Elle est membre du réseau européen de recherche sur la précarité énergétique, ENGAGER (European Energy Poverty : Agenda Co-Creation and Knowledge Innovation).

Ses recherches portent sur la dimension locale et sociale de la transition énergétique et notamment sur la précarité énergétique en Europe.

Gilles Lepesant

est Directeur de recherche au CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) en géographie, affecté au Centre Marc Bloch (Berlin). Il est chercheur associé à l'Asian Energy Studies Centre (Hong Kong Baptist University) et enseigne dans le Master in Global Energy Transition and Governance au CIFE (Centre international de formation européenne, Nice/Berlin).

Ses recherches interrogent la dimension territoriale des transformations du secteur de l'énergie en Europe.

Résumé de l'étude

Si les objectifs énoncés pour 2020 par l'UE dans le cadre du Paquet Énergie-Climat de 2009 ne semblent pas hors d'atteinte, la valeur ajoutée de la transition énergétique en termes d'emplois et d'innovation fait débat. L'effort a en effet davantage porté sur les politiques de soutien à la demande que sur une structuration des filières permettant à l'offre européenne de s'imposer.

L'UE comptait dans les différentes filières 1,16 million d'emplois en 2017, soit moins qu'en 2015. Alors que la filière photovoltaïque connait une forte dynamique dans le monde, elle continue de subir des pertes d'emplois. D'autres filières comme la biomasse ou la géothermie poursuivent, elles, leur croissance. L'UE a pris plusieurs initiatives (l'Airbus de la batterie étant la plus significative) mais la valeur ajoutée de la transition énergétique en termes d'emplois demeure faible, un constat d'autant plus préoccupant que les pertes d'emploi liés à la transition énergétique (dans les énergies fossiles, dans le nucléaire, dans la fabrication de voitures thermiques) s'annoncent, elles, conséquentes. Plus que jamais la transition énergétique apparaît comme une transition économique et sociale pour laquelle l'UE a des atouts mais pas de véritable stratégie. La situation varie néanmoins d'un pays à l'autre, du moins dans l'éolien.

Dans le cas de l'éolien marin, la France bénéficie du deuxième domaine maritime au monde, dispose d'un système de formation et de recherche de qualité, d'infrastructures portuaires adaptées mais aucune ferme éolienne marine n'y était encore exploitée commercialement en 2019. Au cours des décennies passées, ses voisins européens en mer du Nord en ont installé près de 5 000 et en ont tiré d'appréciables bénéfices en termes d'innovations et d'emplois. Si les coûts ont baissé et si le cadre juridique se clarifie, les objectifs de production demeurent modestes. L'essor de la filière exigerait un marché dynamique et un positionnement clair sur certains segments de la chaîne de valeur et/ou sur certaines options technologiques spécifiques (l'éolien flottant par exemple).

Les parcs éoliens marins sont concentrés dans le nord (90% des installations déployées dans le monde s'y trouvent) de même que les capacités de production manufacturière. Le Danemark constitue un des piliers de cet espace. Peuplé de 5 millions d'habitants, il a pu en l'espace de 3 décennies non seulement transformer son mix énergétique au profit de l'éolien (même si le charbon y conserve encore un rôle important) mais surtout constituer une filière qui s'impose aujourd'hui sur les marchés européens comme aux États-Unis et en Asie. Loin de répondre à un schéma structuré et pensé a priori, l'émergence de l'écosystème danois a suivi une trajectoire non-linéaire forgée par des rencontres et des opportunités (comme la forte demande momentanée sur le marché californien). Les innovations ont toutefois peu à peu fourni la chair d'un projet industriel qui grâce à des politiques publiques affirmées, s'exporte largement en Europe et hors d'Europe.

L'Allemagne est l'exemple d'un pays ayant soutenu massivement le déploiement d'une technologie (le photovoltaïque) en escomptant des bénéfices à la fois environnementaux et industriels. Ces derniers furent manifestes dans un premier temps avant que la filière ne s'effondre face à la concurrence chinoise. S'agissant de la filière éolienne, l'Allemagne est parvenue à constituer un socle industriel sur la base de ses compétences dans des secteurs préexistants (mécanique par exemple). La mise sur le marché de dispositifs complexes associant énergies renouvelables, gestion intelligente de systèmes et solutions de stockage semble une voie prometteuse permettant à l'Allemagne et à l'Europe de conserver une part significative de la valeur ajoutée. Enfin, l'un des enjeux pour les filières allemandes est de s'inscrire dans les réseaux de firmes mondiaux.

En Bavière, les enjeux énergétiques sont étroitement liés à la fermeture des réacteurs nucléaires et, dans une moindre mesure, à la fin programmée des centrales thermiques à charbon. Loin d'utiliser la transition énergétique comme support d'une stratégie industrielle, la Bavière a opté pour une politique de l'innovation afin de contribuer à la sécurité de son approvisionnement et à répondre à la problématique spécifique de l'acceptation sociale qui freine les projets d'infrastructure énergétique dans ce *Land*. Forte de ses atouts en matière d'innovation, la Bavière utilise la transition énergétique pour se positionner comme pionnière sur les nouveaux enjeux d'intégration de l'offre et de la demande d'énergie.

Synthèse de l'étude

Introduction

Si les objectifs énoncés pour 2020 par l'UE dans le cadre du Paquet Énergie-Climat de 2009 ne semblent pas hors d'atteinte, la valeur ajoutée de la transition énergétique en termes d'emplois et d'innovation fait débat. L'effort a en effet davantage porté sur les politiques de soutien à la demande que sur une structuration des filières permettant à l'offre européenne de s'imposer. Cette recherche vise à éclairer à l'aide de cas concrets les leviers et les obstacles permettant de mieux comprendre la situation des industries liées à la transition énergétique.

Un état des lieux à l'échelle européenne est dressé afin de préciser les initiatives prises par l'Union européenne pour soutenir les filières industrielles et la recherche-développement relevant de la transition énergétique.

Le volet national aborde, lui, les dynamiques à l'œuvre depuis les débuts de la transition énergétique dans le secteur de l'éolien (marin principalement) dans 2 pays, la France et le Danemark. Dans le cas de la France, une analyse de l'offre est menée conjointement avec une analyse du marché compte-tenu des lacunes du cadre juridique qui ont conduit à de nombreux retards dans la mise en place des premiers parcs éoliens.

L'éolien comme le photovoltaïque sont abordés dans le cas de l'Allemagne dont l'étude s'appuie sur un examen plus particulier du cas de la Bavière.

Union européenne : une transition pauvre en emplois

L'UE n'a pas encore surmonté, en termes d'emplois, la crise des années 2008-2009. Elle comptait dans les différentes filières 1,16 million d'emplois en 2017, soit moins qu'en 2015. Alors que la filière photovoltaïque connait une forte dynamique dans le monde, elle continue de subir des pertes d'emplois. D'autres filières comme la biomasse ou la géothermie poursuivent, elles, leur croissance. Avec environ 110 000 salariés, la filière photovoltaïque a perdu 2/3 de ses emplois depuis 2011, des emplois principalement concentrés en Allemagne, au Royaume-Uni, en France et en Italie (67% des emplois au total). La crise fut brutale en Allemagne où le secteur photovoltaïque avait été mis à contribution pour réindustrialiser les *Länder* de l'Est. La crise du secteur se doubla ainsi de crises locales. La filière éolienne occupe une place significative (près de 350 000 emplois en 2017) dont 43% en Allemagne mais connaît également une érosion de ses effectifs

L'UE a été distancée pour la plupart des segments de la chaîne de valeur du photovoltaïque grand public. Dans le secteur de l'éolien, la suprématie chinoise est moins affirmée mais la forte croissance de Goldwind a imposé très rapidement la Chine comme un des principaux acteurs mondiaux. Les Européens (notamment avec Siemens-Gamesa et Vestas) obtiennent toutefois une part de marché sensiblement supérieure à ce qu'elle est dans le cas des panneaux solaires ou du stockage de l'énergie. Sur les 10 plus grands fabricants de turbines dans le monde, 5 sont basés dans l'UE. L'Europe tire ici profit des initiatives prises par certains États européens pour développer cette filière (notamment l'Allemagne, le Danemark, le Royaume-Uni) dont le résultat est qu'en 2018 90% des éoliennes marines installées dans le monde le sont dans les eaux européennes.

Vers une renaissance de la politique industrielle européenne ?

Le 13 septembre 2017, la Commission européenne publia une Communication intitulée : « Investing In a smart, innovative and sustainable Industry. A renewed EU Industrial policy strategy ». Cette Communication faisait suite à celle de 2014 ("Towards an industrial

renaissance") qui suggérait l'idée d'une acceptation par la Commission de la notion politique industrielle. Protéger le marché intérieur par des barrières commerciales ne saurait être la panacée. L'UE y a d'ailleurs renoncé. L'innovation de rupture semble l'unique option qui s'offre à l'UE pour préserver des capacités de production. L'atout de l'UE serait en somme l'innovation adossée à des systèmes de financement permettant le passage aussi rapide que possible à la phase industrielle. Sans nécessiter de changements règlementaires, une meilleure sensibilisation du public à l'exigence de qualité serait également bienvenue. L'établissement de labels pourrait constituer une alternative séduisante.

Certains acteurs préservent leur compétitivité en valorisant des stratégies de niche et/ou sont impliqués de manière plus ou moins directe dans la chaîne de valeur qu'il s'agisse de machines-outils, de composants de chaîne de production ou encore de systèmes électriques à forte valeur ajoutée.

Le vice-président de la Commission Maroš Šefčovic présenta en octobre 2017 l'« Airbus de la batterie » comme une réplique du projet aéronautique des années 60 où plusieurs acteurs industriels disposaient de technologies avancées mais ne purent s'inscrire dans un projet plus global qu'avec l'initiative de constituer Airbus. Or, les besoins en batteries s'annoncent significatifs. L'initiative prévoit des financements nouveaux (d'un montant de 2,2 milliards €), ambitionne de susciter la création de 20 « Gigafactories », d'encourager des partenariats entre acteurs du secteur.

Face à la croissance des besoins en batteries alimentée par l'essor des énergies renouvelables (et par d'autres secteurs comme l'informatique), la capacité des industriels à disposer des métaux dits critiques inquiète en raison des risques d'épuisement de la ressource et de la politique de la Chine (qui fournit environ 90% des terres rares). Le rôle des métaux critiques est volontiers apparenté à celui du charbon au XIXème siècle et à celui du pétrole dans la géopolitique contemporaine. La thèse est confortée par la formule prêtée à Deng Xiaoping en 1992 : « le Moyen-Orient a le pétrole, la Chine a les terres rares »[1].

La question des métaux critiques est pourtant plus complexe que ne le laisse penser la formule. Établir des scénarios pour les matériaux nécessaires à la transition énergétique relève de la gageure tant les facteurs à prendre en compte sont nombreux (évolution de la demande, stratégie chinoise, tensions géopolitiques, spéculation, opposition des populations locales, règlementations environnementales, etc.) et tant les évolutions technologiques peuvent être soudaines. L'enjeu pour les Européens est de structurer rapidement des filières de recyclage afin à la fois de limiter la dépendance à l'égard des fournisseurs étrangers et d'améliorer le bilan carbone des produits commercialisés.

Les premières implantations de sites de production de batteries en Europe de la part de constructeurs asiatiques témoignent du fait que les conditions financières et réglementaires propres à l'UE ne sont pas dirimantes, qu'une production sur le sol européen dans des conditions de rentabilité satisfaisantes est possible. Pourtant, la valeur ajoutée de la transition énergétique en termes d'emplois demeure faible, un constat d'autant plus préoccupant que les pertes d'emploi liés à la transition énergétique (dans les énergies fossiles, dans le nucléaire, dans la fabrication de voitures thermiques) s'annoncent, elles, conséquentes. Plus que jamais la transition énergétique apparaît comme une transition économique et sociale pour laquelle l'UE a des atouts mais pas de véritable stratégie.

La situation varie néanmoins d'un pays à l'autre, du moins dans l'éolien. Dans le cas de l'éolien marin, plusieurs pays disposaient aux débuts de la transition d'un contexte favorable pour structurer une filière : un littoral de plusieurs centaines de kilomètres, une recherche-développement de qualité et un tissu industriel disposant des compétences requises. La France, le Royaume-Uni, l'Espagne, l'Allemagne, le Danemark, la Suède, la Pologne faisaient ainsi partie des pays en situation d'innover et de produire dans ce secteur.

[1] La formule aurait été prononcée en 1987 à l'occasion d'une tournée dans le sud du pays. http://nm.cnr.cn/nmzt/60dq/tjnmg/200704/t20070412_504442760.html. Consulté le 12 juin 2017.

L'éolien marin en France : un cadre juridique stabilisé, des objectifs modestes

La France bénéficie du deuxième domaine maritime au monde avec 20 000 kms environ de côtes, dispose d'un système de formation et de recherche de qualité, d'infrastructures portuaires adaptées mais aucune ferme éolienne marine n'y était encore exploitée commercialement en 2019. Au cours des décennies passées, ses voisins européens en mer du Nord en ont installé près de 5 000 et en ont tiré d'appréciables bénéfices en termes d'innovations et d'emplois.

Quatre facteurs majeurs apparaissent devoir être soulignés : le coût, le cadre juridique, les objectifs de production, la politique industrielle.

S'agissant du coût, la renégociation en 2018 des prix agréés en 2011 et 2014 a illustré la baisse sensible rendue possible par les évolutions technologiques et les économies d'échelles auxquelles sont parvenues les industriels (européens pour la plupart). En mer du Nord, plusieurs projets ont été adoptés ces dernières années pour des tarifs voisins de 50€/MWh, loin des 190€ agréés au début des années 2000. Force est de constater que le zéro subvention n'est plus une utopie mais une réalité appelée à se généraliser en Europe. Invoquer le coût de l'éolien marin pour justifier des ambitions modestes en la matière ne tient plus.

S'agissant du cadre juridique, les recours se sont multipliés entraînant de nombreux retards. Les changements législatifs introduits en 2018 et les avis rendus au cours de l'été 2019 par le Conseil d'État sont néanmoins de nature à changer la donne. La sécurité juridique qui faisait défaut semble enfin pouvoir être garantie. S'agit-il pour autant d'une phase nouvelle pour la filière de l'éolien marin lui permettant de se structurer et de susciter enfin innovations et créations d'emplois dans les régions du littoral ?

Probablement pas tant les objectifs de production avancés dans la PPE (Programmation pluriannuelle de l'énergie) soumise à discussion en 2019 sont modestes. Le potentiel technique théorique estimé en France pour l'éolien en mer est donc de 80 GW répartis sur une superficie de 10 000 km2 pour l'éolien posé, et de 140 GW répartis sur une superficie de 25 000 km2 pour l'éolien flottant, moins dépendant de la bathymétrie et de la distance à la côte. Malgré des conditions favorables, l'État ne prévoit dans la PPE que le déploiement d'une puissance de 4,7 à 5,2 GW d'ici 2028, chiffre qui comprend les 3,1 GW actuellement en cours de déploiement en France. Les volumes d'appels d'offres engagés diminueront même après 2024 alors que la compétitivité de la filière sera encore améliorée.

Enfin la politique industrielle, dont les acteurs français déplorent régulièrement l'absence à l'échelle européenne, n'aura pas jusqu'à ce jour frappé par son efficacité. Les premiers appels d'offre encourageaient des projets contribuant à l'ancrage dans le tissu industriel. Outre que cette approche s'est avérée peu structurante compte-tenu des lacunes du cadre juridique, elle a perdu une partie de son sens depuis le retrait ou le rachat des principaux acteurs français du secteur (AREVA et Alstom). Il reste qu'avec des industriels français ou étrangers, de nouvelles activités peuvent se créer et enrichir le tissu industriel des régions du littoral. Néanmoins, l'industrie de l'éolien marin évolue rapidement, avec notamment une modularisation croissante qui invite à définir certains segments de la chaîne de valeur à privilégier. Des options technologiques spécifiques (l'éolien flottant par exemple) pourraient également être jugées prioritaires afin que la France se forge des positions fortes lesquelles, compte-tenu de ses atouts initiaux, lui semblaient promises aux débuts de l'éolien marin.

Un cluster de l'éolien marin autour de la mer du Nord

Une concentration de production d'électricité à base d'éolien marin s'est d'ores et déjà formée en mer du Nord, incarnée à la fois par de nombreuses fermes éoliennes (90% des installations déployées dans le monde s'y trouvent) et par des capacités de production manufacturière. Le Danemark constitue un des piliers de cet espace centré sur la mer du Nord. En 2015, l'énergie éolienne y couvrait 42% des besoins du pays en électricité, voire 100% certains jours. Le turbinier Vestas, l'entreprise de services Orsted sont leaders mondiaux dans leur secteur et un écosystème

s'est constitué à partir des années 70 qui abrite environ 30 000 emplois et assure 5% des exportations du pays.

Le Danemark a constitué un écosystème devenu leader mondial du secteur

Peuplé de 5 millions d'habitants, le Danemark a pu en l'espace de 3 décennies non seulement transformer son mix énergétique au profit de l'éolien (même si le charbon y conserve encore un rôle important) mais surtout constituer une filière qui s'impose aujourd'hui sur les marchés européens comme aux États-Unis et en Asie. Loin de découler d'une autorité centralisée, les innovations ont beaucoup dû au hasard ou du moins à des rencontres entre pionniers. Loin de répondre à un schéma structuré et pensé a priori, l'émergence de l'écosystème a suivi une trajectoire non-linéaire forgée par des rencontres, des opportunités (comme la forte demande momentanée sur le marché californien). L'écosystème danois ne doit son succès ni à une politique publique pensée sur le long terme, ni à des conditions favorables apparues à un moment donné sur le marché mais plutôt à une série d'initiatives non coordonnées.

Les innovations ont toutefois peu à peu fourni la chair d'un projet industriel qui grâce à des politiques publiques affirmées, s'exporte largement en Europe et hors d'Europe. Le Danemark diffère ici de celui de l'Allemagne. L'Allemagne a une tradition ancienne dans les renouvelables mais ses ambitions se sont affirmées dans le contexte de l'abandon du nucléaire. En revanche, dans le cas du Danemark, les renouvelables ont été considérées comme une ressource privilégiée en raison des fortes réticences d'une part de la population à l'égard du développement d'une filière nucléaire, option initialement privilégiée à la suite du choc pétrolier. En somme, quand la France a répondu au choc pétrolier par la constitution d'un vaste parc nucléaire, le Danemark a, lui, envisagé la même option avant de préférer, sous la pression de l'opinion publique, les énergies renouvelables.

Le mérite de l' État est d'avoir su saisir à temps l'opportunité de constituer une filière prometteuse et d'engager une politique de soutien à la demande en s'appuyant à la fois sur la géographie du pays (forte exposition au vent, plusieurs centaines de kilomètres de côtes) et sur les synergies régionales susceptibles de se développer et de soutenir la transition énergétique (capacités de stockage en Norvège grâce à l'hydroélectricité, échanges substantiels sur l'ensemble de l'Europe du nord grâce au marché Nordpool, interactions avec l'Allemagne du nord, confrontée, elle aussi, à de fortes variations de production).

À terme, les filières danoises sont face à un environnement à la fois porteur et contraignant. Porteur dans le sens où l'éolien marin, pour lequel le pays dispose à la fois de sites d'essais, d'infrastructures performantes, d'un savoir-faire éprouvé, est appelé à devenir un relais de croissance majeur. Contraignant car les marchés les plus dynamiques (notamment en Asie) voient émerger une concurrence inédite, également renforcée sur le continent européen depuis la fusion entre l'Allemand Siemens et l'Espagnol Gamesa.

Après différentes phases qui ont porté la filière au stade de la maturité, la nouvelle étape devrait être caractérisée par :

- le rôle croissant de la « modularisation ». Celle-ci permet de gagner en efficacité et de convoiter les marchés étrangers, surtout ceux qui exigent qu'une part de la valeur ajoutée échoit à leurs propres acteurs industriels,

- de nouveaux positionnements sur la chaîne de valeur. Pour le volet manufacturier, la ligne de partage entre activités internalisées et activités externalisées varie selon les fabricants. À l'export, les industriels danois semblent favoriser l'externalisation des fonctions les moins sensibles et de contracter des partenariats avec des sous-traitants susceptibles de les accompagner sur les différents marchés. Pour le volet services, les développeurs devraient de plus en plus associer des solutions de stockage aux parcs mis en œuvre. Plus généralement, la ligne de partage entre activités manufacturières et activités de service pourrait s'estomper à terme.

En Allemagne, succès industriel dans l'éolien, échec dans le photovoltaïque

D'ici à 2020 les autorités allemandes se sont fixées pour objectif de réduire les émissions de GES de 40% par rapport à 1990, un objectif ambitieux (la France a affiché le même objectif mais à l'horizon 2030) et reconnu comme hors de portée en juin 2018 (pour être ramené à 32%).

Dans le contexte d'une réduction de la part du charbon et du nucléaire, les créations d'emplois induites par le développement des EnR peuvent-elles à terme compenser voire dépasser les pertes dues au déclin concomitant du nucléaire (8 000 emplois directs) et du charbon (30 000 emplois directs) ? Les objectifs ambitieux portés par les autorités invitent-elles à envisager la constitution en Allemagne de filières innovantes et exportatrices, notamment dans l'éolien et le photovoltaïque ?

S'agissant de la filière photovoltaïque, l'Allemagne est l'exemple d'un pays ayant soutenu massivement le déploiement d'une technologie en escomptant des bénéfices à la fois environnementaux et industriels. Ces derniers furent manifestes dans un premier temps avant que la filière ne s'effondre face à la concurrence chinoise. Dans le contexte de mutations technologiques à venir, la question est de savoir si les industriels allemands pourront retrouver grâce aux efforts engagés en R&D un rôle sur le marché allemand et international.

S'agissant de la filière éolienne, l'Allemagne est parvenue à constituer une base industrielle sur la base de ses compétences dans des secteurs préexistants (mécanique par exemple). La remise en cause des tarifs d'achat généreux en Europe, aux États-Unis comme en Chine constitue néanmoins un défi pour l'industrie. Si la mise en œuvre d'appels d'offre en Europe a permis une baisse sensible des coûts pour le consommateur, il n'est pas exclu qu'elle fragilise à terme la filière. Une consolidation du secteur a déjà débuté sur fond d'innovations et de réduction des coûts de production.

Pour le photovoltaïque comme pour l'éolien, l'Allemagne a conduit une politique associant soutien à la demande (à travers notamment les tarifs d'achat) et financement de l'innovation. La filière de l'éolien a bénéficié des atouts traditionnels du tissu industriel allemand, des particularités de cette industrie, du dynamisme du marché national et des initiatives lancées par les acteurs locaux et régionaux des régions littorales pour surmonter les défis de la reconversion des chantiers navals.

Le développement de la filière photovoltaïque aurait pu, lui aussi, contribuer à la reconversion de régions en crise, cette fois-ci au sud de l'ex-RDA. La forte croissance que le secteur connut dans les années 90 et au cours des années 2000 s'est néanmoins heurtée aux moyens mis en œuvre par la concurrence chinoise pour industrialiser à grande échelle la production de panneaux solaires et réduire ainsi les coûts.

La mise sur le marché de dispositifs complexes associant énergies renouvelables, gestion intelligente de systèmes et solutions de stockage semble en revanche une voie prometteuse permettant à l'Allemagne et à l'Europe de conserver une part significative de la valeur ajoutée.

Enfin, l'un des enjeux pour les filières allemandes est de s'inscrire dans les réseaux de firmes mondiaux (global firm networks). En effet, au-delà de la concurrence entre acteurs industriels asiatiques, américains, européens, les logiques de partenariat entre ces derniers ne sont pas à négliger.

À l'instar des coopérations nouées entre industriels allemands et chinois dans le photovoltaïque depuis les années 2000, ces logiques – complexes à déchiffrer en raison des réticences des industriels à préciser l'origine de leurs approvisionnements – invitent à ne pas exagérer l'importance des classements hiérarchisant les turbiniers ou les fabricants de panneaux solaires. Les interactions en matière d'innovation, d'approvisionnements croisés d'un pays à l'autre invitent à appréhender l'ensemble de la chaîne de valeur dans sa complexité et à ne pas se focaliser uniquement sur la nationalité des assembliers.

En Bavière, une approche globale de l'innovation dans le domaine de l'énergie

En Bavière, les enjeux énergétiques sont étroitement liés à la fermeture des réacteurs nucléaires et, dans une moindre mesure, à la fin programmée des centrales thermiques à charbon. Loin d'utiliser la transition énergétique comme support d'une stratégie industrielle, la Bavière a opté pour une politique de l'innovation afin de contribuer à la sécurité de son approvisionnement et à répondre à la problématique spécifique de l'acceptation sociale qui freine les projets d'infrastructure énergétique dans ce *Land*. De tradition innovante, la Bavière utilise la transition énergétique pour se positionner comme pionnière sur les nouveaux enjeux d'intégration de l'offre et de la demande d'énergie.

Plusieurs raisons expliquent ce choix. La Bavière a tiré les leçons de l'échec de la politique industrielle de soutien à la filière solaire et a décidé d'écarter cette approche à ce stade de la transition énergétique d'autant plus que la Bavière connaît le plein emploi et que les entreprises bavaroises sont confrontées à des difficultés de recrutement. Promouvoir l'emploi n'est donc pas au cœur de la stratégie énergétique de la Bavière. Le *Land* est également contraint par les conflits liés au manque d'acceptation sociale de nouvelles infrastructures, notamment des éoliennes et des lignes à haute tension.

Dans le premier cas, une nouvelle règle a été introduite pour agrandir la distance entre les parcs éoliens et les habitations ce qui réduit drastiquement les surfaces susceptibles d'être utilisées pour les fermes éoliennes. Dans le second cas, la Bavière a choisi d'enterrer les nouvelles lignes à haute tension mais les coûts sont importants. Ainsi afin d'éviter la construction de nouvelles infrastructures et limiter le risque de conflit, le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie cherche à déployer une politique de l'innovation afin d'harmoniser offre et demande d'énergie et de réduire la consommation grâce aux nouvelles technologies.

À ce titre, le ministère soutient un cluster dédié aux technologies de l'énergie, notamment l'efficacité énergétique, le stockage et une approche holistique de l'énergie. Ce cluster, composé de centaines d'entreprises, représente un outil de R&D décisif pour la politique énergétique de la Bavière et le rapprochement entre science et industrie. La politique énergétique bavaroise portée par le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie est complétée par une stratégie de recherche et développement qui finance des projets pilote indépendants. A ce rapprochement entre science et industrie s'ajoute la volonté d'impliquer également les communes et de soutenir les start-ups.

La portée de cette politique de l'innovation est difficile à mesurer et reste confrontée à certaines limites telles que la dépendance des projets innovants vis-à-vis des financements publics, le risque de divergence d'intérêts entre l'autorité publique et les entreprises privées. En outre le lien causal entre politique régionale de l'innovation et capacité innovante des entreprises n'est pas aisé à évaluer. Toutefois, quelques indicateurs peuvent permettre d'en mesurer l'impact : c'est le cas par exemple du nombre de brevets déposés dans le secteur énergétique et le nombre de start-ups qui se déploie notamment grâce à l'écosystème munichois. Toutefois le choix de cette stratégie demeure une incertitude quant à sa réussite à long terme.

Principaux enseignements

L'UE est en phase avec ses objectifs pour le déploiement des énergies renouvelables mais une stratégie industrielle européenne s'impose

Entre 2011 et 2017, 2/3 des emplois du secteur photovoltaïque ont disparu en Europe. Si les objectifs énoncés pour 2020 par l'UE dans le cadre du Paquet Énergie-Climat de 2009 ne semblent pas hors d'atteinte, la valeur ajoutée de la transition énergétique en termes d'emplois et d'innovation fait débat. L'effort a en effet davantage porté sur les politiques de soutien à la demande que sur une structuration des filières permettant à l'offre européenne de renforcer sa compétitivité.

En France, l'éolien marin ne peut se développer sans marché intérieur dynamique et sans vision industrielle précise.

La France bénéficie du deuxième domaine maritime au monde avec 20 000 kms environ de côtes, dispose d'un système de formation et de recherche de qualité, d'infrastructures portuaires adaptées mais aucune ferme éolienne marine n'y était encore exploitée commercialement en 2019. Les coûts ont radicalement baissé, le cadre juridique a été clarifié mais les objectifs de production demeurent modestes et la politique industrielle tarde à démontrer son efficacité malgré un engagement des acteurs locaux.

L'innovation nécessite un soutien de l'État mais pas nécessairement une stratégie verticale

L'État a joué un rôle mineur dans la montée en puissance de l'éolien au Danemark. Celle-ci fut le fait d'initiatives isolées dans les campagnes puis de choix effectués à l'échelle des villes. Un écosystème s'est néanmoins forgé qui n'a pas répondu à une injonction de l'État. Il est né d'initiatives isolées émanant d'acteurs peu à peu connectés entre eux dont les innovations ont pu atteindre la maturité grâce aux soutiens au marché progressivement mis en place par les pouvoirs publics, une fois le projet de constituer un parc nucléaire écarté.

L'éolien marin est une opportunité à saisir pour dynamiser le tissu industriel des régions littorales.

La filière de l'éolien a bénéficié des atouts traditionnels du tissu industriel allemand, des particularités de cette industrie, du dynamisme du marché national et des initiatives lancées par les acteurs locaux et régionaux des régions littorales pour surmonter les défis de la reconversion des chantiers navals.

L'importation de panneaux solaires de Chine ne rend pas vaine une stratégie de niche et/ou focalisée sur les segments à forte valeur ajoutée

Le développement de la filière photovoltaïque aurait pu, lui aussi, contribuer à la reconversion de régions en crise, cette fois-ci au sud de l'ex-RDA. La forte croissance que le secteur connut dans les années 90 et au cours des années 2000 s'est néanmoins heurtée aux moyens mis en œuvre par la concurrence chinoise pour industrialiser à grande échelle la production de panneaux solaires et réduire ainsi les coûts. La mise sur le marché de dispositifs complexes associant énergies renouvelables, gestion intelligente de systèmes et solutions de stockage semble en revanche une voie prometteuse permettant à l'Allemagne et à l'Europe de conserver une part significative de la valeur ajoutée.

À l'échelle régionale, une stratégie d'innovation n'est pas nécessairement sectorielle

En Bavière, les enjeux énergétiques sont étroitement liés à la fermeture des réacteurs nucléaires et, dans une moindre mesure, à la fin programmée des centrales thermiques à charbon. Loin d'utiliser la transition énergétique comme support d'une stratégie industrielle, la Bavière a opté pour une politique de l'innovation plus globale afin de contribuer à la sécurité de son approvisionnement et à répondre à la problématique spécifique de l'acceptation sociale qui freine les projets d'infrastructure énergétique dans ce Land. De tradition innovante, la Bavière utilise la transition énergétique pour se positionner comme pionnière sur les nouveaux enjeux d'intégration de l'offre et de la demande d'énergie.

Table des matières

A propos des auteurs 3

Résumé de l'étude 5

Synthèse de l'étude 7

Principaux enseignements 13

Table des matières 15

Chapitre 1. Les enjeux d'une structuration des filières de la transition énergétique à l'échelle européenne 19

Introduction 21

1. Les emplois liés aux énergies renouvelables en Europe et dans le monde 22

À l'échelle mondiale : 10 millions d'emplois, principalement en Asie 23
À l'échelle européenne 24

2. Une industrie européenne du photovoltaïque affaiblie 26

Technologies existantes 26
À l'échelle mondiale, la Chine établit sa suprématie 27
Une industrie européenne innovante mais peu compétitive 30

3. Des positions européennes plus solides dans l'éolien 31

4. Les initiatives de l'UE bénéficiant au secteur des énergies renouvelables 34

Le rôle de la politique commerciale 34
Politique de soutien à l'innovation 35
Une autre politique industrielle peut-elle s'envisager ? 37

5. Une géographie de la batterie dominée par l'Asie 37

Les technologiques disponibles 37
Un marché de la batterie dominé par l'Asie 38
L'Airbus de la batterie 41

6. L'enjeu des métaux critiques 42

Les métaux sollicités par la transition énergétique 42
L'importance des métaux critiques pour l'industrie 45
Une production concentrée, des ressources éparses 47
Enjeux environnementaux et sociaux 48
Vers de nouvelles mines en Europe ? 48
Stratégies de substitution de la part des industriels 50
Le rôle de la politique commerciale européenne 50

7. La nécessité d'une politique de recyclage plus dynamique 51

Conclusion 52

Chapitre 2. Structuration d'une filière de l'éolien marin en France 57

Introduction 59

1. Chronologie et caractéristiques des premiers champs éoliens 61

2. Rôle et responsabilités de l'État 64

Une politique qui accorde davantage la priorité au climat qu'aux renouvelables ? 64
Les enjeux budgétaires du soutien aux énergies renouvelables 64
Dans l'éolien marin, des tarifs initialement élevés 65
Un volontarisme politique de façade ? 65
Des objectifs ambitieux qui tardent à se traduire dans les faits 66
Des évolutions notables du cadre règlementaire 67
Des risques juridiques moindres mais des ambitions modestes 68
Quelle acceptation sociale ? 68

3. Ambitions et responsabilités des régions 70

L'aménagement des infrastructures portuaires 70
Structuration du tissu industriel au niveau local 71
Les Hauts-de-France 71
La Normandie (Croiseuilles sur Mer, Cherbourg, Caen Ouistreham, Dieppe) 72
Cherbourg 73
Courseuilles sur mer 74
Fecamp 74
Dieppe – Le Tréport 75
La Bretagne 76
L'IFREMER 77
L'infrastructure théorème. 77
Start up et innovations 77
L'éolien flottant, la priorité de la région Bretagne 78
Sabella 78
L'hydrolienne française P154 Guinart énergie Brest 79
Les Pays de la Loire 79
L'éolienne expérimentale Floatgen 80
Haliade X 80
Wavegem 81
La région Occitanie 81
EFGL et EolMed, priorité à l'éolien flottant 81
Marseille : ferme pilote Provence Grand Large 83
La région Nouvelle Aquitaine 83
Hydrotube Energie 83
Seeneoh Bordeaux 83

4. Structuration de la filière. Acteurs et technologies 84

Modes d'intervention de l'Etat 85
Entreprises et investissements 86
Les grandes entreprises 87
PME et TPE 87

5. Technologies et composantes. 88

L'éolien posé 88
Les mats 88
Les pales 89
Le stockage 89
Les étapes du processus technologique et de mise en opération 89
Les technologies dans l'éolien flottant 90

Les acteurs de la filière de l'éolien marin 91
La présence à l'exportation 94
Emplois et formation 95

Conclusion 97

Chapitre 3. Structuration des filières de la transition énergétique au Danemark 101

Introduction 103

1. Une demande soutenue par une politique volontariste 103

Succès et limites du système danois de soutien à la demande 103
Un modèle décentralisé 104
Les principaux acteurs à l'échelle gouvernementale 104
Le rôle clef des municipalités 105
Des coopératives omniprésentes 105

2. Une offre qui s'est structurée depuis les années 50 106

Les origines artisanales de la filière 106
Essor d'un écosystème à partir de logiques de « bricolage » 107

3. Les particularités du cluster danois 111

Les acteurs publics du cluster de l'éolien 112
L'État 112
Les dispositifs de formation 113
Les structures de coopération 114
Les pouvoirs locaux 115
Les centres de R&D 115
Les acteurs privés du secteur 116
Genèse d'une chaîne de valeur 116
Le rôle des acteurs privés dans l'industrie manufacturière 116
Le rôle des acteurs privés dans les activités de service 117

4. Les principaux défis de l'écosystème danois 118

Une internationalisation plus nécessaire que jamais 118
Des PME trop peu innovantes 119
S'adapter à la baisse des coûts 120

Conclusion 121

Chapitre 4. Structuration des filières de la transition énergétique en Allemagne 125

Introduction 127

1. Les défis industriels généraux de la transition énergétique allemande 128

2. Une filière éolienne dynamique, en quête de relais de croissance 130

Une filière éolienne dynamique 130
Les composantes de la chaîne de valeur 133
Une industrie de l'éolien adossé à des compétences pré-existantes 134
L'éolien en mer : un relais de croissance crucial 135

3. Politiques publiques mises en œuvre au niveau national 136

4. Une industrie de l'éolien concentrée au nord 137

5. Une recomposition inachevée ? 138

6. La filière photovoltaïque : un renouveau improbable ? 139

Une filière dynamique à l'échelle mondiale 139
Une ambition industrielle associée à un soutien à la demande 140
L'implantation d'un cluster photovoltaïque dans les nouveaux Länder 141
L'échec d'un projet industriel 142
Les termes d'un renouveau 144

7. Instruments, institutions, acteurs de la structuration des filières des EnR 145

Principaux dispositifs généraux 146
Dispositifs dédiés spécifiquement à l'énergie 146
Exemples de coopération franco-allemande 147

Conclusion 147

Chapitre 5. Structuration des filières de la transition en Bavière 151

Introduction 153

1. Les enjeux énergétiques de la Bavière 153

La fermeture des réacteurs nucléaires 153
Les ambitions bas-carbone 154
L'acceptation sociale 155

2. La politique de l'innovation du ministère de l'énergie bavarois 156

Les raisons du choix du gouvernement bavarois 157
Une politique de l'innovation de longue date 158
Des investissements conséquents 159

3. Les acteurs clés 163

Le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie (StMWI) 163
Bayern Innovativ et Cluster Energietechnik 163
Les *Stadtwerke* et les communes 165
Une alliance pour la recherche sur l'énergie et la technologie 166

4. Impacts et limites 169

Des limites liées au « Standort Bayern » 169
Une dépendance à l'égard du financement public 169
Les limites de la capacité d'innovations des entreprises bavaroises 170
Les divergences d'intérêt au sein des clusters 172
Le manque de main d'œuvre 172

Conclusion 174

Chapitre 1. Les enjeux d'une structuration des filières de la transition énergétique à l'échelle européenne

Gilles Lepesant

Introduction

En 2017, la production d'électricité à partir de sources renouvelables représentait 24% de la production totale d'électricité dans le monde. Si l'hydroélectricité joue ici un rôle clef (70% de la production d'électricité à partir de sources renouvelables en dépend), l'éolien (16%) et surtout le photovoltaïque (5%) connaissent la plus forte croissance. Celle-ci est appelée à perdurer en raison de la chute des coûts de production. À l'échelle mondiale, le coût des panneaux photovoltaïques a baissé de 80% en une décennie (2005-2015) grâce aux avancées technologiques, aux nouveaux procédés industriels et aux économies d'échelle permises par un marché en croissance.

En 2015, les énergies renouvelables ont pour la première fois représenté plus de la moitié des capacités totales ajoutées. Dans le secteur photovoltaïque, la Chine comme les États-Unis ont au cours de la seule année 2016 doublé leurs capacités de production. L'Asie joue un rôle moteur en concentrant plus de la moitié des nouvelles capacités de production (IRENA, 2017).

À l'échelle mondiale, l'AIE (Agence internationale de l'énergie) revoit régulièrement ses scénarios. Elle estimait en 2016 que la production d'électricité à partir de sources renouvelables devrait connaître une hausse de 42% d'ici à 2021. L'année précédente, l'agence envisageait une hausse de 13% seulement. Pour près de la moitié, cette croissance est imputable à la Chine (AIE, 2016 b). Selon Bloomberg Energy Finance (2016), l'éolien et le photovoltaïque devraient représenter 64% des nouvelles capacités de production électrique installées d'ici à 2040. À cette date, les coûts de l'éolien devraient avoir diminué de 41%, ceux du photovoltaïque de 60%. L'IRENA (2017) estime que les renouvelables pourraient couvrir 82% de la demande d'électricité en 2050. L'éolien, le photovoltaïque et le solaire thermique pourraient devenir la principale source d'électricité dans le monde dès 2030.

Dans l'UE (Union européenne), la part des renouvelables est passée entre 1990 et 2015, de 4 à 16,5% du mix énergétique, l'objectif des 20% à l'horizon 2020 dans le cadre du Paquet Énergie-Climat de 2009[2] devenant ainsi réaliste. Réactualisée en 2014[3], la politique de soutien aux énergies renouvelables (Cruciani, 2017) s'appuie de moins en moins sur de généreux tarifs d'achat, au profit d'instruments les rapprochant des conditions du marché (appels d'offre notamment). Dans le seul cas français, le soutien sollicité pour le photovoltaïque au sol par les candidats retenus est passé de 107€/MWh en 2013 à 62€ en 2017[4]. Le 13 avril 2017, l'Agence allemande en charge des réseaux publia les résultats de son premier appel d'offres pour des parcs éoliens marins (en mer du Nord). Pour l'un des parcs envisagés, aucun soutien ne fut sollicité par les candidats alors même que les prix du marché avoisinaient 30€ [5].

Dans ce contexte, le scénario d'un mix électrique largement dominé par les énergies renouvelables n'est plus utopique, que ce soit aux États-Unis (Hand et al., 2012) ou en France (ADEME, 2016). Même éloignée, cette perspective augure d'une forte croissance des énergies renouvelables, notamment de l'éolien et du photovoltaïque, deux technologies auxquelles viennent s'ajouter les systèmes de stockage. Ces derniers constituent en effet un complément indispensable pour valoriser des sources d'énergie intermittentes. Ils bénéficient par ailleurs de l'essor de la voiture hybride et électrique dont 2 millions de véhicules étaient recensés dans le monde en 2016 (Mathieu, 2017). Si ce stock ne représente que 0,2% du parc automobile, l'AIE estime qu'entre 9 et 20 millions de voitures électriques pourraient être déployées d'ici à 2020 et entre 40 et 70 millions d'ici à 2025 (AIEa, 2017). Selon Bloomberg Energy Finance (2016), la voiture électrique représentera 35% des ventes en 2040, malgré la remise en cause des subventions décidée par plusieurs pays en 2017. De fait, la parité des coûts entre la voiture électrique et la voiture traditionnelle semble envisageable dès 2023 (UBS, 2017, p. 3). Avec 40% des voitures électriques vendues dans le monde, la Chine jouera ici aussi un rôle central (AIEb, 2017), que ce soit

[2] Le paquet législatif fixe trois grands objectifs: réduire les émissions de gaz à effet de serre de 20 % (par rapport aux niveaux de 1990), porter à 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie de l'UE, améliorer l'efficacité énergétique de 20%. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_fr). Consulté le 10 avril 2017.
[3] D'ici à 2030, les États-membres se sont engagés à une réduction de 40% des émissions de gaz à effet de serre (par rapport au niveau de 1990), à une part des EnR (énergies renouvelables) d'au moins 27% et à une amélioration de l'efficacité énergétique de 27%.
[4] Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer, 2017. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/solaire#e5. Consulté le 26 juillet 2017.
[5] Le projet en question jouit de conditions favorables : important gisement de vent, infrastructures voisines déjà installées et susceptibles d'être valorisées, coûts de connexion non pris en compte, mise en service fixée à une date éloignée. Voir Pilita Clark, « Dong Energy breaks subsidy link with new offshore wind farms », *Financial Times*, 14 avril 2017.

pour soutenir la demande mondiale ou pour la freiner au cas où une éventuelle remise en cause des soutiens conséquents qu'elle apporte au secteur briserait la dynamique observée jusque-là[6].

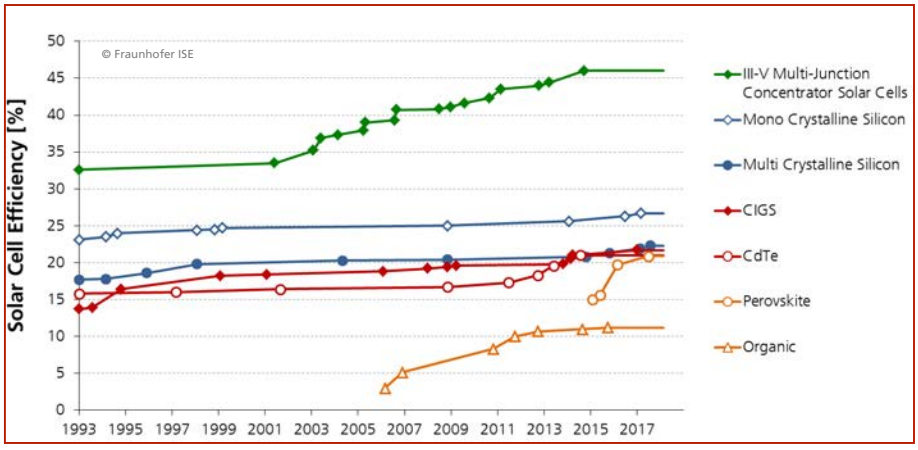
En Europe, les transformations intervenues dans le secteur des énergies renouvelables ces dernières années doivent beaucoup à la législation communautaire. En retour, l'UE est confrontée à de nouveaux défis qui portent sur la politique de concurrence, sur l'encadrement règlementaire des systèmes de stockage, sur la gestion des réseaux et sur les questions d'innovation. Ces dernières sont les plus importantes pour le secteur manufacturier et la situation des énergies renouvelables invite à des parallèles avec le secteur des télécoms. À l'instar de ce dernier, le marché électrique connut une période de stabilité avant l'irruption de nouveaux acteurs, de nouvelles technologies et une phase de libéralisation. Le secteur des télécoms fut en effet confronté au cours des années 90 à une succession de transformations (développement des solutions sans fil, de l'internet) avec des conséquences significatives pour les acteurs majeurs qu'étaient alors Ericsson et Nokia. L'essor de la production décentralisée d'énergie (renouvelable) associé au développement du numérique ont de manière similaire remis en cause des fondamentaux des marchés de l'énergie.

Dans ce contexte, force est de constater que la politique européenne n'a pas eu les mêmes effets sur l'offre industrielle européenne que sur la demande. Or, la mise en place d'un marché dynamique en Europe constitue une condition nécessaire à l'établissement de filières européennes mais pas une condition suffisante.

Comme le suggère ce chapitre, la valeur ajoutée de la transition énergétique en termes d'emplois apparaît à ce jour ténue, la concurrence asiatique et la crise de 2008 ayant affaibli sensiblement le secteur photovoltaïque. S'agissant des panneaux solaires comme des infrastructures de stockage, les technologies européennes ne sont pas parvenues à s'imposer et l'enjeu est désormais de renforcer la compétitivité de l'industrie européenne afin d'introduire (ou de valoriser) les prochaines ruptures technologiques. Ce chapitre analyse les initiatives prises en la matière par l'Union européenne après avoir détaillé les enjeux pour l'outil industriel et l'emploi européen des avancées de la transition énergétique.

1. Les emplois liés aux énergies renouvelables en Europe et dans le monde

La chute des coûts dans le secteur des énergies renouvelables, notamment dans le photovoltaïque et l'éolien a contribué à l'essor de ces énergies au cours des 20 dernières années écoulées. Les raisons de cette chute des coûts font néanmoins débat. Les économies d'échelle réalisées par les investissements conséquents opérés en Chine, par l'introduction de tarifs d'achat généreux dans l'UE et plus particulièrement en Allemagne ont de toute évidence contribué à cette évolution.



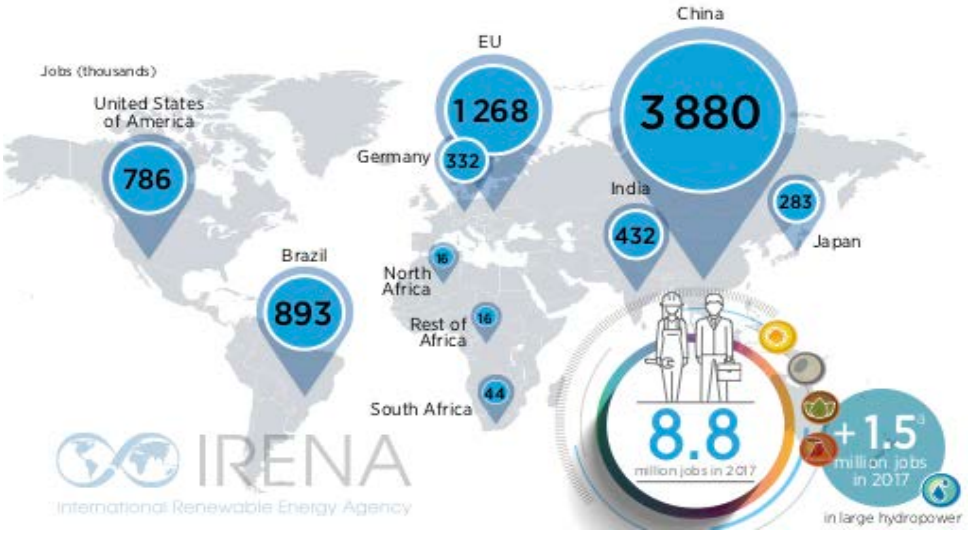
Graphique 1
Évolution du rendement des principales technologies de panneaux solaires (en laboratoire).

La part de l'innovation technologique est, elle, plus difficile à préciser tant les ruptures technologiques ont été rares. La hausse des rendements dans le secteur photovoltaïque est en effet pour l'essentiel imputable à l'innovation incrémentale qui n'a cessé de contribuer à l'amélioration des performances au cours des années passées (graphique 1).

[6] Sherry Fei Ju, « China puts a stop to electric-car gold rush », *Financial Times*, 27 juin 2017.

Pour certains auteurs, cette dynamique ne saurait s'éterniser. En l'absence d'un équivalent à la loi Moore pour le secteur informatique, les rendements des panneaux solaires sont appelés à se stabiliser et la croissance du secteur pourrait ralentir une fois le bénéfice des économies d'échelle épuisé (Sivaram, 2018). Or, dans la mesure où les prix du marché ont tendance à se stabiliser à des niveaux bas, les conditions ne sont guère propices à d'importants investissements. En somme, la poursuite de la dynamique de développement des énergies renouvelables demeure suspendue aux innovations nécessaires pour accroître sensiblement le rendement des panneaux solaires.

Dans l'immédiat, le développement du secteur photovoltaïque a généré des surcapacités en Chine comme sur le marché mondial. Le taux de ces surcapacités était estimé à 16% en 2017 par Deutsche Bank, une situation qui ne peut que contribuer à la baisse du prix des modules solaires même si une forte reprise de la demande est envisagée[7]. Évoluant dans un marché fortement régulé, l'industrie des énergies renouvelables demeure tributaire des amendements apportés aux législations et notamment aux systèmes de soutien. En 2017 et 2018, l'introduction d'appels d'offre pour définir les niveaux de soutien en Europe, la réforme des tarifs d'achat en Chine comme les changements législatifs introduits aux États-Unis ont ainsi pesé sur les comptes de plusieurs industriels. Plus globalement, les emplois directement liés aux énergies renouvelables se concentrent en Asie (carte 1 et graphique 2) tandis qu'en Europe, la dynamique varie selon les filières et demeure affectée par les conséquences de la crise de 2008.



Carte 1
Nombre d'emplois dans les différentes filières des énergies renouvelables en 2017 (les données pour l'UE et la RFA incluent les emplois fournis par les grandes centrales hydrauliques).
Source : IRENA, 2018.

À l'échelle mondiale : 10 millions d'emplois, principalement en Asie

Globalement, le secteur des énergies renouvelables représente encore une faible partie de l'emploi total (10,3 millions de salariés en 2017) avec une concentration en Chine, au Brésil, aux États-Unis, en Inde, au Japon et en Allemagne. 65% des emplois du secteur photovoltaïque (graphique 3) et 44% du secteur éolien sont concentrés en Chine (graphique 4). Sur le plan sectoriel, le photovoltaïque est le premier secteur, un secteur porteur qui a enregistré une forte hausse principalement imputable à la Chine, aux États-Unis, à l'Inde tandis que l'emploi a décliné pour la première fois au Japon en 2016 et qu'il poursuit sa décrue dans l'Union européenne.

Aux États-Unis, la concurrence chinoise a conduit plusieurs acteurs à sortir du secteur. Les faillites ont notamment frappé la filière photovoltaïque (SunEdison en 2016, Evergreen Solar et Solyndra en 2011). First Solar comme Sun Power (filiale américaine de Total) demeurent en 2018 des acteurs importants au niveau mondial mais ils ont vu leur capitalisation se contracter rapidement. Sun Power (positionnée sur des panneaux à haut rendement), a supprimé 15 % de ses effectifs à l'été 2017 et a annoncé une perte de 100 à 200 millions USD sur l'ensemble de l'année. Au final, la croissance de l'emploi dans le secteur manufacturier a certes été sensible de 2010 à 2016 mais les volets installation, développement,

[7] https://www.pv-tech.org/news/deutsche-bank-guides-solar-industry-overcapacity-at-16-through-2017

commercialisation sont ceux qui ont connu la plus forte croissance en termes d'emplois. Cette dynamique explique pourquoi le secteur compte aujourd'hui un nombre d'emplois sensiblement supérieur à celui du charbon. Il éclaire également la réaction mitigée[8] du secteur à la décision prise par les autorités américaines en 2018 de renforcer les restrictions aux importations de panneaux solaires (cf. infra).

La concentration des emplois dans les filières aval constitue en effet l'un des arguments les plus fréquemment opposés à l'adoption de sanctions anti-dumping à l'encontre de la Chine. Toute hausse des tarifs douaniers induit en effet un renchérissement du coût des panneaux solaires susceptible de freiner la montée en puissance de l'énergie photovoltaïque et de mettre ainsi en péril les nombreux emplois créés dans les secteurs aval.

À l'échelle européenne

De son côté, l'UE n'a pas encore surmonté, en termes d'emplois, la crise des années 2008-2009. Elle comptait dans les différentes filières 1,16 million d'emplois en 2017, soit légèrement moins qu'en 2015. Alors que la filière photovoltaïque connait une forte dynamique dans le monde, elle continue de subir des pertes d'emplois, d'autres filières comme la biomasse ou la géothermie poursuivant, elles, leur croissance.

Avec environ 110 000 salariés, la filière photovoltaïque a perdu 2/3 de ses emplois depuis 2011, des emplois principalement concentrés en Allemagne, au Royaume-Uni, en France et en Italie (67% des emplois au total). La filière éolienne occupe une place significative (près de 350 000 emplois en 2017) dont 43% en Allemagne mais connaît également une érosion de ses effectifs[9].

En revanche, l'emploi dans la biomasse solide a retrouvé son niveau de 2013 avec plus de 330 000 emplois et le secteur des biocarburants s'est stabilisé (93 000 emplois). Pour les années à venir, les prévisions font état d'une progression des effectifs dans certaines filières, notamment pour le photovoltaïque (jusqu'à 175 000 emplois créés d'ici à 2021). La dynamique dépendra en partie du niveau d'ambition des politiques publiques mises en œuvre. Pour illustrer la forte sensibilité de l'emploi aux choix politiques effectués, SPE (Solar Power Europe) évalue que relever de 27 à 35% la part des EnR dans le mix énergétique européen d'ici à 2030 permettrait d'ajouter 120 000 emplois au seul secteur photovoltaïque. Le secteur aval s'étant développé en Europe comme aux États-Unis, des restrictions aux importations (pour l'essentiel en provenance de Chine) ne peuvent qu'affecter l'emploi. La suppression des mesures anti-dumping actée par l'Union européenne en 2018 devrait, selon SPE, induire la création de 45 000 nouveaux emplois d'ici à 2019. Au sein du secteur, le photovoltaïque sur toiture est 3 fois plus créateur d'emplois que le solaire au sol en raison des activités induites en matière d'installations.

Grâce au dynamisme des secteurs avals, le secteur photovoltaïque devrait voir le nombre d'emplois progresser. Selon SPE, le secteur photovoltaïque devrait compter environ 175 000 emplois d'ici à 2021[10]. L'Espagne devrait être le principal bénéficiaire de cette tendance (une croissance de l'emploi de 471% y est attendue entre 2016 et 2021) suivie par la Grèce (403%) et la Pologne (381%) grâce notamment à des investissements asiatiques. Globalement, 75% environ des emplois créés relèveraient des secteurs aval. À terme, les perspectives dans le seul secteur manufacturier restent néanmoins dépendantes des capacités d'innovation de l'industrie européenne. Or, en la matière, la zone Asie domine les filières concernées, notamment le photovoltaïque et le stockage.

Graphique 2

Nombre d'emplois dans les différentes filières des énergies renouvelables entre 2012 et 2017

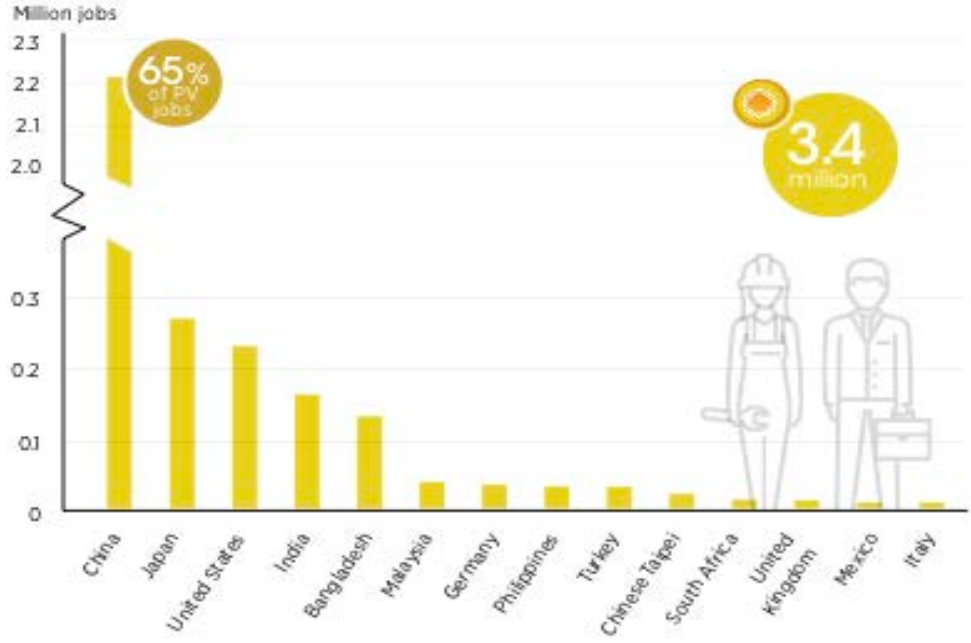
[8] « President's Decision on Solar Tariffs is a Loss for America », communiqué de presse de la SEIA (Solar Energy Industries Association) : "While tariffs in this case will not create adequate cell or module manufacturing to meet US demand, or keep foreign-owned Suniva and SolarWorld afloat, they will create a crisis in a part of our economy that has been thriving, which will ultimately cost tens of thousands of hard-working, blue-collar Americans their jobs," 22 janvier 2018. https://www.seia.org/news/presidents-decision-solar-tariffs-loss-america. Accès le 23.04.2018.

[9] Solar Power Europe, *Solar Photovoltaics Jobs & Value Added in Europe*, novembre 2015.

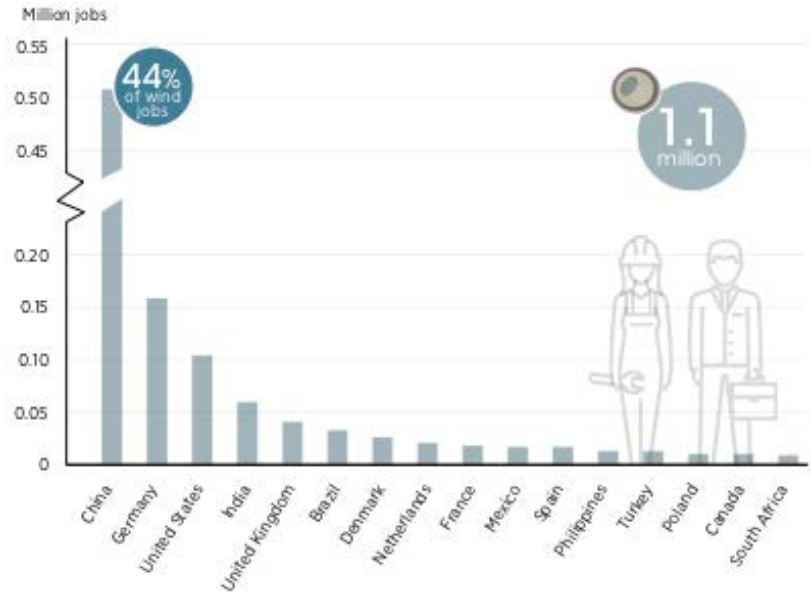
[10] Solar Power Europe , « Jobs & Growth report », 2017.

Source : IRENA, 2018.

Graphique 3
Répartition géographique des emplois dans le secteur photovoltaïque
Source : IRENA, 2018.



Graphique 4
Répartition géographique des emplois dans le secteur éolien
Source : IRENA, 2018.



2. Une industrie européenne du photovoltaïque affaiblie

Technologies existantes

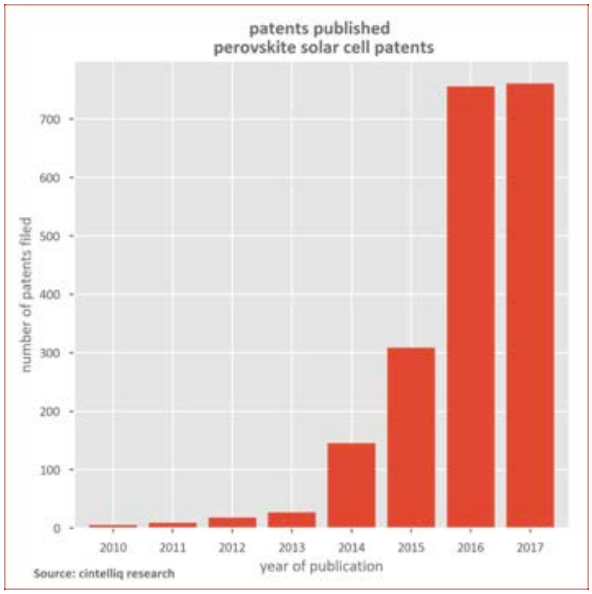
Dans le secteur photovoltaïque, la technologie la plus répandue demeure celle du silicium (elle représentait 94% du marché en 2018), soit sous la forme de silicium polycristallin (70% de la demande), soit sous celle de silicium monocristallin (graphique 5).

Graphique 5
Chaîne de valeur du panneau photovoltaïque
Source : SPE

Les couches minces au rendement sensiblement inférieur mais promises à une forte croissance en raison de leur application sur des supports flexibles ne représentent que 6% du marché. Trois technologies dominent ici : les cellules amorphes produites à partir d'un "gaz de silicium" projeté, les cellules CdTe, une technologie développée par First Solar à base de tellurure de cadmium (matériau cristallin composé de cadmium et de tellure) ou encore les cellules CIGS (cuivre, indium, gallium, sélénium).

D'autres technologies sont susceptibles de prendre le relais à l'instar des cellules CZTS, développés à partir de matériaux abondants et non toxiques (cuivre, zinc, étain, soufre) aussi minces qu'une pellicule de film, peu coûteuses et fabriquées sans recours aux terres rares. Peu stables, elles n'ont néanmoins pas encore atteint le stade de la commercialisation. Les cellules photovoltaïques à colorants inspirées du

rôle de la chlorophylle pour les plantes font également l'objet des recherches mais les investissements les plus conséquents sont dédiés aux panneaux à base de pérovskites[11] (cellules hybrides constituées d'un mélange de matériaux organiques et inorganiques).

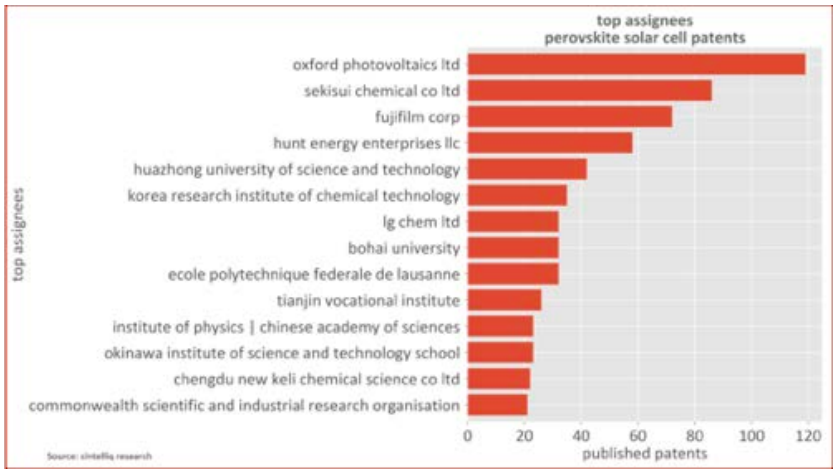


Graphique 6
Évolution du nombre de brevets déposés pour la technologie des cellules à pérovskite
Source : Cintelliq Research

Aucune de ces technologies alternatives n'approche les rendements obtenus actuellement avec les panneaux à base de silicium. Néanmoins, les progrès obtenus en quelques années en laboratoire sont significatifs (graphique 1), notamment pour les panneaux à base de pérovskites. Le scénario d'une rupture technologique ne peut être exclu au regard du nombre croissant de brevets déposés pour cette technologie (graphique 6) et l'Europe semble ici en position de force (graphique 7).

Aucune de ces technologies alternatives n'approche les rendements obtenus actuellement avec les panneaux à base de silicium. Néanmoins, les progrès obtenus en quelques années en laboratoire sont significatifs (graphique 1), notamment pour les panneaux à base de pérovskites. Le scénario d'une rupture technologique ne peut être exclu au regard du nombre croissant de brevets déposés pour cette technologie (graphique 6) et l'Europe semble ici en position de force (graphique 7).

Graphique 7
Principaux propriétaires de brevet pour la technologie des cellules à pérovskite
Source : Cintelliq Research



Ce scénario n'est néanmoins pas le seul envisageable. L'innovation incrémentale présente en effet de nombreux avantages. Elle épargne aux industriels dominants une restructuration de l'outil de production et des investissements dans des technologies qui sont encore loin d'avoir les preuves de leur stabilité. Au cours des dernières années, elle a en outre contribué à réduire les coûts et à accroître les rendements de sorte que les acteurs dominants du marché ont peu de raisons d'investir massivement dans des technologies alternatives. À contrario, ces dernières représentent probablement la seule opportunité pour l'industrie européenne de contester à terme la prédominance des acteurs asiatiques. Dans l'immédiat, la Chine s'est forgée en quelques années une position forte voire dominante qui invite les Européens à s'interroger sur les moyens, non seulement de renforcer leurs capacités de R&D mais aussi et surtout de tirer les bénéfices commerciaux de leur capacité d'innovation avérée.

À l'échelle mondiale, la Chine établit sa suprématie

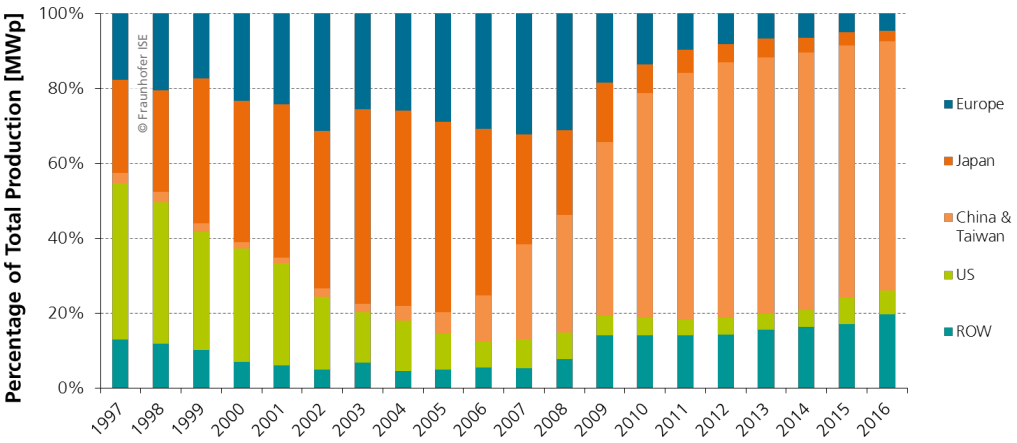
[11] Minéral découvert dans l'Oural par Gustav Rose en 1839 qui lui donna le nom de perovskite en hommage à Lev Perovski, (1792–1856).

En 2017, la Chine et Taïwan ont eu une part de marché de 70% dans la production de panneaux solaires suivie par le reste de l'Asie (14%), les États-Unis (6%) et l'UE (4% contre 5% en 2015). Ce recul relatif de l'Europe ne concerne pas que le secteur manufacturier, il reflète également une moindre progression du marché, l'UE ne représentant que 33% des nouvelles installations PV dans le monde en 2016 contre 40% en 2015. Le Chine, elle, est passée de 21 à 26%.

En quelques années, ce pays s'est affranchi d'une politique limitée à assurer l'approvisionnement des zones rurales dépourvues de réseau. Il s'est engagé dans une politique destinée à faire du pays le leader des technologies relevant de l'énergie renouvelable et du stockage dans le monde. Cette montée en puissance de l'industrie chinoise a coïncidé avec le lancement en Allemagne d'initiatives publiques soutenant l'installation de panneaux solaires sur toiture. La Chine a ensuite pleinement tiré profit de la forte demande émanant d'Europe et dans une moindre mesure des États-Unis. L'industrie américaine qui détenait des positions fortes dans cette industrie ne satisfaisait en 2017 plus qu'un tiers environ de la demande nationale. Le Département de l'énergie considère néanmoins qu'en réduisant les coûts et en redevenant précurseurs dans les nouvelles technologies, le pays pourrait devenir le deuxième producteur manufacturier dans le monde d'ici à 2020 (Chung et al., 2016).

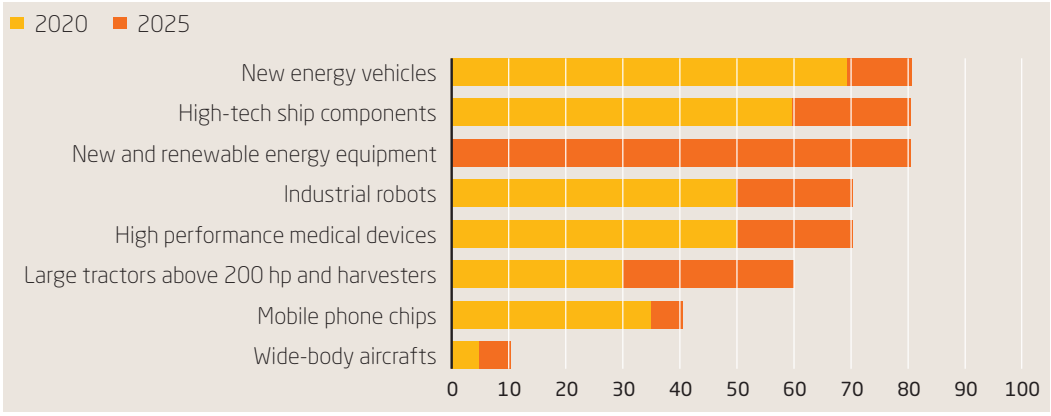
La Chine s'est forgée une base industrielle en structurant ses filières, en attirant par des crédits d'impôt et des salaires bas des investisseurs étrangers et en rachetant des entreprises étrangères. Les capacités de production installées ont crû d'autant plus vite que les autorités locales et nationales ont recouru à divers moyens communs à plusieurs filières pour s'assurer l'implantation sur leur territoire d'unités de production (notamment octroi de foncier et de prêts à des conditions avantageuses). Le savoir-faire a été acquis aussi bien par l'achat de technologies étrangères que par la sollicitation de la diaspora (De La Tour, 2011). Au final, le centre de gravité de l'industrie du panneau solaire s'est en quelques années déplacé vers la Chine (graphique 8).

Les capacités de production chinoises ont plus que décuplé entre 2007 et 2012 de sorte que 6 des 10 producteurs mondiaux de panneaux sont désormais chinois, ainsi que les deux premiers (Figure 10). Les autorités semblent enclines à soutenir la montée en gamme en abandonnant à leur sort les industriels ayant surinvesti (en témoignent les défaillances de Suntech en 2013 et de Chaori Solar Energy en 2014). En revanche, les énergies renouvelables constituent désormais l'un des 7 secteurs jugés prioritaires (et destinataires à ce titre de prêts avantageux et de crédits d'impôts) dans le plan quinquennal chinois.



Graphique 8
Production de panneaux solaires dans différentes régions (1997-2016)
% of MWc
Source : Institut Fraunhofer

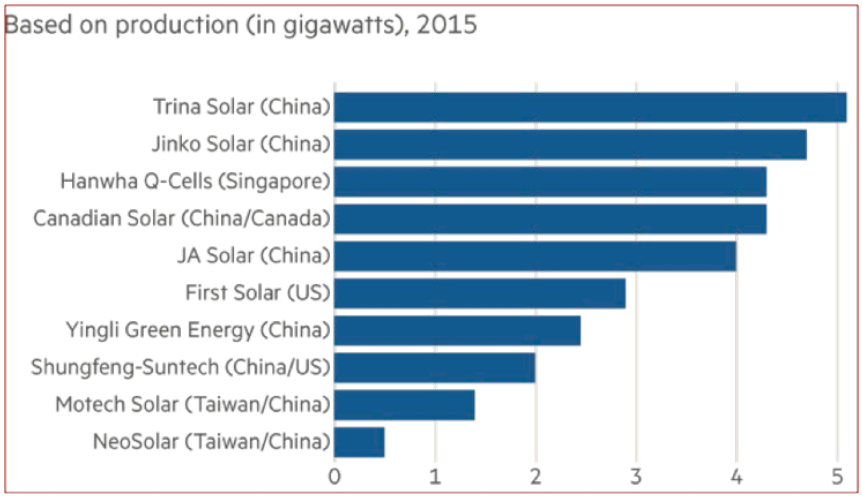
Le plan Made in China 2025 (Graphique 9), forgé par un groupe d'experts mis sur pied par les autorités a fixé pour l'avenir une ambition dans plusieurs secteurs industriels formulés en termes de part de marché pour la Chine. Dans le secteur des énergies renouvelables, l'objectif énoncé est une part de marché de 80% (MERICS, 2016).



Graphique 9
Plan Made in China 2025
Source : Chambre européenne de commerce en Chine

En 2017, les autorités chinoises ont par ailleurs exprimé leur intention d'investir 360 milliards USD dans les énergies renouvelables avant 2020 (144 milliards dans le secteur photovoltaïque, 100 milliards pour l'éolien, 70 pour l'hydroélectricité) et d'y créer 13 millions d'emplois nouveaux entre 2016 et 2020[12].

Graphique 10
Principaux producteurs de panneaux solaires en 2017
Source : SPE



Une partie de ces emplois sera générée par les exportations, actuellement en hausse (elles ont atteint 32 milliards USD en 2016) (Buckley, 2017). Au final, la dynamique à l'œuvre laisse à penser que le secteur chinois, par sa compétitivité à l'export et par la taille du marché intérieur, pourrait à terme imposer ses normes et ses technologies à l'échelle mondiale.

Pour soutenir la demande sur son propre marché (et atteindre ses objectifs climatiques), la Chine adopta un régime de soutien voisin de celui adopté en Europe, à savoir le tarif d'achat. En deux ans, soit dès 2015, le marché chinois est ainsi devenu le premier marché au monde. En 2017, ce régime de soutien a été révisé afin d'en réduire le coût. Les ambitions, elles, demeurent. Certes, le charbon reste la principale source de production d'électricité (72% en 2015) et ce chiffre ne devrait diminuer que lentement pour atteindre 50% en 2040.

Si on ajoute au charbon, le pétrole et le gaz, les énergies fossiles devraient à cette date demeurer largement majoritaires dans le mix énergétique. En outre, les énergies renouvelables sont à ce jour dominées par l'hydroélectricité. L'éolien comme le solaire tiennent un rôle marginal dans la production d'électricité (respectivement 2.7% et 0.5%). Compte-tenu des objectifs affichés dans les NDC[13] de l'accord de Paris (notamment accroître la part de l'énergie d'origine non-fossile à 20% d'ici à 2030), l'EIA[14] estime néanmoins que la capacité de production PV pourrait atteindre 240 GW en 2040, soit une

[12] Michael Forsythejan, « China Aims to Spend at Least $360 Billion on Renewable Energy by 2020 », *New-York Times*, 5 janvier 2017.
[13] NDC : Nationally Determined Contributions.
[14] U.S. Energy Information Administration.

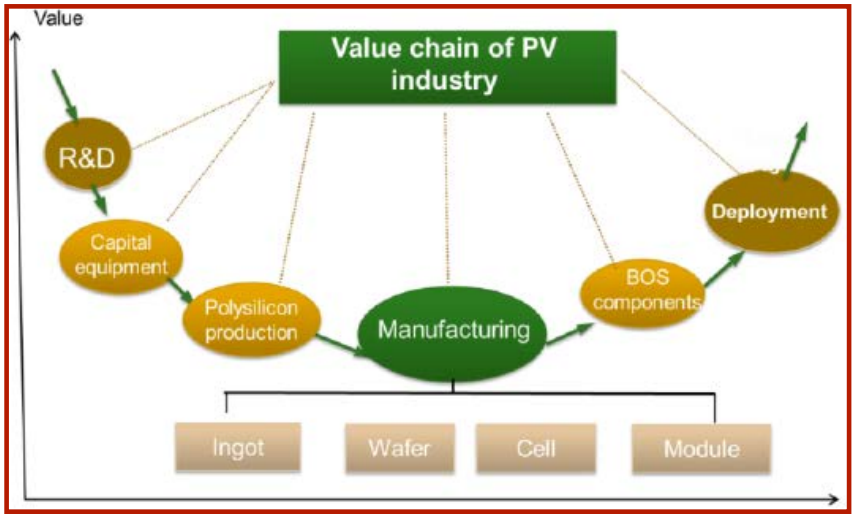
hausse annuelle de 7% de 2015 à 2040. Sur la même période, 280 GW de capacités devraient être ajoutés dans l'éolien (soit une hausse annuelle de 5%)[15].

Une industrie européenne innovante mais peu compétitive

À l'instar de l'industrie américaine, l'industrie européenne a connu une série de défaillances imputables à la fois à la concurrence chinoise sur les prix et au revirement des politiques européennes de soutien au secteur dans le contexte de la crise de 2008. En France, Photowatt déposa ainsi le bilan en novembre 2011 (ses activités furent reprises en février 2012 par EDF énergies nouvelles) et l'installateur Evasol fit de même en mars 2012.

La crise fut plus brutale en Allemagne où le secteur photovoltaïque avait été mis à contribution pour réindustrialiser les *Länder* de l'Est. La crise du secteur se doubla ainsi de crises locales lorsqu'intervint une série de faillites (Solon en décembre 2011, Solarhybrid en mars 2012, Q-Cells en avril 2012, Sovello en mai 2012) ponctuée le 10 mai 2017 par le dépôt de bilan du dernier fabricant allemand de panneaux photovoltaïques : Solarworld. La branche photovoltaïque n'employait plus que 32 000 personnes en Allemagne en 2015 contre plus de 100 000 en 2012. Plus globalement, après avoir figuré comme un leader mondial de la production de panneaux solaires jusqu'à la moitié des années 2000, l'UE a disparu de la liste des 10 premiers manufacturiers.

L'UE a été distancée pour la plupart des segments de la chaîne de valeur du photovoltaïque grand public (graphique 11). Les parts de marché perdues concernent en particulier la fabrication de modules pour lesquels les concurrents chinois ont pu s'appuyer sur un accès aisé au financement et sur des coûts de production réduits (notamment pour l'énergie et les coûts salariaux). En amont de la chaîne de valeur, l'UE compte plusieurs producteurs majeurs de plaquettes de silicium et de nouveaux acteurs apparaissent (par exemple NexWafe[16] en Allemagne) mais le secteur reste fragilisé par de nombreuses faillites.



Graphique 11
Chaîne de valeur du panneau photovoltaïque
Source : Chambre européenne de commerce en Chine

La production de cellules a certes été, elle, relativement épargnée mais plusieurs fabricants ont cessé leur activité en la matière, comme Solitek en Lituanie qui n'a pas résisté à l'effondrement des coûts en 2016. L'UE conserve une avance pour un autre segment de la chaîne de valeur, à savoir les onduleurs mais la montée en puissance des capacités de production de panneaux solaires en Chine risque à terme de conférer à celle-ci une supériorité pour ce segment également. Si le module constitue la partie la plus onéreuse du panneau (55% des coûts selon une étude du Fraunhofer Institut[17]), la diminution des coûts invite en effet peu à peu à porter davantage attention aux autres composants du panneau. Dans ce contexte, réduire le coût de production des onduleurs pourrait devenir une priorité pour le secteur, le risque étant ici que les fabricants européens voient leur compétitivité prix s'éroder.

[15] Le plan quinquennal envisage également une mise en service de centrales nucléaires pour une capacité de 58 GW d'ici à 2020. Le pays dispose actuellement de 38 réacteurs, 19 sont en construction.
[16] « NexWafe: Solar-Start-up sammelt acht Millionen Euro ein », *Wirtschaftswoche*, 12.12.2017.
[17] Institut Fraunhofer, *Photovoltaïcs report*, Freiburg, 26 février 2018.

Dresser un tableau précis de l'implication des industriels européens est néanmoins difficile tant il convient de ne pas se limiter aux composants les plus visibles des installations solaires. Certains acteurs préservent leur compétitivité en valorisant des stratégies de niche, à l'instar d'AZUR Space qui produit des cellules solaires adaptées aux engins spatiaux[18]. Cette activité en a généré d'autres permettant à l'entreprise de se diversifier tout en étant sur un marché très spécifique. Certains industriels européens sont par ailleurs impliqués de manière plus ou moins directe dans la chaîne de valeur qu'il s'agisse de machines-outils, de composants de chaîne de production (à titre d'exemple, le français Mersen fournit à la Chine le carbone des fours nécessaires à la production de panneaux solaires) ou encore de systèmes électriques à forte valeur ajoutée. D'autres acteurs spécialisés dans des secteurs éloignés du photovoltaïque ont élargi leur palette tels Singulus dont le cœur de métier (plasma) a été valorisé pour alimenter l'industrie du panneau silicium.

S'agissant des seuls panneaux, la faillite des principaux acteurs ne dissuade pas certaines entreprises européennes de relancer une production sur le continent. En Italie, ENEL Green Power s'est appuyé sur une nouvelle technologie pour lancer une production d'une capacité de 240 MW/an à l'horizon 2020[19]. D'autres industriels européens disposent par ailleurs de compétence pour des panneaux solaires intégrés au bâti, aux infrastructures, aux véhicules pour lesquels le marché reste modeste mais où certains producteurs incapables de faire face à la production chinoise pour la production de masse peuvent se positionner.

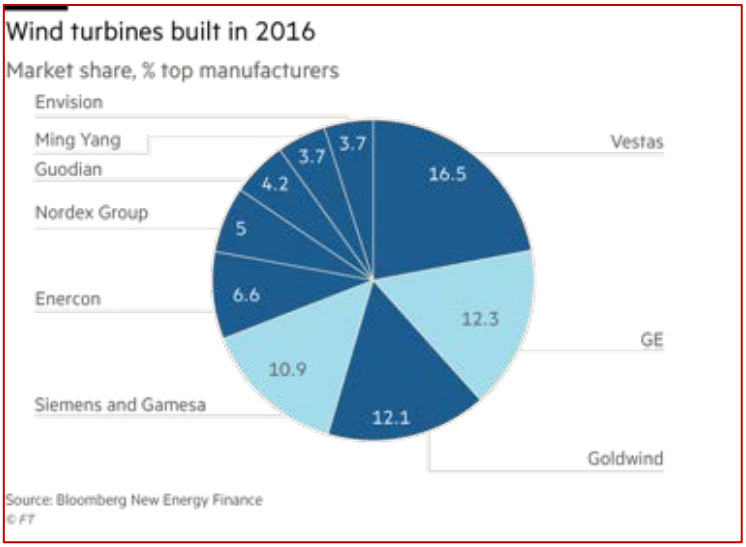
De tels marchés devraient connaître une forte croissance dans les années à venir. L'innovation de rupture semble en effet l'unique option qui s'offre à l'UE pour préserver des capacités de production. Selon un responsable d'AEG Industrial Solar, « il existe une différence culturelle dans le rapport à la technologie entre les acteurs chinois et les acteurs européens. Les entreprises chinoises privilégient une succession de petites améliorations permettant d'améliorer le processus de production tout en en réduisant les coûts mais ils ont peur d'innover, d'être des précurseurs »[20].

L'atout de l'UE serait en somme l'innovation adossée à des systèmes de financement permettant le passage aussi rapide que possible à la phase industrielle. Plusieurs initiatives maillent le continent européen en la matière telles que le partenariat établi entre l'IPVF (Institut photovoltaïque d'Île de France) et ZSW (Centre for Solar Energy and Hydrogen Research) situé dans le Bade-Wurtemberg établi pour 5 ans en vue de concevoir la prochaine génération des cellules CIGS)[21]. Rien n'assure néanmoins à ce stade que les industriels européens seront en capacité de franchir le cap de l'industrialisation et de s'adjuger des parts de marché substantielles.

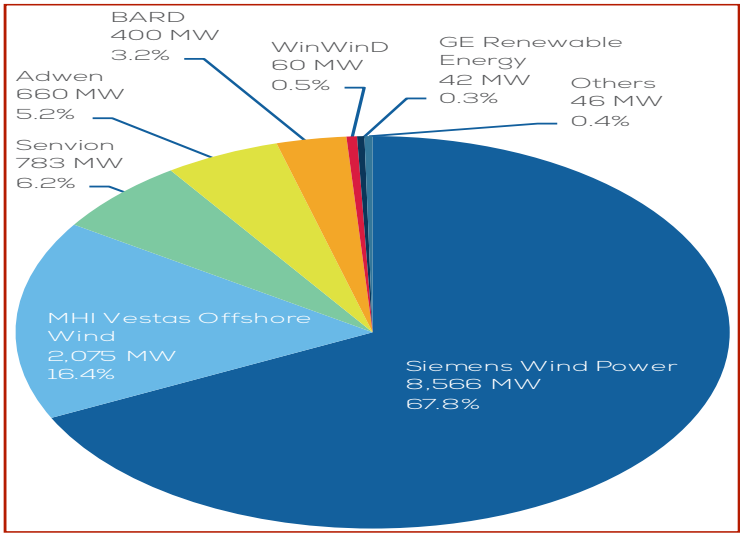
3. Des positions européennes plus solides dans l'éolien

Dans le secteur de l'éolien, la suprématie chinoise est moins affirmée mais la forte croissance de Goldwind a imposé très rapidement la Chine comme un des principaux acteurs mondiaux. Les Européens (notamment avec Siemens-Gamesa et Vestas) obtiennent toutefois une part de marché sensiblement supérieure à ce qu'elle est dans le cas des panneaux solaires ou du stockage de l'énergie (Graphique 12)[22]. Ils dominent ainsi nettement le marché européen, notamment celui de l'éolien marin (Graphique 13).

[18] European Technology and Innovation Platform for Photovoltaics, Rapport de la conférence « PV manufacturing in Europe », Bruxelles, 19 mai 2017.
[19] ENEL : « Enel starts production at 3SUN factory of cutting-edge, bifacial photovoltaic panels », 16.03.2018. https://www.enelgreenpower.com/media/press/d/2018/03/enel-starts-production-at-3sun-factory-of-cutting-edge-bifacial-photovoltaic-panels. Consulté le 12 avril 2018.
[20] Op. cit.
[21] « ZSW and IPVF plan five year research project on next-gen flexible CIGS solar cells », PV Tech, https://www.pv-tech.org/news/zsw-and-ipvf-plan-five-vear-research-project-on-next-gen-flexible-cigs-sola. Consulé le 30 avril 2018.
[22] Ed Crooks and Patrick McGee, « GE and Siemens: power pioneers flying too far from the sun », Financial Times, 12 novembre 2017.



Graphique 12. Parts de marché des principaux manufacturiers du secteur éolien en 2017
Source : Financial Times



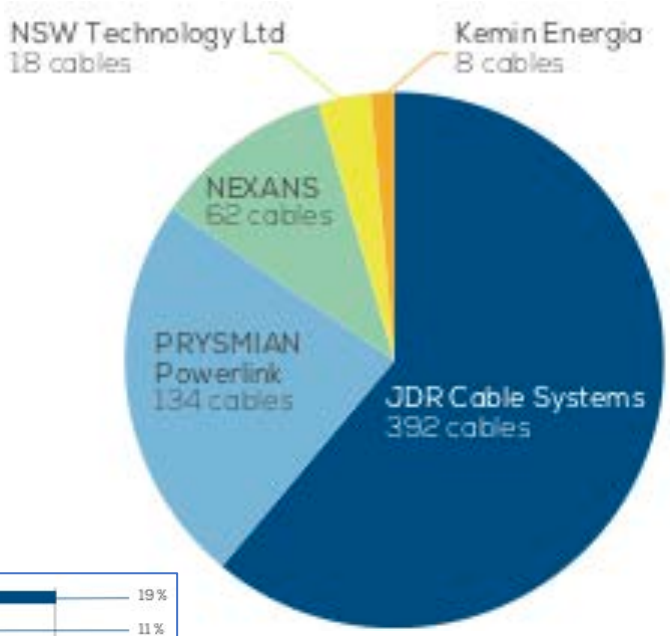
Graphique 13. Parts de marché des principaux manufacturiers
du secteur de l'éolien marin en 2017
Source : WindEurope

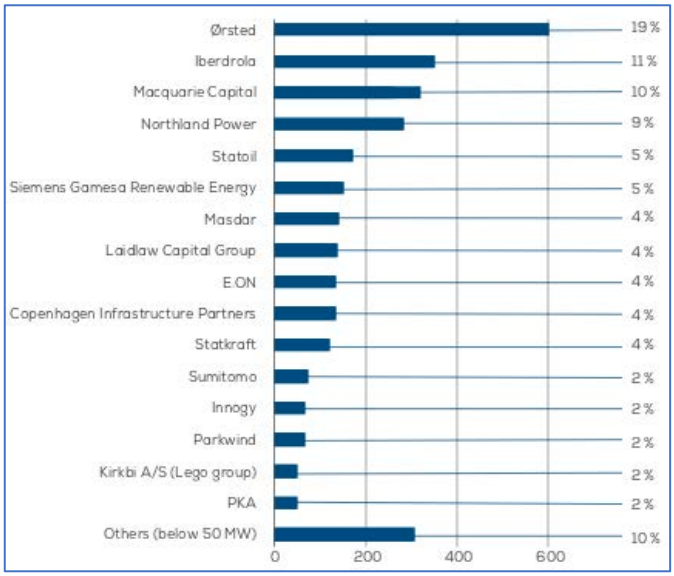
Sur les 10 plus grands fabricants de turbines dans le monde, 5 sont basés dans l'UE. L'Europe tire ici profit des initiatives prises par certains États européens pour développer cette filière (notamment l'Allemagne, le Danemark, le Royaume-Uni) dont le résultat est qu'en 2018 plus de 90% des éoliennes marines installées dans le monde le sont dans les eaux européennes.

Les principaux segments de la chaîne de valeur sont dominés par des industriels européens, qu'il s'agisse des câbles sous-marins (Graphique 14), des développeurs (graphique 15) ou des fondations (graphique 16). Dans l'éolien marin, les coûts ont chuté au point qu'en 2017 puis en 2018, 2 consortiums (en Allemagne et aux Pays-Bas) ont gagné 2 appels d'offres en ne sollicitant aucun soutien financier public. Il reste que l'industrie manufacturière de l'éolien pèse peu dans l'économie européenne (0.26% du PNB en 2016) même si elle croit 4 fois plus vite que ce dernier. Le secteur est excédentaire (7.8 milliards € exportés, 5.4 milliards importés en 2016) mais la part des importations dans les activités est passée de 11% à 16% entre 2011 et 2016. Le secteur revendiquait en 2016 plus de 330 000 emplois directs et indirects.

En dépit de ses compétences industrielles disponibles et du long littoral dont elle dispose, la France ne comptait cependant aucune éolienne marine opérationnelle en 2018 et de manière plus globale, son marché de l'éolien est largement dominé par les industriels européens (graphique 17).

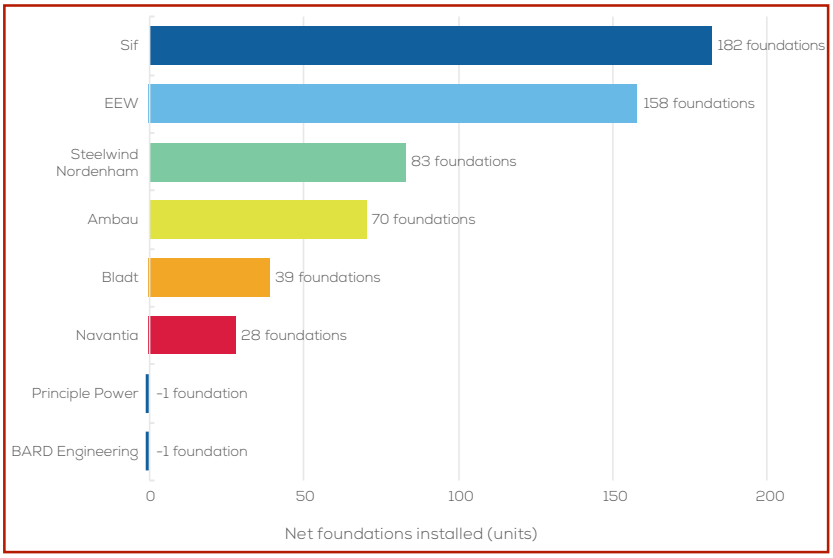
Graphique 14
Parts de marché des fournisseurs de câble dans le secteur de l'énergie en Europe
Source : Offshore Wind in Europe Key trends and statistics 2017, février 2018

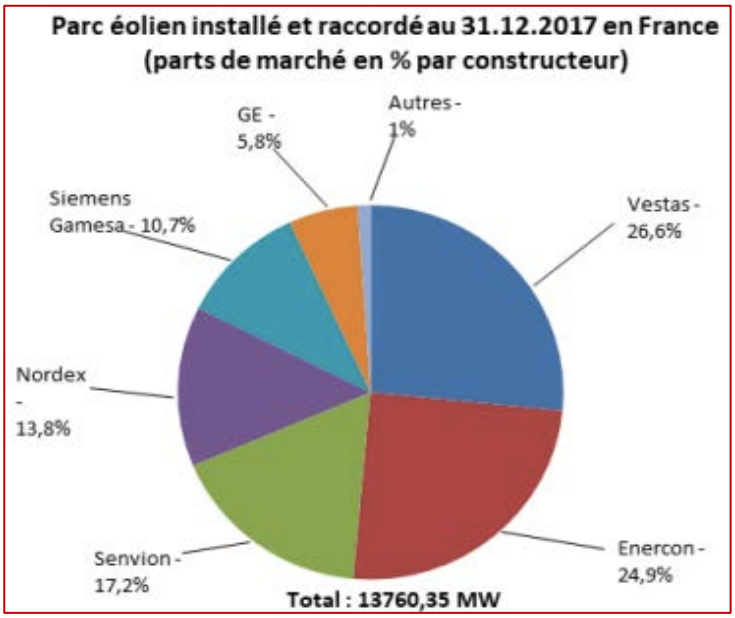




Graphique 15
Part de marché des développeurs en 2017 (MW)
Source : Offshore Wind in Europe Key trends and statistics 2017, février 2018

Graphique 16
Part de marché des industriels de la fondation en 2017
Source : Offshore Wind in Europe Key trends and statistics 2017, février 2018





Graphique 17
Part de marché des acteurs de l'industrie éolienne en 2017
Source : France Energie Éolienne

4. Les initiatives de l'UE bénéficiant au secteur des énergies renouvelables

Le 13 septembre 2017, la Commission européenne publia une Communication intitulée : « Investing In a smart, innovative and sustainable Industry. A renewed EU Industrial policy strategy ». Cette Communication faisait suite à celle de 2014 ("Towards an industrial renaissance") qui suggérait l'idée d'une acceptation par la Commission de la notion politique industrielle. Pour autant, les initiatives concrètes les plus marquantes relèvent à ce stade de la politique commerciale et de la politique d'innovation.

Le rôle de la politique commerciale

Depuis le début des années 2000, les flux commerciaux dans le secteur manufacturier de l'énergie ont augmenté sensiblement. En 2015, la somme des importations et des exportations était plus de 2 fois supérieure à ce qu'elle était en 2000. Si globalement, la balance commerciale de l'UE est en la matière excédentaire, un déficit important s'est creusé dans certains secteurs, notamment le photovoltaïque du moins pour ce qui concerne les panneaux complets[23]. À mesure du développement des renouvelables dans le monde, l'accès des industriels européens aux appels d'offre lancés hors d'Europe est également devenu un sujet, la concurrence étant faussée sur certains marchés. Cette situation a conduit l'Union à insérer de nouvelles clauses dans les accords commerciaux et à nouer un dialogue avec les pays tiers pour renforcer la transparence en matière de systèmes de soutien.

C'est néanmoins dans le secteur manufacturier que l'action de la Commission s'est avérée la plus discutée. Face à l'afflux de panneaux solaires chinois bon marché, la Commission européenne imposa en 2013 un prix minimum d'importation (de 56 centimes par watt). Elle imposa également un droit compensateur (pouvant atteindre 11,5%) sur les importations de modules ou panneaux photovoltaïques et un droit antidumping allant de 27,3% à 64,9%[24]. Ces dispositions furent renouvelées en mars 2017. La Commission fit face à différentes pressions. Plusieurs secteurs industriels, notamment ceux représentés par SolarPower Europe (175 entreprises membres) ainsi que différentes ONG (Greenpeace, WWF), plaidèrent en faveur d'un abandon de ces mesures. Principal argument avancé : le prix minimum d'importation impose un surcoût superflu aux consommateurs européens tout en alimentant les bénéfices obtenus par les exportateurs chinois.

D'autres (comme l'association EU ProSun qui représente les intérêts de 30 fabricants de cellules ou de modules européens) militèrent en revanche pour un maintien de ces mesures, estimant que l'insécurité

[23] EU Energy technology trade, 2017: JRC
[24] ActuEnvironnement, « Photovoltaïque : l'UE reconduit les mesures antidumping appliquées aux panneaux chinois », 7 mars 2017. https://www.actu-environnement.com/ae/news/photovoltaique-chine-mesures-antidumping-28580.php4. Consulté le 18 mai 2018.

règlementaire plus que les coûts limitaient l'essor du photovoltaïque en Europe. Si SolarWorld évalue à 1 700 le nombre d'emplois préservés en Allemagne grâce aux mesures anti-dumping (sans compter la reprise de l'activité de Bosch dans le pays, soit 1 000 emplois), un bilan précis de la décision de la Commission européenne demeure difficile. Dans ce contexte et sachant que le secteur manufacturier ne représentait plus que 110 00 emplois en 2017 (soit une perte des 2/3 par rapport à 2011), l'UE opta pour l'abandon des mesures anti-dumping.

Politique de soutien à l'innovation

En 2015, les entreprises européennes détenaient environ 30% des brevets déposés dans le domaine des énergies renouvelables, un chiffre élevé mais en baisse par rapport aux années précédentes[25]. Au-delà des instruments soutenant globalement la recherche-développement (principalement H2020 qui prévoit 10 milliards de soutien pour les énergies propres entre 2014 et 2020 dont 3 milliards pour les seuls renouvelables), plusieurs autres programmes visent à cofinancer spécifiquement l'innovation dans le domaine de l'énergie.

Le Plan SET (Strategic Energy Technologies) fut ainsi lancé en 2006 avec l'idée de soutenir financièrement des projets de recherche européens. Ce programme fut réactualisé en 2015 avec un périmètre plus large subdivisé en 10 actions destinées à refléter les priorités de la stratégie de l'Union de l'énergie. Le secteur privé est étroitement associé à la gouvernance et à la définition des priorités industrielles, notamment à travers les ETIP (European Technology and Innovation Platform)[26]. La Commission préside par ailleurs, en coopération avec les États membres scandinaves la conférence ministérielle Energie propre et la Mission Innovation dont l'objectif est d'aboutir à un doublement de l'aide accordée par les États-membres à la recherche-développement entre 2015 et 2021.

Dans sa Communication « Accélérer l'Innovation en matière d'Energie Propre »[27] la Commission européenne synthétisa ses initiatives pour structurer davantage le soutien apporté aux technologies induites par la transition énergétique. Les principaux points suivants sont notamment évoqués :

- ✓ Création d'incitations fortes et cohérentes en faveur de l'investissement privé dans la recherche et le développement de l'énergie propre.
- ✓ Déploiement d'instruments financiers ciblés pour diminuer le risque des investissements privés dans des technologies énergétiques propres ou des modèles commerciaux non testés mais prometteurs, notamment en raison d'incertitudes scientifiques, technologiques ou liées au marché.
- ✓ Orientation du financement apporté par l'Union européenne (UE) à la recherche et l'innovation (notamment dans le cadre du programme Horizon 2020)
- ✓ Évolution du cadre réglementaire pour orienter les subventions des États membres dans le domaine énergétique vers les énergies décartonnées plutôt que fossiles.
- ✓ La décarbonisation du parc immobilier de l'Union d'ici 2050. Les bâtiments représentent 40 % de la demande énergétique, et près de 75 % du parc immobilier de l'UE doit être rénové du point de vue de l'efficacité énergétique.
- ✓ Le renforcement de la prééminence de l'UE dans le secteur des énergies renouvelables et le maintien de sa position dominante dans le monde en ce qui concerne ces technologies.
- ✓ Le développement de solutions abordables pour le stockage de l'énergie, notamment en favorisant la relance de la production d'éléments de batterie en Europe.
- ✓ La promotion de l'électromobilité par le développement de batteries moins chères et plus autonomes, ainsi que par la mise au point de solutions de recharge plus rapides.

[25] JRC report "Research, Innovation and Competitiveness in the Energy Union
[26] Communication de la Commission européenne, *Towards an Integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan: Accelerating the European Energy System Transformation*, C(2015) 6317 final, 15.09.2015.
[27] Communication COM (2016) 763, Bruxelles, 30.11.2016.

	Public R&D Exp. (in € m)		Share of Public R&D Exp. by GDP	
	2015	2016	2015	2016
EU 28				
Germany	53.0	49.7	0.0017%	0.0017%
Denmark	26.1	22.7	0.0096%	0.0087%
Spain	22.6		0.0021%	
Netherlands	16.1		0.0024%	
United Kingdom	10.0	9.9	0.0004%	0.0005%
France	9.6		0.0004%	
Belgium	4.3		0.0011%	
Sweden	3.7	2.3	0.0008%	0.0005%
Finland	2.6		0.0012%	
Poland	0.8	0.2	0.0002%	0.0000%
Austria	0.5		0.0002%	
Portugal	0.3		0.0002%	
Ireland	0.2		0.0001%	
Czech Republic	0.1	0.1	0.0001%	0.0001%
Slovakia	0.0	0.0	0.0000%	0.0000%
Hungary	0.0	0.0	0.0000%	0.0000%
Italy	0.0		0.0000%	
Total EU	150.0	84.9	0.0010%	0.0006%
Other Countries				
Japan	215.7	199.8	0.0055%	0.0045%
Korea	31.5		0.0025%	0.0000%
United States	77.4	67.7	0.0005%	0.0004%
Australia	0.3	0.1		
Canada	4.5	7.0	0.0008%	0.0005%
New Zealand	0.0	0.0		
Norway	18.0	17.0	0.0052%	0.0048%
Switzerland	1.8	1.8	0.0003%	0.0004%
Turkey	0.7	1.3	0.0001%	0.0002%

Source : JRC SETIS, Eurostat, WDI Database

Tableau 1 Effort de recherche publique dans les secteurs de l'éolien et du photovoltaïque Source : JRC/Eurostat

	Public R&D Exp. (in € m)		Share of Public R&D Exp. by GDP	
	2015	2016	2015	2016
EU 28				
Germany	82.0	78.6	0.0027%	0.0028%
France	71.1		0.0033%	
Netherlands	51.7		0.0076%	
Spain	15.2		0.0014%	
United Kingdom	14.3	15.5	0.0006%	0.0007%
Denmark	11.5	8.5	0.0042%	0.0033%
Austria	9.1		0.0027%	
Finland	6.8		0.0032%	
Belgium	6.6		0.0016%	
Sweden	6.5	6.2	0.0015%	0.0015%
Poland	4.7	0.6	0.0011%	0.0001%
Portugal	1.9		0.0011%	
Ireland	0.7		0.0003%	
Czech Republic	0.7	0.4	0.0004%	0.0002%
Slovakia	0.1	1.2	0.0001%	0.0016%
Hungary	0.0	0.0	0.0000%	0.0000%
Italy	0.0		0.0000%	
Total EU	282.8	110.9	0.0019%	0.0008%
Other Countries				
Australia	83.7	52.7		
United States	82.6	100.1	0.0005%	0.0006%
Japan	59.2	57.4	0.0015%	0.0013%
Korea	43.6		0.0035%	0.0000%
Switzerland	42.1	42.1	0.0070%	0.0087%
Norway	13.4	14.8	0.0038%	0.0042%
Canada	10.4	15.2	0.0007%	0.0011%
Turkey	4.7	6.8	0.0006%	0.0008%

Source : JRC SETIS, Eurostat, WDI Database

L'aversion de la Commission européenne et de plusieurs États-membres pour la notion même de politique industrielle limite néanmoins les chances de voir les industriels européens s'organiser. La Commission n'a pas encore rompu avec l'idée que seul le marché « sélectionne les gagnants »[28], une idée qu'invitent à nuancer le nombre d'innovations soutenues initialement par la puissance publique (Mazzucato, 2015).

La Commission semble se penser principalement comme garante de la concurrence au sein de l'Union, comme « facilitateur » dans le tissage de coopérations et de partenariats entre industriels et comme soutien à la recherche-développement. Ainsi, dans le paquet législatif « Une énergie propre pour tous les Européens », l'idée d'un forum rassemblant les industries liées à la transition énergétique fut adopté. Divisé en 3 sections (renouvelables, batteries, construction), le forum s'est réuni une première fois en 2017. L'objectif est d'identifier les segments de la chaîne de valeur où l'offre européenne est susceptible de s'imposer et de discuter des choix règlementaires permettant à l'industrie européenne de mieux profiter de la transition énergétique.

Ce type d'initiatives peut paraître limité au regard des moyens mis à la disposition des industries du secteur dans d'autres pays, au Japon ou en Chine par exemple. Toutefois, dès lors que l'UE s'interdit de protéger excessivement son marché et d'intervenir directement dans la sélection des acteurs industriels à soutenir, les alternatives sont peu nombreuses.

[28] La Commissaire en charge de la politique de la concurrence Neelie Kroes déclarait ainsi en 2006: "Let's be under no illusion: it is markets and not politicians that pick the winners". Neelie Kroes, Speech to the Villa d'Este Forum, 2 September 2006. In : Thomas Pellerin-Carlin, Jean-Arnold Vinois, Eulalia Rubio, Sofia Fernandes : *Making the energy transition a European success ; Tackling the democratic, Innovation, financial and social challenges of the Energy Union*, Notre Europe, Institut Jacques Delors, Studies & Reports, septembre 2017.

Une autre politique industrielle peut-elle s'envisager ?

L'idée d'exiger dans les appels d'offre diffusés qu'une partie des équipements provienne de sites de production européens est promue par certains industriels. À l'argument industriel s'ajoute en outre un argument environnemental, le bilan carbone d'un produit construit à proximité d'une installation étant manifestement meilleur que dans le cas d'un produit importé. La conformité de telles dispositions avec les règles de l'OMC (qui a notamment arbitré contre l'Inde et la province de l'Ontario en la matière) n'est toutefois pas évidente et la Commission européenne n'y est guère favorable. Aucun État-membre ne s'est par conséquent engagé dans cette voie, même si d'autres pays dans le monde y recourent régulièrement.

Autre disposition envisageable, celle d'un accord entre un investisseur donné et les autorités pour négocier la construction d'un site de production en contrepartie d'un soutien apporté à la demande. Cette approche a été mise en œuvre au Royaume-Uni, dans le secteur éolien.

Certains industriels considèrent qu'introduire des exigences en termes de qualité et/ou de rendement, soit dans le cadre des appels d'offres soit pour équiper des établissements publics, reviendrait à écarter une partie significative des panneaux importés de Chine. Des pratiques voisines sont en cours au Japon où l'organisme de certification impose des normes pour les onduleurs qui sont à la fois peu transparentes et différentes des normes usuelles sur le marché. Cette pratique a peu de chances d'être adoptée dans l'UE même si les lacunes de certains panneaux importés sont avérées. Le constat selon lequel les mesures de certification (par exemple IEC, UL) pour les composants de panneaux tels que les modules ou les onduleurs ne garantissent aucunement que l'équipement est en mesure de fonctionner 25-30 ans sans une dégradation de ses performances semble largement partagé.

Anciennement en poste au Centre de recherche commun de la Commission européenne, Alessandro Virtuani confirme : « Beaucoup de gens ont installé massivement des systèmes ces dernières années, que ce soit en Italie, en Espagne ou en Allemagne et nous avons souvent observé que la qualité n'était pas au rendez-vous, même pour des produits ayant reçu la certification IEC »[29]. En outre, une part importante des consommateurs, qu'il s'agisse de développeurs ou de particuliers, se focalisent sur le temps de retour de leur investissement, privilégiant ainsi les produits bon marché. Le coût du Watt à un moment précis leur importe davantage que le coût de production d'un système tout au long de sa mise en service.

Sans nécessiter de changements règlementaires, une meilleure sensibilisation du public à l'exigence de qualité serait également bienvenue dans la mesure où la forte croissance du marché tirée par les tarifs d'achat a abouti à relâcher les exigences en la matière[30]. L'établissement de labels pourrait constituer une alternative séduisante. Comme pour les appareils ménagers, une liste de lettres pourrait fournir une indication quant à la qualité du panneau solaire au regard de ses performances techniques et de son bilan carbone. L'association Solar Power Europe soutient un tel dispositif et le gouvernement français l'a également évoqué. En France, un appel d'offres PV de 200 MW proposa une prime de 15% pour tout projet recourant à des panneaux solaires ayant un bilan carbone avantageux. La mise en place d'un label européen qui associerait performance environnementale (au-delà du seul bilan carbone), robustesse et performances technique favoriserait les technologies les plus avancées, telles les couches minces. Elle n'est pas privilégiée pour l'heure.

5. Une géographie de la batterie dominée par l'Asie

Les technologiques disponibles

S'agissant des technologies de stockage, les batteries sont constituées de cellules de base regroupées en modules, l'ensemble étant géré par un système électronique. Les avancées ont été sensibles ces dernières années qui expliquent l'accroissement de l'autonomie des véhicules électriques avec l'adoption progressive de la technologie lithium-ion. D'autres solutions apparaissent certes que ce soit pour le stockage stationnaire (batteries à flux avec ou sans vanadium) ou pour le stockage mobile (piles à combustible, aluminium-air, sodium-soufre, batteries à base de plastique et de céramique dépourvues

[29] Op. cit.
[30] Intervention de Paula Mints, European Technology and Innovation Platform for Photovoltaics, Rapport de la conférence « PV manufacturing in Europe », Bruxelles, 19 mai 2017.

de terres rares). Néanmoins, le coût ou les limites techniques de ces technologies en limitent pour l'heure les chances d'une commercialisation à grande échelle.

Au final, la concurrence prévaut principalement entre les différentes variantes de la technologie lithium-ion (NMC, NCA, LFP, LCO, LMO, LTO[31]). Les batteries de voitures électriques et hybrides recourent principalement aux technologies NMC, NCA, LMO sauf en Chine où la technologie LFP, moins efficace mais plus sure que la technologie NMC/NCA, est privilégiée (notamment par le constructeur BYD) (Mathieu, 2017). Néanmoins, la technologie NMC devrait s'imposer en Chine également.

À terme, des innovations de rupture ne sont pas à exclure. Si diverses technologies sont à l'étude (Lithium metal (Li metal), lithium-sulphur (Li-S) batteries, lithium-air (Li-air), la batterie solide envisagée par certains constructeurs automobiles (comme Toshiba) offrirait plusieurs avantages, à commencer par celui d'une sécurité accrue. Dans les batteries lithium-ion actuellement commercialisées, l'accumulateur s'avère en effet potentiellement instable en cas de surcharge, ou lorsque la température est inférieure à –5 °C. Dans ces cas de figure, des dendrites (excroissances) peuvent apparaître au niveau d'une des deux électrodes et provoquer un court-circuit en touchant la seconde électrode. Le Battery Management System (BMS), un système électronique qui contrôle la charge de la batterie, réduit les risques en évitant les surtensions et sous-tensions à l'origine de l'emballement thermique. L'introduction d'un électrolyte solide apporte néanmoins bien davantage de garanties de sécurité. Des batteries au lithium à l'état solide ne présentant aucun danger sont déjà commercialisés (accumulateurs lithium-métal-polymère -LMP), notamment par le groupe Bolloré mais les lacunes de cette technologie (décharge de la batterie même en cas de non-utilisation) paraissent difficile à surmonter[32].

D'autres variantes de la batterie lithium-ion sont annoncées comme étant à la fois stables, soumises à des temps de recharge de l'ordre de quelques minutes et moins onéreuses que les batteries actuellement commercialisées. Dotées d'un électrolyte constitué à partir d'une plaque de verre (qui fait office de séparation entre l'anode et la cathode), ces batteries recourent à différents métaux (lithium, potassium, sodium, titane-nobium) et leur commercialisation est d'ores et déjà annoncée par certains constructeurs[33].

En somme, si des ruptures technologiques ne sont pas à exclure, l'innovation incrémentale à partir de la technologie lithium-ion paraît la plus probable à terme et l'enjeu industriel pour l'Europe est ici majeur compte-tenu de l'essor du véhicule électrique et de la montée en puissance des énergies intermittentes. Or, comme dans le secteur du photovoltaïque, l'Asie et notamment la Chine ont acquis une avance conséquente.

Un marché de la batterie dominé par l'Asie

La chaîne de valeur de la batterie est composée de 6 éléments, du minerai issu du sous-sol à l'activité de recyclage. Les principales composantes de la cellule sont l'anode, la cathode, l'électrolyte le séparateur. Sur tous les éléments de la chaîne de valeur, l'Asie détient des positions fortes.

La qualité de la cellule d'une batterie étant très dépendante de la qualité de la cathode, plusieurs industriels comme Panasonic, LG Chem, BYD ont internalisé ce segment de la chaîne de valeur. L'Asie fournit une part importante de la production mondiale de cathodes, la Chine ayant à elle seule 39% de part de marché[34]. Les fournisseurs européens (Umicore en Belgique et Johnson Matthey (UK) avaient une part de marché de 13% en 2015). Le marché apparaît néanmoins dynamique avec de nouveaux acteurs faisant leur entrée dans le contexte d'une forte demande suscitée par la mobilité électrique. Il

[31] Respectivement Lithium Nickel Manganese Cobalt, Lithium Nickel cobalt Aluminum Oxide, Lithium Iron Phosphate, Lithium cobalt Oxide, Lithium Manganese Oxide, Lithium Titanate Oxide.
[32] Les principaux défauts de cette technologie sont sa faible densité énergétique (100 Wh/kg contre 250 Wh/ kg pour les accumulateurs NMC actuels), sa température élevée de fonctionnement (70°C), qui provoque l'auto-consommation de l'énergie et sa fragilité en cas de décharge profonde.
[33] Toshiba annonça ainsi en 2017 nouvelle génération de batterie lithium-ion capable de se charger à 100% en 6 minutes et d'assurer une autonomie de 320 km pour une petite voiture. Toshiba comptes utiliser une anode en oxyde de titane-niobium (et non en graphite. La commercialisation des premiers véhicules ainsi équipés est prévu pour 2019.
[34] Hocking, M., et al., *Industry - Lithium 101 - Welcome to the Lithium-ion Age, FITT,* Markets Research9 May 2016, Deutsche Bank.

est vrai que le marché est appelée à croître rapidement, passant de 140000 tonnes en 2015 à environ 400 000 tonnes en 2025[35].

La production d'anode est également l'apanage du Japon et de la Chine (Hitachi Chemicals, Nippon Carbon et BTR Energy même si certaines entreprises européennes tentent de s'affirmer (SGL en RFA, Imerys et Heraeus (RFA) en raison de la forte croissance attendue du marché. Ce dernier devrait en effet passer de 76,000 à 250,000 tonnes en 2025.

Comme la cathode et l'anode, la production d'électrolytes est concentrée en Asie, la Chine détenant à elle seule 60 % du marché. Le principal acteur européen (BASF) n'avait qu'une part de marché de 0,4% en 2015. Le Chinois CapChem, a plus que doublé sa part de marché en quelques années pour atteindre 14 % en 2015. À l'inverse, producteurs japonais et coréens ont connu une baisse de leurs parts de marché. Si le marché connaît une forte croissance, les surcapacités sont notables, moins de la moitié de la capacité de production disponible étant utilisée au Japon et en Corée. Le marché devrait passer de 62 000 tonnes à plus de 235,000 en 2025 avec un secteur automobile absorbant 50% de la production contre 33% à ce jour.

Le marché des séparateurs est également dominé par l'Asie, le Japon ayant une part de marché de 48 % même si l'industrie américaine n'est pas marginale pour autant (Celgard détient une part de marché de 9%, Entek de 3% en 2015).

Au-delà de la montée en puissance des énergies intermittentes, le véhicule électrique constitue l'enjeu principal énergétique de la concurrence autour des technologies de stockage. Plusieurs industriels ont pris des positions fortes dans le secteur automobile (Panasonic, Samsung, LG Chem) et des partenariats se constituent entre fabricants de voitures et industriels de la batterie (Toshiba/Panasonic). Les batteries lithium-ion batteries sont entrées sur le marché au début des années 90, initiées par Sony. Une base industrielle s'est peu à peu constituée en Asie, via notamment Samsung SDI (Corée du Sud), LG Chem (Corée du Sud), Sanyo-Panasonic (Japon), Sony (Japon) and BYD (Chine).

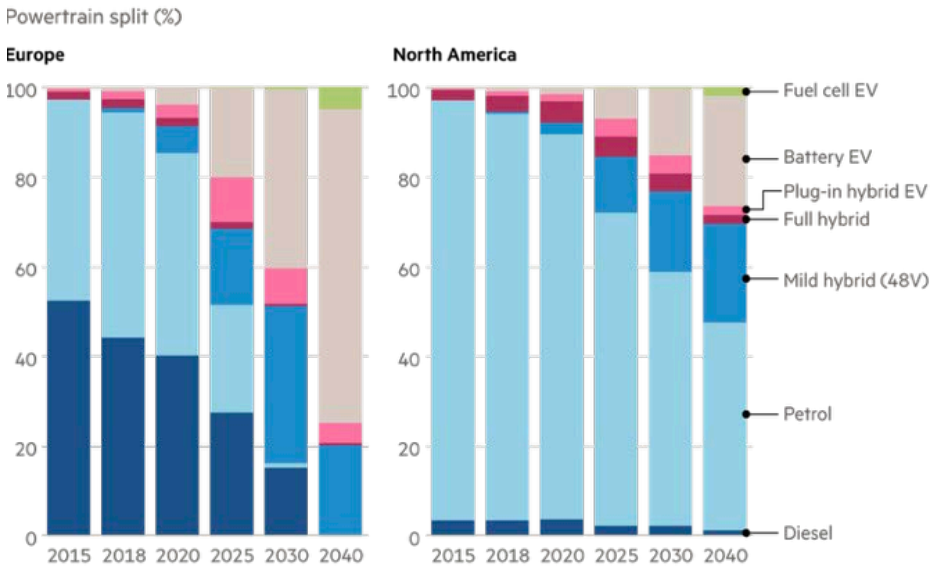
Entre 2014 et 2016 les capacités de production de batteries pour automobile ont crû de manière significative. La Corée a ainsi augmenté ses capacités de 1,5 fois, le Japon de 2,4 fois, le Chine de 2,7. La Chine a annoncé la construction de 19.3 GWh de capacités venant s'ajouter à ses capacités actuelles (30.4 GWh). La croissance la plus spectaculaire a toutefois été enregistrée aux États-Unis où la production a été multipliée par 10 entre 2014 to 2016 grâce à la construction de la Tesla Gigafactory. À l'échelle mondiale, les stratégies des constructeurs varient, l'externalisation totale pouvant être adoptée comme l'internalisation de toute la chaîne de valeur, voire la prise de participation dans des mines de lithium. La majorité des constructeurs essaie d'internaliser au moins une partie des compétences, les asiatiques étant les plus ambitieux en la matière tandis que les constructeurs européens se voient contraints de dépendre pour une grande partie des process de leurs fournisseurs.

Si Tesla a engagé la construction d'une usine de grande taille dans le Nevada, la production de batterie reste concentrée en Asie, notamment en Chine où 84% des sites devraient être établis en 2020 (cf. supra). Au premier semestre 2017, le japonais Panasonic détenait 29 % du marché mondial des batteries pour véhicules hybrides et tout électrique, le sud-coréen LG Chem 13 % et le chinois BYD 10 %[36].

En Europe, l'enjeu est d'autant plus important que le marché de l'électrique est promis à un développement de grande ampleur, plus précoce qu'aux États-Unis (graphique 18). Pourtant, peu d'investissements dans de nouveaux sites de production sont intervenus au cours de la décennie écoulée, si ce n'est la mise en service d'une usine de 5 GWh BMZ Li-ion à Karlstein (RFA). La base industrielle en Europe est de fait réduite. Elle comprend SAFT (Total), principal fournisseur européen grâce à son site de Nersac (France), ABSL Power Solutions à Culham (Royaume-Uni), (EnerSys) focalisé sur les applications spatiales, AGM Batteries Ltd. in Thurso (Royaume-Uni), le suisse Leclanché à Willstätt (RFA). Dans sa volonté d'être numéro un mondial de la mobilité électrique d'ici à` 2025, VW projette de commercialiser d'ici à 2025 50 modèles électriques et 30 modèles hybrides.

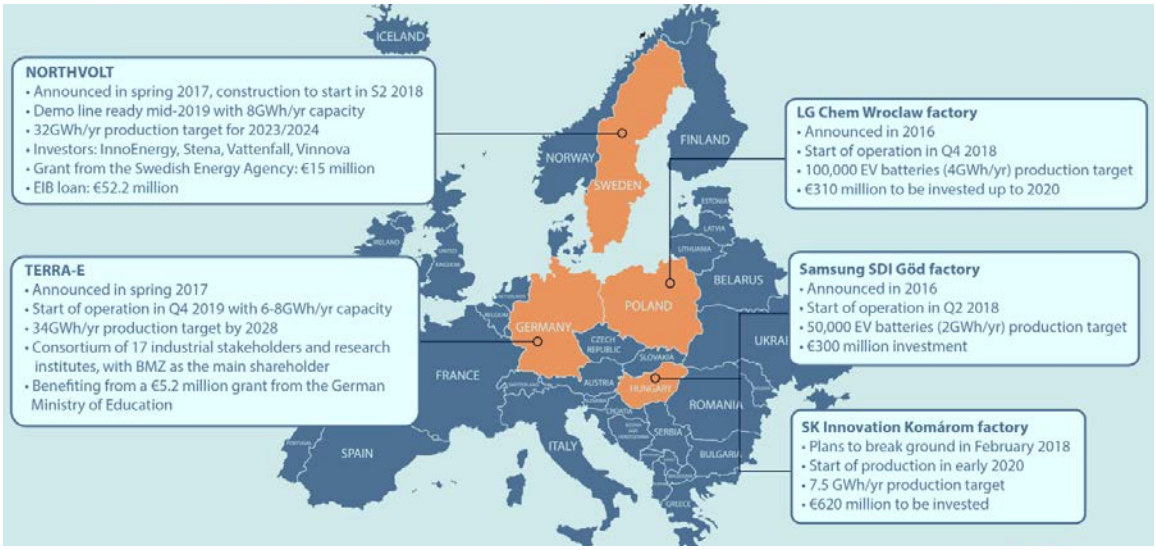
[35] Pillot, C., The worldwide rechargeable battery market 2015-2025, June 2016, Avicenne Energy.
[36] Yann Rousseau, « Toyota recrute Panasonic pour concevoir les batteries de ses futures voitures électriques », *Les Echos*, 13.12.2017.

Un plan d'investissements de 72 milliards € d'ici à 2022 dont plusieurs milliards dédiés à la conception de batteries a été annoncé dans cette optique. Au total, la réalisation des ambitions affichées induirait 150 GWh de capacités pour les seuls besoins du constructeur alors que les capacités totales actuelles dépassent à peine 100 GWh dans le monde (un chiffre qui devrait doubler d'ici à 2021 selon Bloomberg New Energy Finance).



Graphique 18
Évolution des technologies dans l'automobile aux États-Unis et en Europe
Source : Financial Times

Sous l'impulsion d'un ancien cadre de Tesla, la plus grande usine de batteries d'Europe est envisagée en Suède avec le soutien de plusieurs investisseurs[37]. In fine, les sites européens de premier ordre pourraient résulter d'investissements asiatiques (carte 2).



Carte 2
Principaux sites de production de batteries planifiés
Source : IFRI (Institut français des relations internationales)

LG Chem (KR) prévoit ainsi une usine en Pologne (Wrocław) avec une production annuelle de 50 000 batteries. Samsung SDI (KR) prévoit une usine à Jaszfenyszaru (Hongrie). S'agissant de la France, l'usine de Flins, qui devait produire 250 000 batteries par an dès 2015, n'a pas été construite. Saft n'a pas été retenu par les constructeurs français, qui lui ont préféré les fabricants coréens, japonais ou chinois. Renault a renforcé ses accords avec le sud-coréen LG Chem, qui fournira également les batteries

[37] Baptisée Northvolt, la société dispose du soutien de l'électricien Vattenfall, du conglomérat suédois Stena, du fonds néerlandais InnoEnergy, de l'Agence suédoise de l'énergie et de l'agence publique suédoise pour l'innovation Vinnova.

des modèles hybrides de PSA. Pour ses voitures électriques, ce dernier fera appel aux chinois CATL (Contemporary Amperex Technology Limited).

Graphique 19
Étapes de l'Alliance européenne de la batterie
Source : IFRI (Institut français des relations internationales)

De fait, les producteurs européens sont à la fois confrontés à l'avance technologique prise par les concurrents asiatiques, aux coûts de production en Chine et à des conditions de marché difficiles tant la forte demande attendue en matière de mobilité électrique est déjà en partie anticipée par les principaux acteurs. Fin 2015, la filiale de Daimler (Li-Tec) spécialisée sur la production de batteries Li-ion pour le seul secteur automobile cessa ainsi sa production avec pour argument principal les surcapacités existantes[38]. Dans ce contexte, la Commission européenne a esquissé une réponse industrielle sous la forme d'un « Airbus de la batterie » (graphique 19).

L'Airbus de la batterie

Comme pour les énergies renouvelables, l'Union européenne a enrichi au cours des années passées son cadre règlementaire pour que les flottes automobiles soient moins attentatoires au climat et à la qualité de l'air. Des critères stricts ont notamment été introduits à l'horizon 2021, suscitant une demande en véhicules moins polluants. En revanche, le volet industriel a été moins développé alors que les constructeurs, pour échapper aux sanctions prévues par la règlementation européenne, se voient contraints d'investir massivement dans le véhicule électrique.

Le vice-président de la Commission Maroš Šefčovic présenta en octobre 2017 l'« Airbus de la batterie » comme une réplique du projet aéronautique des années 60 où plusieurs acteurs industriels disposaient de technologies avancées mais ne purent s'inscrire dans un projet plus global qu'avec l'initiative de constituer Airbus. Or, les besoins en batteries s'annoncent significatifs (cf. supra). L'initiative prévoit des financements nouveaux (d'un montant de 2,2 milliards €), ambitionne de susciter la création de 20 « Gigafactories », d'encourager des partenariats entre acteurs du secteur (Saft a ainsi noué une alliance avec Siemens, Manz et Solvay) avec l'idée de tirer profit d'un marché européen de la batterie qui devrait atteindre 250 milliards € d'ici à 2025. Les moyens avancés devraient permettre de susciter un investissement total de 20 milliards (le plan Juncker a mobilisé 250 milliards) dans le cadre d'une « Alliance européenne de la batterie » associant États-membres, industriels, BEI (Banque européenne d'investissement) et Commission européenne.

Le texte énumère 18 recommandations, 49 actions (telles que la simplification des procédures) afin de susciter des projets dont le premier, Northvolt en Suède (cf. supra), a déjà obtenu un prêt de la BEI pour €52.5 million (l'usine doit avoir une capacité de production de 32 GWh. Outre cette initiative, la Commission européenne a, dans le cadre d'Horizon 2020, lancé en février 2018 le cinquième des 6 EIC (European Innovation Council) d'un montant de €10 million dédié spécifiquement à l'innovation dans le secteur de la batterie.

Si le consortium Airbus est cité comme modèle, le projet consiste davantage à créer un réseau de clusters innovants et non à permettre l'émergence d'un seul acteur comparable à l'avionneur européen. Les chances de succès sont limitées en raison du caractère tardif de l'initiative. D'ores et déjà, plusieurs industriels ont noué des partenariats avec des fournisseurs asiatiques (à l'instar de Renault) et ne sentent donc pas directement concernés par l'Alliance européenne de la batterie. En outre, le marché

[38] http://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/elektromobilitaet-der-staat-zahlt-mit- 1.2842354-2.

est certes prometteur à terme mais à ce jour les surcapacités sont manifestes, au point que certains acteurs renoncent à investir (Daimler). La concurrence entre Asie et Europe se manifeste également dans le secteur des métaux dits critiques, nécessaires aux batteries, aux éoliennes et aux panneaux solaires. Dans ce cas également, l'UE tente de trouver des alternatives à une forte dépendance à l'égard des fournisseurs asiatiques.

6. L'enjeu des métaux critiques

Pour la production de batteries, d'éoliennes et de panneaux solaires, l'industrie requiert une série de métaux dont les coûts voire la disponibilité posent question. À l'instar des énergies éolienne et photovoltaïque, la voiture électrique recourt, notamment pour son moteur et sa batterie, à des métaux dits critiques, tels que les terres rares, le lithium ou encore le cobalt dont la volatilité des cours voire la disponibilité posent question. La transformation des systèmes énergétiques vient en effet soutenir une demande déjà dynamique de ces métaux (notamment dans l'électronique grand public) et dont les gisements sont concentrés dans un nombre limité de pays. Ces métaux voient leur prix augmenter avec la montée en puissance de la transition énergétique en matière de mobilité et l'Europe peut ici difficilement pourvoir par elle-même à ses besoins. Soit la géologie ne le permet pas, soit l'acceptation sociale est incertaine.

Les métaux sollicités par la transition énergétique

En premier lieu, les métaux concernés regroupent le groupe des « terres rares » (qui sont en réalité des métaux et dont les propriétés plus que les réserves sont rares) composé de 15 lanthanides, auxquels sont ajoutés l'yttrium et, parfois, le scandium (tableau 1). Ces 17 métaux sont le plus souvent extraits conjointement avec d'autres minerais et demandent, au-delà des activités d'extraction proprement dite, des filières de raffinage. Produits à environ 90% par la Chine, leur disponibilité est de nature à influer sur les technologies de la transition énergétique et sur la compétitivité des acteurs de cette dernière.

Au-delà des terres rares, d'autres métaux sont jugés critiques. L'UE constitua une première liste en juin 2011. Comprenant 14 métaux[39], la liste fut portée à 20 métaux en 2014[40] puis à 27 en 2017[41] (tableau 2). Autant de métaux jugés critiques du fait qu'ils jouent un rôle prépondérant dans la chaîne de valeur et qu'ils sont fournis par un groupe restreint de pays. Dans la majorité des cas, les métaux identifiés sont peu substituables, ne bénéficient pas d'un taux de recyclage significatif et sont appelés à connaître une forte croissance de la demande.

Si ces métaux ont plusieurs applications, ils sont particulièrement nécessaires aux batteries des véhicules électriques et hybrides, aux panneaux solaires et aux éoliennes. Les aimants permanents (présents dans une partie des éoliennes et dans les voitures électriques) nécessitent ainsi des terres rares (néodyme, praséodyme et dysprosium notamment). Les éoliennes utilisant une boite de vitesse utilisent moins de terres rares que celles à entraînement direct mais ces dernières sont plus fiables, exigent moins d'entretien et sont par conséquent adaptées à l'éolien marin. Les systèmes photovoltaïques recourent soit à des cellules de silicium, soit à des couches minces où sont associés notamment le tellure, le cadmium (pour les cellules CdTe[42]), le gallium, l'indium et le sélénium (pour les cellules CIGS[43]). Les panneaux à base de silicium représentent 90% du marché, recourent à un matériau abondant (la silice) mais la technologie des couches minces permet des rendements supérieurs (Marscheider-Weidemann et al., 2016). Les batteries requièrent, elles, dans des proportions variables selon les technologies, du nickel, du cobalt, du lithium et des terres rares (lanthane, cérium, néodyme, praséodyme notamment).

Si les métaux dits critiques sont déjà sollicités par d'autres secteurs, la transformation des systèmes énergétiques change la donne. À titre d'exemple, les quantités d'équivalent Li métal sont inférieures à 1 g dans les téléphones portables, de l'ordre de 10 g dans les ordinateurs mais 3,3 kg sont nécessaires dans les véhicules électriques et 1,3 tonne est requise pour un stockage de 8MWh (ANCRE, 2015, p. 25).

[39] Communication de la Commission européenne, «Relever les défis posés par les marchés des produits de base et les matières premières», COM(2011) 25.
[40] Communication de la Commission européenne, «sur la révision de la liste des matières premières critiques pour l'UE et la mise en œuvre de l'initiative "Matières premières"», COM(2014) 297.
[41] Communication de la Commission européenne « relative à la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE », COM(2017) 490.
[42] Le tellurure de cadmium (CdTe) est un matériau cristallin composé de cadmium et de tellure.
[43] Cuivre, Indium, Gallium, Sélénium.

Au final, la demande en métaux critiques de la part du secteur photovoltaïque pourrait s'accroître de 270% d'ici à 2030 (JRC, 2016). Pour l'énergie éolienne, la demande en dysprosium pourrait augmenter de 660%, celle de néodyme de 2 200%. Alonso et al. (2013) confirment l'essor annoncé de la voiture électrique et de l'énergie éolienne et estiment qu'en conséquence la demande en dysprosium sera multipliée par 7 et celle de néodyme par 28 d'ici à 2035. D'ici à 2025, la demande intérieure chinoise pour le néodyme pourrait excéder la production mondiale de 9 000 tonnes, la Chine devenant ainsi un importateur net[44]. Pour autant, le risque d'un épuisement de la ressource ou d'un renchérissement soudain est difficile à préciser, l'évolution de la demande en métaux critiques pouvant varier sensiblement selon les efforts entrepris pour décarboner le mix énergétique mondial.

Tableau 2. Liste et origine des métaux critiques pour l'Union européenne

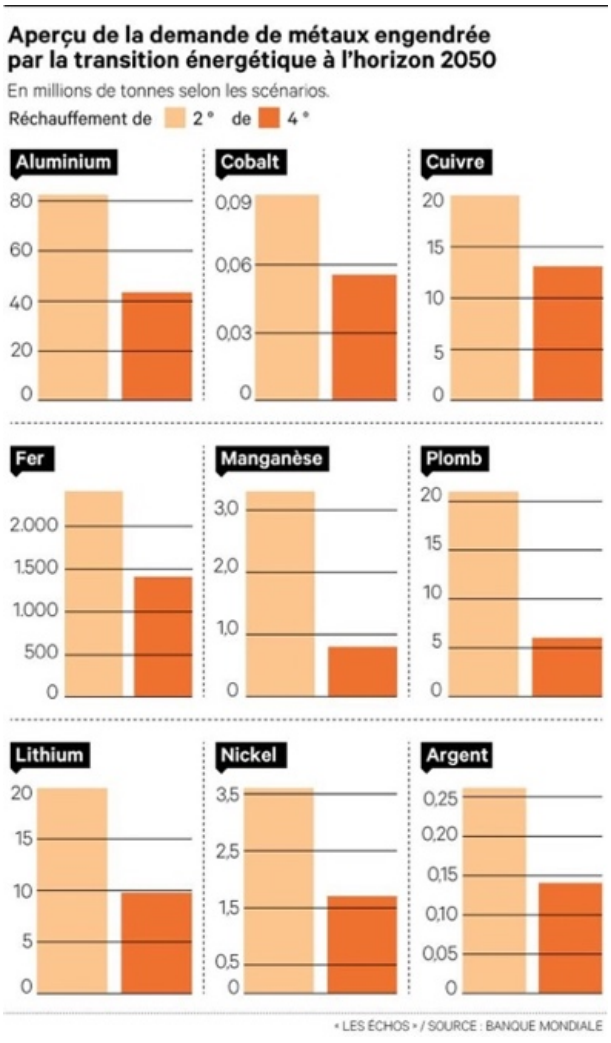
Source : Communication de la Commission européenne « relative à la liste 2017 des matières premières critiques pour l'UE », COM (2017) 490.

Métaux	Principaux producteurs (moy. 2010-2014)	Sources (moy. 2010-2014)	Indice de substitution	Taux de recyclage
Antimoine	Chine (87 %) Viêt Nam (11 %)	Chine (90 %) Viêt Nam (4 %)	0,91/0,93	28 %
Baryte	Chine (44 %) Inde (18 %) Maroc (10 %)	Chine (34 %) Maroc (30 %) Allemagne (8 %)	0,93/0,94	1 %
Béryllium	États-Unis (90 %) Chine (8 %)	Sans objet	0,99/0,99	0 %
Bismuth	Chine (82 %) Mexique (11 %) Japon (7 %)	Chine (84 %)	0,96/0,94	1 %
Borate	Turquie (38 %) États-Unis (23 %) Argentine (12 %)	Turquie (98 %)	1,0/1,0	0 %
Cobalt	République démocratique du Congo (64 %) Chine (5 %) Canada (5 %)	Finlande (66 %) Russie (31 %)	1,0/1,0	0 %
Charbon à coke	Chine (54 %) Australie (15 %) États-Unis (7 %) Russie (7 %)	États-Unis (38 %) Australie (34 %) Russie (9 %)	0,92/0,92	0 %
Spath fluor	Chine (64 %) Mexique (16 %) Mongolie (5 %)	Mexique (27 %) Espagne (13 %) Chine (12 %) Afrique du Sud (11 %)	0,98/0,97	1 %
Gallium	Chine (85 %) Allemagne (7 %) Kazakhstan (5 %)	Chine (36 %) Allemagne (27 %) États-Unis (8 %)	0,95/0,96	0 %
Hafnium	France (43 %) États-Unis (41 %) Ukraine (8 %) Russie (8 %)	France (71 %) Canada (19 %) Chine (10 %)	0,93/0,97	1 %
Hélium	États-Unis (73 %) Qatar (12 %) Algérie (10 %)	États-Unis (51 %) Algérie (29 %) Qatar (8 %)	0,94/0,96	1 %
Indium	Chine (57 %) Corée du Sud (15 %) Japon (10 %)	Chine (28 %) Belgique (19 %) Kazakhstan (13 %) France (11 %)	0,94/0,97	0 %
Magnésium	Chine (87 %) États-Unis (5 %)	Chine (94 %)	0,91/0,91	9 %
Graphite naturel	Chine (69 %) Inde (12 %) Brésil (8 %)	Chine (63 %) Brésil (13 %) Norvège (7 %)	0,95/0,97	3 %
Caoutchouc naturel	Thaïlande (32 %) Indonésie (26 %) Viêt Nam (8 %) Inde (8 %)	Indonésie (32 %) Malaisie (20 %) Thaïlande (17 %) Côte d'Ivoire (12 %)	0,92/0,92	1 %
Niobium	Brésil (90 %) Canada (10 %)	Brésil (71 %) Canada (13 %)	0,91/0,94	0,3 %
Phosphate naturel	Chine (44 %) Maroc (13 %) États-Unis (13 %)	Maroc (28 %) Russie (16 %) Syrie (11 %) Algérie (10 %) UE – Finlande (12 %)	1,0/1,0	17 %
Phosphore	Chine (58 %) Viêt Nam (19 %) Kazakhstan (13 %) États-Unis (11 %)	Kazakhstan (77 %) Chine (14 %) Viêt Nam (8 %)	0,91/0,91	0 %
Scandium	Chine (66 %) Russie (26 %) Ukraine (7 %)	Russie (67 %) Kazakhstan (33 %)	0,91/0,95	0 %

[44] Henry Sanderson, « Lithium: the next speculative bubble? » *Financial Times*, 6 janvier 2017.
[44] Frik Els, « China to become net importer of some rare earths », 2.01.2017, http://www.mining.com/china-become-net-importer-rare-earths/. Consulté le 12 mai 2017.

Silicium métal	Chine (61 %) Brésil (9 %) Norvège (7 %) États-Unis (6 %) France (5 %)	Norvège (23 %) France (19 %) Brésil (12 %) Chine (12 %) Espagne (9 %) Allemagne (5 %)	0,99/0,99	0 %
Tantale	Rwanda (31 %) République démocratique du Congo (19 %) Brésil (14 %)	Nigeria (81 %) Rwanda (14 %) Chine (5 %)	0,94/0,95	1 %
Tungstène	Chine (84 %) Russie (4 %)	Russie (50 %) Portugal (17 %) Espagne (15 %) Autriche (8 %)	0,94/0,97	42 %
Vanadium	Chine (53 %) Afrique du Sud (25 %) Russie (20 %)	Russie (60 %) Chine (11 %) Afrique du Sud (10 %) Belgique (9 %) Royaume-Uni (3 %)	0,91/0,94	44 %
Platinoïdes	Afrique du Sud (83 %) - iridium, platine, rhodium, ruthénium Russie (46 %) - palladium	Suisse (34 %) Afrique du Sud (31 %) États-Unis (21 %) Russie (8 %)	0,93/0,98	14 %
Terres rares légères	Chine (95 %)	Chine (40 %) États-Unis (34 %) Russie (25 %)	0,90/0,93	3 %
Terres rares lourdes	Chine (95 %)	Chine (40 %) États-Unis (34 %) Russie (25 %)	0,96/0,89	8 %

- Le « taux de dépendance à l'égard des importations » tient compte de l'approvisionnement mondial et des sources d'approvisionnement effectives de l'UE pour le calcul du risque de pénurie d'approvisionnement ; ce taux est calculé somme suit : Importations nettes de l'UE / (Importations nettes de l'UE + Production intérieure de l'UE).- « L'indice de substitution » est une mesure de la difficulté à substituer la matière première, évaluée et pondérée pour toutes les applications et calculée séparément pour les deux paramètres que sont l'importance économique (« EI ») et le risque de pénurie d'approvisionnement («SR »). Les valeurs vont de 0 à 1, 1 correspondant à la substituabilité la plus faible.



L'importance économique est corrigée par l'indice de substitution (SIEI), lequel dépend des performances techniques et de l'efficacité des substituts par rapport à leur coût pour diverses applications de chaque matière. Le risque de pénurie d'approvisionnement est corrigé par l'indice de substitution (SISR), lequel dépend de la production mondiale, de la criticité et de la coproduction ou sous-production de substituts pour les diverses applications de chaque matière.

- Le « taux de recyclage des matières en fin de vie » mesure le rapport entre le recyclage des vieux métaux et la demande de l'UE pour une matière première donnée, cette dernière correspondant à l'approvisionnement de l'UE en matières primaires et secondaires.

Graphique 20

Évolution de la demande en métaux dans l'hypothèse d'un réchauffement de 2° et de 4°, en comparaison avec un scénario 6°.
Source : Les Échos/Banque mondiale

La Banque mondiale (2017) estime qu'un scénario 6°C[45] induirait une part des EnR dans ce mix de 18% (contre 14% en l'état actuel). Dans l'hypothèse où le scénario 2°C prévaudrait, ce chiffre pourrait atteindre 44% avec des conséquences radicalement différentes en termes de consommation de matériaux critiques (graphique 20).

[45] 6°C scenario : scénario d'un réchauffement de la planète de 6°.

L'importance des métaux critiques pour l'industrie

Face à la croissance des besoins alimentée par l'essor des énergies renouvelables (et par d'autres secteurs comme l'informatique), la capacité des industriels à disposer de ces métaux inquiète en raison des risques d'épuisement de la ressource et de la politique de la Chine (qui fournit environ 90% des terres rares). Le sujet a été réactualisé par la décision chinoise de réduire les exportations de certains métaux critiques en 2009, décision qui provoqua une flambée des cours. Dans cet « âge du métal rare » (Abraham, 2016), le rôle des métaux critiques est volontiers apparenté à celui du charbon au XIXème siècle et à celui du pétrole dans la géopolitique contemporaine. La thèse est confortée par la formule prêtée à Deng Xiaoping en 1992 : « le Moyen-Orient a le pétrole, la Chine a les terres rares »[46].

La question des métaux critiques est pourtant plus complexe que ne le laisse penser la formule. Les terres rares s'avèrent abondantes pour la plupart même si la Chine, avec ses coûts salariaux modestes et sa législation environnementale moins stricte qu'ailleurs, détient un rôle clef dans leur production. La notion même de criticité prête à discussion tant l'équilibre entre l'offre et la demande varie selon les métaux considérés et évolue au fil du temps.

Au-delà des terres rares, d'autres matériaux dits critiques ont vu depuis 2016 leur cours rebondir, en particulier le lithium, le nickel et le cobalt sans qu'on puisse pour autant préjuger de la suite. Dans le cas du lithium, son cours a connu une augmentation de 74% au cours de l'année 2016 malgré une augmentation de la production de 14% cette année-là[47]. Le scénario d'un « super cycle lithium » similaire à celui du minerai de fer suscité par la demande chinoise au tournant du XXIème siècle paraît plausible[48]. Il devrait être impulsé par les nombreux projets d'usine de batteries (dont celle de Tesla aux États-Unis qui prévoit de consommer une quantité de lithium égale à la production mondiale actuelle) qui porteront les capacités produites de 30GWh aujourd'hui à 175 GWh d'ici à 2020. Le marché du lithium, de l'ordre de 1 milliard USD par an, pourrait tripler de taille d'ici à 2025[49]. Pour autant, d'autres scénarios sont possibles. Le lithium étant abondant, une hausse continue des cours provoquerait assurément l'ouverture de nouvelles mines ou, du moins, une hausse de la production dans le principal pays producteur actuel, à savoir le Chili. Au final, une nouvelle baisse des cours similaire à celle constatée entre 2013 et mi-2015 ne peut donc exclue (Deutsche Bank, 2016).

Ce n'est au demeurant pas le lithium mais le nickel qui préoccupe certains constructeurs dans la mesure où les quantités utilisées dans les véhicules électriques sont nettement plus significatives. Or, les cours de ce métal, comme ceux de beaucoup d'autres, connaissent une volatilité imputable autant à l'équilibre entre l'offre et la demande qu'aux décisions prises par les États. Le métal coutait 5 000 USD/tonne au début des années 2000, 9 000 en 2017 après avoir atteint 21 000 USD en 2014 lorsque l'Indonésie introduisit des restrictions à l'exportation de plusieurs métaux (dont le nickel) pour renforcer son secteur aval. Les Philippines devinrent dans la foulée première exportatrice de ce métal. Si l'industrie du raffinage s'est en effet développée en Indonésie (entre autres grâce à des investissements chinois), les difficultés des entreprises minières et l'état des finances publiques ont conduit le pays à renoncer à une large partie de ces mesures en 2017, provoquant une chute des cours du nickel[50].

Autre composant des batteries, le cobalt a vu son cours augmenter de 50% en un an pour atteindre 21 USD en février 2017 mais en 2007, il était de 50 USD avant de retomber à 10 USD en 2015. La moitié du cobalt consommé dans le monde étant destiné au véhicule électrique (76,6% en Chine), la croissance du véhicule électrique devrait entraîner des tensions sur le marché[51]. Research and Markets (2017) anticipe ainsi un écart entre l'offre et la demande de 12 000 tonnes pour 2021. L'élasticité est ici moindre que dans le cas du lithium dans la mesure où la production de cobalt est le plus souvent concomitante de celle d'autres métaux, notamment le nickel et le cuivre. Or, pour les producteurs de nickel, la production de cobalt représente moins de 7% de leurs revenus (moins de 2% pour les producteurs de cuivre). L'évolution des cours de ces métaux de base peut donc indirectement affecter les stratégies

[46] La formule aurait été prononcée en 1987 à l'occasion d'une tournée dans le sud du pays. http://nm.cnr.cn/nmzt/60dq/tjnmg/200704/t20070412_504442760.html. Consulté le 12 juin 2017.
[47] Henry Sanderson, « Albemarle boosts lithium demand forecast on faster electric vehicle uptake », *Financial Times*, 16.03.2017.
[48] Henry Sanderson, « Electric car demand sparks lithium supply fears », *Financial Times*, 9.06.2017.
[49] Cecilia Jamasmie, *Chinese-Korean group to build $2 billion lithium batteries plant in Chile*, Mining.com, 6 décembre 2016, http://www.mining.com/chinese-korean-group-to-build-2-billion-lithium-batteries-plant-in-chile/. Consulté le 23 juin 2017.
[50] « Indonesia eases export ban on nickel ore, bauxite », Reuters, 12 janvier 2017 .
[51] Henry Sanderson, « Electric carmakers on battery alert after funds stockpile cobalt», *Financial Times*, 23.03.2017.

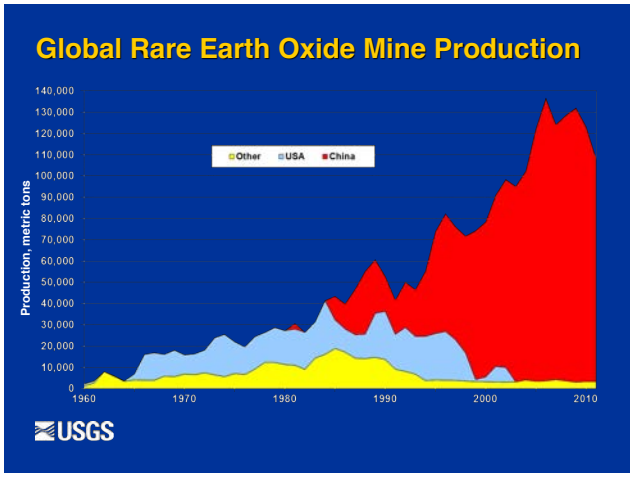
minières et influer sur l'offre de cobalt. En outre, 60% de la production mondiale provient de la RDC (République démocratique du Congo), un pays en proie à l'instabilité.

Anticiper l'évolution des cours s'avère d'autant plus difficile que les fonds spéculatifs interviennent, si nécessaire par l'acquisition physique des matériaux en question. En 2017, une demi-douzaine de fonds firent ainsi l'acquisition de 6 000 tonnes de cobalt (soit 17% de la production mondiale de 2016)[52] et des États ou des industriels ne s'interdisent pas semblables pratiques. Unique certitude : les ressources en question sont finies et le recyclage, même adossé à des politiques efficaces (qui restent à inventer) ne saurait suffire à satisfaire la demande telle qu'elle est envisagée à moyen-terme. Ce constat est toutefois loin de ne valoir que pour les terres rares et les matériaux dits critiques. Subjective, dynamique, la notion de criticité pourrait s'appliquer également à certains « métaux de base » (cuivre, zinc, acier, plomb) tant la demande croit fortement en l'absence de solutions de substitution.

Graphique 21

Montée en puissance de la Chine dans la production de terres rares

Source : USGS (United States Geological Survey)



Comme le rappellent O. Vidal et P. Christmann de 1900 à 2012, la population mondiale a cru de 1900 à 2012 de 1,7 à 7,2 milliards d'humains (facteur de 4,3), tandis que la consommation de cuivre primaire a cru d'un facteur 34 (ANCRE, 2015, p. 10). Selon eux, « pour satisfaire les besoins de l'humanité d'ici 2050, nous devrons extraire du sous-sol plus de métaux que l'humanité en a extrait depuis son origine ». En 2050, le montant cumulé d'acier, d'aluminium, de cuivre contenu dans les installations hydroélectriques, éoliennes et solaires pourrait représenter 13 fois la production de ces métaux de 2010.
La montée en puissance des énergies renouvelables a un impact significatif sur la demande en métaux de base puisque pour une même puissance nominale installée, les quantités d'acier nécessaires sont jusqu'à ` 50 à 90 fois plus importantes pour le solaire à concentration que pour le nucléaire.

La quantité cumulée d'acier, cuivre et aluminium nécessaire en 2050 pour les infrastructures de production d'électricité à partir d'énergies renouvelables atteindrait 6 à 11 fois la production mondiale totale de 2010. Or, au moins un quart des réserves connues de cuivre se situent dans des pays à la gouvernance jugée déficiente (Vidal et al., 2013). En outre, les délais pour la mise en exploitation d'une mine de cuivre oscillent entre 13 et 23 ans de sorte que l'industrie n'est pas en capacité de répondre à court-terme à de fortes oscillations de l'offre et de la demande (Ali et al., 2017). Enfin, si des stratégies de recyclage ou de substitution sont parfaitement envisageables pour les terres rares, trouver des substituts aux métaux de base (notamment l'acier, l'aluminium et le cuivre) s'avère plus compliqué.

Pour autant, les métaux de base font apparaître le même paradoxe que les matériaux dits critiques. En dépit d'une demande soutenue, d'analyses prospectives convergentes sur l'idée que cette demande est appelée à croître, les cours reflètent une autre réalité. Ils demeurent à des niveaux stables tant l'idée d'une offre s'ajustant à la demande prévaut chez les acteurs du marché.

Établir des scénarios pour les matériaux nécessaires à la transition énergétique relève ainsi de la gageure tant les facteurs à prendre en compte sont nombreux (évolution de la demande, stratégie chinoise, tensions géopolitiques, spéculation, opposition des populations locales, règlementations environnementales, etc.) et tant les évolutions technologiques peuvent être soudaines. Dans le seul secteur automobile, l'essor de l'autopartage pourrait ainsi limiter la croissance du parc automobile et réduire la consommation de certains métaux.

[52] Id.

Une production concentrée, des ressources éparses

Cette question de la disponibilité de la ressource est particulièrement importante dans le cas des terres rares dont la Chine produit environ 90% des besoins et abriterait approximativement 44% des réserves (le brésil 20%, l'Australie, l'Inde, les États-Unis entre 1 et 2% chacun[53]). Loin d'être concentrées dans le sous-sol Chinois, les terres rares sont en réalité assez répandues dans le monde. Le quasi-monopole détenu par la Chine ne vient pas de la concentration des ressources dans le sous-sol de ce pays mais d'un désengagement de la plupart des autres pays d'activités d'extraction peu rémunératrices et polluantes. Dans le même temps, la Chine s'est, elle, employée à asseoir sa domination sur le marché des terres rares. Si avant 1965, l'Afrique du Sud, le Brésil, l'Inde étaient les pôles principaux de production, les États-Unis et notamment la mine de Mountain Pass (cf. graphique 21) prirent le relais avant que la Chine ne s'impose grâce à des coûts salariaux bas et à l'absence d'une législation environnementale contraignante.

À l'instar des terres rares produites principalement par la Chine, le cobalt, nécessaire au stockage de l'énergie, est fourni par un nombre limité de pays. Le Congo joue ici un rôle clef (le cobalt y est un sous-produit des gisements de cuivre dont le pays assure 65% de la production mondiale). En 2016, l'investissement privé le plus élevé dans l'histoire du pays a permis au chinois Molybdenum d'acquérir 56% de la mine de Tenke riche en cobalt et en cuivre. Le Congo tient une place d'autant plus importante pour la politique de stockage de la Chine que si celle-ci parvient à satisfaire à hauteur de 17% ses besoins en lithium, 93% du cobalt qu'elle consomme provient du Congo. Les ambitions technologiques du pays dans la voiture électrique et plus largement dans le stockage d'énergie laissent entrevoir d'autres initiatives similaires même si aucun pays ne rivalise à ce jour avec le Congo (l'Australie, le Canada, la Russie produisaient en 2016 moins de 10% de la production congolaise)[54].

La technologie NMC (nickel, manganèse, cobalt) s'imposant de plus en plus parmi les batteries lithium-ion, la demande en nickel croit et les acteurs industriels jusque-là focalisés sur la demande en acier inoxydable investissent désormais dans le marché de la batterie. Les acteurs miniers australiens voient ainsi dans la transition énergétique un relais de croissance après le cycle initié par la demande des pays émergents en métaux de base[55]. Si les Philippines assurent 20% de la production mondiale, le Canada, l'Australie, la Russie, la France (à travers la Nouvelle-Calédonie) en assurent chacun environ 10%. La Russie qui dispose avec Norilsk Nickel du deuxième producteur mondial de nickel pourrait jouer un rôle dans le scénario de la constitution d'une base industrielle en Europe dans le secteur de la batterie. Un accord fut signé en ce sens avec BASF en 2017.

Autre ressource nécessaire aux infrastructures de stockage, le lithium provient principalement d'Australie et d'Amérique latine (en 2016, l'Australie produisit 14 300 tonnes, le Chili 12 000 tonnes, l'Argentine 5 700 tonnes)[56]. En Amérique latine, les lacs salés (*salars*) d'Argentine, de Bolivie et du Chili abriteraient la moitié des réserves mondiales connues. Dans la région, la géographie explique en partie les différences entre les pays en termes de production (le climat défavorise notamment la Bolivie) mais l'environnement économique et politique est le premier facteur[57].

Le Chili peut compter sur un climat d'investissement favorable, sur son énergie bon marché (en raison notamment de l'essor du photovoltaïque) et sur son littoral qui permet des connexions maritimes aisées avec les ports d'Asie. Depuis 2016, les investisseurs asiatiques tentent de bénéficier du changement du cadre règlementaire chilien pour s'approvisionner en lithium. Jusqu'à cette date, le pays concédait en effet l'exploitation des gisements à 2 entreprises, le chilien SQM[58] et l'américain Albemarle. En 2016, un consortium d'investisseurs asiatiques a obtenu l'agrément pour l'exploitation d'un gisement à compter de 2018. Arguant qu'il consomme à lui seul 20% du lithium produit dans le monde, le constructeur automobile chinois BYD s'emploie à y sécuriser ses approvisionnements[59]. Autre acteur industriel chinois, Tianqi a engagé pour sa part une montée au capital de SQM[60]. Face à la forte demande mondiale,

[53] Données disponibles auprès de l'USGS (United States Geological Survey). https://www.usgs.gov/.
[54] Données disponibles auprès de l'USGS (United States Geological Survey). https://www.usgs.gov/.
[55] Jamie Smyth, « BHP positions itself at centre of electric-car battery market », *Financial Times*, 9 août 2017.
[56] Données disponibles auprès de l'USGS (United States Geological Survey). https://www.usgs.gov/.
[57] « The white gold rush A battle for supremacy in the lithium triangle », *The Economist*, 15 juin 2017.
[58] Sociedad Quimica y Minera de Chile.
[59] Henry Sanderson, "Electric car demand sparks lithium supply fears", Financial Times, 6 avril 2017.
[60] Henry Sanderson, « China's Tianqi circles Chilean lithium producer SQM », *Financial Times*, 8 septembre, 2016.

Albemarle est parvenue de son côté à relever en 2017 son quota de production en échange d'un approvisionnement à des conditions privilégiées des entreprises manufacturières chiliennes (cathodes pour batteries notamment).

Acteur secondaire, l'Argentine comble son retard depuis l'alternance politique de 2015. L'offre argentine devrait être multipliée par 5 d'ici à 2020. Le gisement d'Olaroz géré par un consortium argentino-nippo-australien a produit l'équivalent de 6% of de la production mondiale en 2016. Détenu par le canadien Lithium Americas, le chilien SQM, le gisement d'Olaroz a été également été partagé en 2017 avec Ganfeng Lithium (un des principaux fabricants de batteries chinois) qui a acquis 19,9% des parts de Lithium Americas[61].

En Bolivie, les initiatives prises par le Président Evo Morales pour retirer le pays de plusieurs traités internationaux d'investissement et nationaliser une partie du secteur énergétique afin de conserver l'exploitation du lithium sous l'autorité de l'État ont détourné les investisseurs des gisements prometteurs. Le Japon est toutefois parvenu à négocier l'accès à certains gisements[62]. Des partenariats sont escomptés avec le secteur privé pour développer l'industrie de la batterie mais le pays ne valorise pas encore pleinement des réserves probablement conséquentes (le lac salé d'Uyuni, dans les environs de Potosí, est le plus grand au monde).

Enjeux environnementaux et sociaux

L'exploitation des terres rares comme des autres métaux nécessaires à la transition énergétique s'opère dans des conditions environnementales et sociales de plus en plus souvent dénoncées. En Amérique latine, le bilan carbone de l'exploitation du lithium est avantageux du fait de l'énergie solaire largement répandue (notamment au Chili) mais l'activité requiert de fortes quantités d'eau dans des régions qui en sont déjà peu pourvues. En outre, une demande croissante de lithium imposera l'ouverture de mines dans des gisements minéraux (comme en Australie) pour lesquels la quantité d'énergie nécessaire est supérieure à celle déployée dans le cas de *salars* d'Amérique latine. Sans oublier que l'obtention du métal nécessite plusieurs étapes dont certaines s'effectuent en Chine, pays dans lequel le charbon demeure une source d'énergie importante.

L'argument écologique peut-il à terme affecter les stratégies d'approvisionnement ? Il peine certes à s'imposer dans les débats relatifs aux conditions d'exploitation des métaux nécessaire au secteur de l'informatique. Néanmoins, certains pays durcissent leurs règlementations environnementales, à commencer par la Chine qui s'est attaquée aux mines clandestines (cf. infra). En 2016, les Philippines suspendirent l'activité de plusieurs mines de nickel pour des raisons environnementales, décision qui provoqua un renchérissement des cours mondiaux du métal[63].

Dans les pays développés, les énergies renouvelables devraient, en raison des vertus mêmes qui leur sont prêtées, voir leur bilan environnemental davantage questionné jusqu'à affecter les stratégies des acteurs industriels. Ces derniers ont déjà dû infléchir leur approche dans le cas des conditions sociales de l'exploitation des métaux. Plusieurs acteurs du secteur informatique ont ainsi revu leur chaîne d'approvisionnement en cobalt après la révélation que des enfants étaient sollicités dans certaines mines du Congo[64]. Dans ce contexte, l'UE dispose de différentes options. Elles vont de l'exploration de nouvelles zones minières à la constitution de filières de recyclage en passant par l'emploi de matériaux

Vers de nouvelles mines en Europe ?

Dans l'UE, les sites les plus prometteurs pour les terres rares se situent dans le nord du continent (historiquement, plusieurs terres rares ont été « découvertes » en Suède). Le BRGM perçoit le sous-sol

61 « Lithium Americas Announces US$174 Million Strategic Investment by Ganfeng Lithium », 17 janvier 2017, http://www.marketwired.com/press-release/lithium-americas-announces-us174-million-strategic-investment-by-ganfeng-lithium-tsx-lac-2188754.htm. Consulté le 17 juin 2017.
62 Nick Chambers, « Japan Securing Battery Raw Materials with Economic Aid to Bolivia », gas2.org, 5 avril 2010, http://gas2.org/2010/04/05/japan-securing-battery-raw-materials-with-economic-aid-to-bolivia/. Consulté le 12 juin 2017.
63 Alfred Cang Top Chinese Nickel Producer Says Bull Market Just Beginning, 17 août 2016, https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-08-17/biggest-chinese-nickel-producer-says-bull-market-just-beginning. Consulté le 16 août 2017.
64 Todd C. Frankel, « Apple cracks down further on cobalt supplier in Congo as child labor persists », Washington Post, 3 mars 2017.

européen « *comme un stock potentiel, en prenant en compte l'Europe continentale (y compris l'ensemble du bouclier scandinave qui comprend la Péninsule de Kola en Russie) mais également le Groenland* »[65]. Le gisement de Kvanefjield (Groenland) est en effet particulièrement prometteur et sa mise en valeur devrait fournir à la fois du zinc, du lithium, de l'uranium et des terres rares. Par ses réserves supposées en praseodymium, néodyme, dysprosium, terbium, le site pourrait devenir le principal pôle d'extraction de terres rares lourdes hors de Chine. Comme dans le cas d'autres gisements prometteurs dans le monde, un partenaire chinois s'est joint au consortium conduit par Greenland Minerals and Energy (Shenghe Resources à hauteur de 12,5%)[66].

Rouvrir des mines en Europe se justifierait-il ? Les principales mines actuellement exploitées sont aux marges de l'Europe (péninsule ibérique, Scandinavie, Balkans, Est de l'Europe). Loin d'être imposée par la seule géologie, cette disposition des ressources minières en périphérie des États ou des groupes d'États se retrouve dans plusieurs régions du monde[67]. Pourquoi ne pas explorer de nouveaux territoires, appliquer aux métaux la logique des circuits courts et réduire ainsi la dépendance à l'égard d'approvisionnements assurés sur d'autres continents dans des conditions sociales et environnementales déplorables ?

L'acceptation sociale, les risques environnementaux ou les questions de rentabilité constituent ici autant de verrous. Ainsi, l'exploitation d'un des gisements les plus prometteurs de dysprosium en Europe localisé en Suède (*Norra Kärr)* fut autorisée puis interdite par les autorités nationales (Tasman Metals, 2016). Plusieurs pays ont peu à peu réduit leurs activités de prospection et d'exploitation minière (la fin de l'Inventaire Minier National français date de 1992) et les filières de formation se sont en partie détournées de la problématique minière. La capacité européenne de raffinage est réduite, y compris pour les métaux de base comme le cuivre, seul un des 20 plus grands raffineurs mondiaux étant localisé en Europe (COMES, 2017). Au final si la part de l'Europe dans l'activité minière était de 50% en 1850, elle était de moins de 5% en 2009. La part des États-Unis dans l'activité minière mondiale a également franchi à la baisse le seuil des 10% dans les années 2000.

Plus globalement, iI n'est pas acquis que l'ouverture de nouvelles mines soit une réponse suffisante à la croissance de la demande en matériaux critiques. La Chine dispose non seulement de ressources abondantes mais également de la chaîne de valeur nécessaire au raffinage, notamment des terres rares. En outre, la rentabilité n'est guère assurée pour des matériaux critiques disponibles en faibles quantités et dont les cours peuvent varier brutalement au gré des évolutions technologiques et de la demande chinoise[68]. Les projets au Groenland, en Russie, en Inde connaissaient ainsi en 2017 des retards imputables à un maintien des cours à un niveau relativement bas[69]. Pour certains métaux (comme le lithium), le financement est incertain dans la mesure où ils ne peuvent faire l'objet de stratégies de couverture à l'instar d'autres matières premières (le cuivre par exemple). Dans cet environnement, la Chine conserve la capacité d'influer sur les cours mondiaux, de les maintenir si nécessaire à un niveau bas pour dissuader toute ambition concurrente et à un niveau assez élevé pour avantager les industriels implantés sur son territoire.

Fermer et rouvrir des mines au gré de l'évolution des cours comme le font certains producteurs américains de pétrole non conventionnels ne serait guère réaliste dans le cas des métaux critiques. La mise en valeur des gisements exige du temps, qu'il s'agisse des terres rares (Golev et al., 2014), du lithium (7 années se sont écoulées entre l'exploration et l'exploitation commerciale du gisement argentin d'Olaroz) ou des métaux de base. Ali et al. (2017) mettent ainsi en évidence l'allongement des délais pour l'exploitation des mines de cuivre qui se situent désormais entre 13 et 23 années et concluent que l'industrie n'est pas en capacité de répondre à brève échéance à une hausse soudaine de la demande.

65 https://www.actu-environnement.com/ae/news/terres-rares-penurie-eviter-defis-brgm-aster-recyclage-mines-24438.php4. Consulté le 15 juin 2017.

66 « Greenland Minerals teams up with Shenghe on Kvanefjeld development», Mining Weekly, 23 septembre 2016, http://www.miningweekly.com/article/greenland-minerals-teams-up-with-shenghe-on-kvanefjeld-development-2016-09-23. Consulté le 12 juin 2017.

67 Michel Jébrak, *Quels métaux pour demain? Les enjeux des ressources minérales*, UniverSciences, Dunod, Paris, 2015.

68 Barry Fitzgerald, « Rare earths market stirs at last », *The Australian*, 7.11.2016, http://www.theaustralian.com.au/business/opinion/barry-fitzgerald/rare-earths-market-stirs-at-last/news-story/b60d8932ffce398f3325e27211429262. Consulté le 12 novembre 2016.

69 Frik Els, « US remains almost entirely dependent on China rare earths », Mining.com, 4.10.2016, http://www.mining.com/us-remains-almost-entirely-dependent-china-rare-earths/. Consulté le 5 mars 2017.

Dans ce contexte, la montée en puissance de filières de recyclage ou la recherche de technologies de substitution constituent des alternatives.

Stratégies de substitution de la part des industriels

La volatilité des cours a conduit les industriels à rechercher des solutions de substitution ou du moins à réduire la quantité de matériaux critiques dans leurs installations. Les aimants permanents installés dans les éoliennes et les moteurs des véhicules électriques et qui nécessitent des terres rares ne sont ainsi pas la seule technologie disponible. Le moteur à induction ne recourt pas à ces matériaux et équipe les véhicules de la marque Tesla[70]. Renault a opté´ pour un moteur électrique dépourvu de terres rares. Nissan continue d'utiliser des terres rares mais est parvenu à` diminuer de 40 % la quantité de dysprosium utilisé. Toshiba a mis au point des aimants samarium-cobalt dépourvu de terres rares (Hatakeyama, 2015, p. 51).

Dans l'éolien, Siemens s'est fixé pour objectif d'éliminer ses besoins en terres rares lourdes pour renforcer l'acceptabilité économique, sociétale et environnementale de ses produits. Certaines éoliennes terrestres sont dépourvues d'aimants permanents (cas de Nordex, d'ENERCON) et pour l'éolien marin, certains industriels comme Vestas ont réduit les quantités nécessaires de néodyme et de dysprosium (Bloomberg, 2010). S'agissant de l'industrie du panneau solaire, différentes pistes ont été explorées pour limiter le recours au tellurium et à l'indium. Elles vont de l'augmentation du voltage supporté par les cellules des panneaux CdTe à base de cadmium et de telluride (Burst et al., 2016), à l'utilisation de polymères organiques[71] ou encore de pérovskite (Ergen et al., 2017).

Le rôle de la politique commerciale européenne

Les restrictions aux exportations de métaux actuellement en vigueur dans de nombreux autres pays que la Chine (EUMICON, 2015) constituent un des thèmes prioritaires de la stratégie européenne. Énoncée en 2008 et révisée en février 2011, la *Raw Materials Initiative* comprend plusieurs volets consacrés notamment au recyclage et à la recherche de matériaux de substitution. S'agissant des enjeux commerciaux, l'UE inclut systématiquement un chapitre consacré à l'énergie et aux matières premières dans ses accords commerciaux, avec pour finalité de limiter au maximum les restrictions aux exportations. Vis-à-vis de la Chine, l'UE déposa plainte à 2 reprises avec succès, en 2012 pour 9 métaux[72] puis en 2014 au sujet des terres rares, du tungstène et du molybdène. Si la Chine annonça une refonte de ses instruments de contrôle de la production et de l'exportation en 2015 (cf. infra), l'UE déposa en juillet 2016 une nouvelle plainte, cette fois-ci au sujet de 11 métaux critiques (cf. infra)[73]. L'UE reproche notamment à la Chine d'imposer des taxes à l'export sur certains métaux ou de s'être assurée un approvisionnement à long-terme auprès de pays-tiers, notamment pour le cobalt, au bénéfice de son industrie du raffinage[74].

L'UE poursuit par ailleurs un dialogue avec les autres pays préoccupés par la disponibilité en métaux critiques, en particulier avec le Japon et les États-Unis qui ont chacun pris des initiatives pour atténuer le risque d'une pénurie de métaux critiques. La capacité de la Chine à contrôler les chaînes d'approvisionnement en matières premières des industries liées à la transition énergétique est de nature à lui conférer un avantage technologique, lui-même conforté par les prix bas pratiqués pour conquérir les marchés étrangers. Sur ce point précis, l'attitude à observer face aux soupçons de dumping de la part

[70] Il fut inventé par Nikola Tesla au XIXème siècle.
[71] Les polymères organiques sont des plastiques issus de ressources renouvelables (plantes, algues ou animaux). Leur coefficient d'absorption de la lumière étant très important, les composants organiques peuvent être étalés en couches de faible épaisseur sur des supports flexibles. Deux défis principaux restent à relever : augmenter le rendement des cellules et allonger leur durée de vie.
[72] Les métaux concernés étaient la bauxite, le coke, le fluorspar, le magnesium, le manganese, le silicon carbide, le silicon metal, le yellow phosphorus et le zinc.
[73] Les métaux concernés étaient l'antimoine, le chrome, le cobalt, le cuivre, le graphite, l'indium, le plomb, le magnesium, le talc, le tantale et l'étain.
[74] European Commission, Communiqué de presse, EU takes legal action against export restrictions on Chinese raw materials. Bruxelles, 16 juillet 2017, http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-2581_en.htm. Consulté le 17 juillet 2017.

des producteurs chinois de panneaux solaires demeure hésitante, que ce soit aux États-Unis[75], en Inde[76] ou en Europe où l'UE a acté en 2017 une fin progressive des mesures anti-dumping[77].

Les convergences affichées entre l'Europe et la Chine en matière de lutte contre le changement climatique sont apparues plus clairement que jamais à la lumière de l'annonce du retrait des États-Unis de l'Accord de Paris. Cette communauté d'intérêt avérée ne doit toutefois pas occulter une différence de perception. Si l'UE se préoccupe des conséquences du changement climatique pour la planète, la Chine, elle, s'emploie avant tout à détenir les technologies afférentes.

7. La nécessité d'une politique de recyclage plus dynamique

Le recyclage constitue une autre option permettant à la fois de limiter la dépendance à l'égard des fournisseurs étrangers et d'améliorer le bilan carbone des produits commercialisés. Dans la mesure où elle traite déjà davantage de métaux qu'elle n'en extrait, l'UE gagnerait à structurer rapidement des filières de recyclage.

Les quantités de métaux disponibles et susceptibles d'être recyclés sont néanmoins limitées. Les quantités récupérables dans chaque équipement étant faibles, les métaux étant le plus souvent associés à` d'autres matériaux dans les produits finaux, le recyclage pose d'importants défis financiers et logistiques. En outre, s'agissant des infrastructures des énergies renouvelables, les matériaux sont immobilisés pour au moins 10 ou 20 ans dans des proportions nettement moindres que celles qui seront requises à ce moment… si de nouveaux matériaux n'ont pas été introduits entre-temps. L'organisation des circuits de recyclage en grandes filières avec pour chacune des procédés industriels et des acteurs économiques différents constitue un autre obstacle. Les métaux critiques sont en effet pour la plupart des coproduits de métaux de base (gallium et aluminium par exemple) et s'inscrivent difficilement dans un système métallurgique segmenté. Dans ce contexte, les métaux disponibles en faible quantité et aux propriétés chimiques spécifiques sont peu valorisés, surtout lorsqu'ils sont utilisés dans des alliages avec d'autres métaux plus abondants (cas du béryllium et du cuivre).

Au final, les faibles quantités disponibles faibles, les ruptures technologiques fréquentes, la volatilité des cours ne garantissent pas aux unités de recyclage des conditions de rentabilité satisfaisantes. Ainsi, en Europe, Solvay/Rhodia débuta en 2011 des activités de recyclage de certaines terres rares (à La Rochelle) mais dut fermer en 2016, une fois les cours retombés à des niveaux antérieurs à la crise de 2010. En 2017, un seul site de production de terres rares demeurait en Europe (NPM Silmet AS en Estonie). À l'échelle mondiale, pour 60 métaux étudiés, le PNUE qualifiait en 2014 le taux de recyclage de « désespérément bas ». À peine un tiers des métaux examinés étaient à plus de 50% recyclés en fin de vie et 34 avaient un taux de recyclage de moins de 1%[78] (PNUE, 2014). Les métaux les plus recyclés sont d'une part les métaux de base pour lesquels les flux de déchets sont importants (cuivre, zinc, aluminium, fer), d'autre part les métaux précieux comme l'or dont les cours élevés assurent un recyclage rentable.

À terme, les quantités de déchets recyclables disponibles devrait toutefois croître fortement. Selon l'Université des Nations Unies (UNU), la quantité de DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques) pourrait atteindre 50 millions de tonnes dès 2018. En 2050, 60 à 78 million de tonnes de déchets de panneaux photovoltaïques devraient être disponibles[79]. Si la diversité des matériaux qui composent un panneau photovoltaïque complique son recyclage, un marché de plus de 15 milliards USD pourrait toutefois émerger d'ici à 2050[80]. Parmi les initiatives prises dans le secteur du recyclage,

---

[75] Ed Crooks, « ITC says foreign competition damaging US solar panel industry », *Financial Times*, 22 septembre 2017.
[76] Tom Kenning, « India's solar anti-dumping saga: The industry anticipates », PVTECH, 27 septembre 2017, https://www.pv-tech.org/editors-blog/indias-solar-anti-dumping-saga-the-industry-anticipates.
[77] Agence Reuters, *China welcomes EU decision on solar panel import prices*, 18 septembre 2017, https://www.reuters.com/article/china-eu-anti-dumping/update-1-china-welcomes-eu-decision-on-solar-panel-import-prices-idUSL4N1LZ2LV.

[78] Parmi les 10 métaux les mieux recyclés figurent le plomb, l'or, l'argent, l'aluminium, l'étain, le cuivre, le chrome, le nickel, le niobium, le manganèse.
[79]http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=A&mnu=cat&PriMenuID=16&CatID=84&News_ID=1453
[80] International Renewable Energy Agency (IRENA), International Energy Agency's Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS), *End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels*, juin 2016, http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_IEAPVPS_End-of-Life_Solar_PV_Panels_2016.pdf. Consulté le 3 mai 2017.

Umicore (Belgique) s'est engagée dans le retraitement de batteries lithium-ion mais n'attend une forte hausse des volumes qu'autour de 2025[81].

Les unités de stockage devraient abonder également mais de nouvelles techniques seront requises pour atteindre le taux élevé de batteries au plomb recyclées. Pour le lithium et le cobalt, une part très réduite de la ressource utilisée provient à ce jour du recyclage mais avec une durée de 7-8 ans, l'activité de la batterie recyclée devrait monter en puissance vers 2021. Le recyclage des aimants permanents pourrait contribuer en 2020 à hauteur de 8 à 16 % à l'approvisionnement en Terres Rares (BRGM, 2015). De fait, des activités de recyclage se sont développées, notamment au Japon (Santoku, Hitachi, ShinEtsu, Showa denko, Mitsubishi Materials recyclent le néodyme et le dysprosium des aimants permanents). En outre, la quantité de néodyme et de dysprosium à récupérer dans les véhicules électriques et les éoliennes est nettement plus importante que dans les appareils électroniques (Hoenderdaal, 2013).

Pour les métaux de base, le recyclage devra également monter en puissance compte-tenu des déséquilibres qui s'annoncent entre l'offre et la demande. Le niveau des cours sera ici un levier important. Dans un contexte de renchérissement de la matière première, la production de cuivre raffiné à partir de déchets a progressé de 11% en une année (2016)[82].

Dans l'UE, les données sur la production secondaire manquent et le recyclage des déchets informatiques demeure peu répandu (Commission européenne, 2016) malgré les directives européennes[83]. L'UE fut néanmoins une des premières puissances à légiférer sur la gestion des déchets électriques et électroniques, notamment au moyen de la directive européenne DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques) qui stipule que tout importateur ou fabriquant de panneaux solaires établi sur le territoire européen se trouve dans l'obligation de les collecter et de les traiter lorsqu'ils arrivent en fin de vie. Entre États-membres, le commerce transfrontalier des déchets tend à progresser, indiquant que la valeur du déchet est de mieux en mieux reconnue. Une grande part des déchets continue néanmoins à échapper à la filière agréée (57 % en France) et le taux de réemploi est marginal.

Conclusion

Si les opportunités ouvertes par la transition énergétique en termes d'emploi et d'innovation ne prêtent pas à discussion, force est de constater que le profit qu'en a tiré l'Union est à ce jour limité. Les politiques de soutien à la demande ont eu des résultats avérés, mais les équipements sont pour la plupart (exception faite du secteur éolien) importés d'Asie et les emplois induits peu nombreux. Dans un contexte de revalorisation de la notion de politique industrielle, la Commission semble se départir d'une logique du « laisser-faire » pour accroître ses investissements en R&D et pour aider à l'établissement de partenariats industriels.

Les initiatives prises en matière de politique commerciale ont, elles, un résultat mitigé comme en témoigne l'abandon des mesures tarifaires prises dans le secteur des panneaux photovoltaïques. Des questions d'importance se posent sans qu'il soit certain que l'Union ait l'appétence et les prérogatives nécessaires pour les traiter : quels segments des chaînes de valeur doivent être davantage soutenus ? Comment soutenir la demande en produits européens dans le respect des principes de la politique de concurrence ? Quelle politique adopter en matière de normes pour unifier le marché européen et assurer un débouché aux acteurs industriels du continent ? Comment traduire dans les meilleurs délais les avancées effectuées dans les laboratoires de recherche européens en succès industriels mondiaux ?

Les premières implantations de sites de production de batteries en Europe de la part de constructeurs asiatiques témoignent du fait que les conditions financières et réglementaires propres à l'UE ne sont pas dirimantes, qu'une production sur le sol européen dans des conditions de rentabilité satisfaisantes est possible. Pourtant, seul le secteur éolien apparaît aujourd'hui profiter dans l'UE de la politique européenne en matière d'énergies renouvelables. Le constat apparaît d'autant plus préoccupant que les pertes d'emploi liés à la transition énergétique (dans les énergies fossiles, dans le nucléaire, dans la fabrication de voitures thermiques) s'annoncent, elles, conséquentes. Plus que jamais la transition

[81] Henry Sanderson, « Electric car growth sparks environmental concerns », *Financial Times*, 7 juillet 2017.
[82] Données disponibles auprès de l'International Copper Study Group. http://www.icsg.org/.
[83] Directives relatives à la conception (2002/95/CE) et à la fin de vie des produits électriques (2002/96/CE), modifiée par la Directive 2012/19/UE.

énergétique apparaît comme une transition économique et sociale pour laquelle l'UE a des atouts mais pas de véritable stratégie.

La situation varie néanmoins d'un pays à l'autre, du moins dans l'éolien. Dans le cas de l'éolien marin, plusieurs pays disposaient aux débuts de la transition d'un contexte favorable pour structurer une filière : un littoral de plusieurs centaines de kilomètres, une recherche-développement de qualité et un tissu industriel disposant des compétences requises. La France, le Royaume-Uni, l'Espagne, l'Allemagne, le Danemark, la Suède, la Pologne faisaient ainsi partie des pays en situation d'innover et de produire dans ce secteur.

Un état des lieux dressé en 2019 fait toutefois apparaître une réalité contrastée. Confronter les cas de la France et du Danemark invite à méditer sur l'ensemble des facteurs nécessaires à la constitution d'une filière compétitive et sur les possibilités pour la France de rattraper son retard.

Références

ABRAHAM D., 2016, *The Elements of Power: Gadgets, Guns, and the Struggle for a Sustainable Future in the Rare Metal Age*, Yale University Press.

ADEME, 2016, *Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations. Un travail d'exploration des limites du développement des énergies renouvelables dans le mix électrique métropolitain à un horizon 2050*, juin, Paris.

AIE (Agence Internationale de l'Energie), 2017, *Global EV Outlook 2017*, Paris.

AIE (Agence Internationale de l'Energie)a, 2017, *Tracking Clean Energy Progress 2017*, Energy Technology Perspectives 2017.

AIE (Agence internationale de l'Energie)b, 2016, Renewable energy, Medium-term Market Report, Paris.

ALI S. H., GIURCO D., ARNDT N., NICKLESS E., BROWN G., DEMETRIADES A., DURRHEIM R., ENRIQUEZ M.A, KINNAIRD J., LITTLEBOY A., MEINERT L. D., OBERHÄNSLI R., SALEM J., SCHODDE R., SCHNEIDER G., VIDAL O., YAKOVLEVA N., 2017, « Mineral supply for sustainable development requires resource governance », *Nature*, mars, vol. 543, pp. 367-372.

ALONSO E., SHERMAN A. M., WALLINGTON T. J., EVERSON M. P., FIELD F. R., ROTH R., KIRCHAIN R. E., 2012, « Evaluating rare earth element availability: A case with revolutionary demand from clean technologies », *Environmental science and technology*, 46, pp. 3406-3414.

ANCRE, 2015, *Ressources minérales et énergie, Rapport du groupe « Sol et sous-sol » de l'Alliance Ancre*, juin, Paris.

ARGUS METAL PAGES FORUM, 2016, *Analysing the Changing Global Rare Earths Supply and Demand Outlook*, August.

BANQUE MONDIALE, 2017, *The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future*, Washington, juillet.

BIHOUIX P., DE GUILLEBON B., 2010, *Quel futur pour les métaux ? Raréfaction des métaux : un nouveau défi pour la société*, EDP Sciences.

BLOOMBERG ENERGY FINANCE, 2016, *New Energy Outlook 2016, Long-term projections of the global energy sector*,

BRGM, 2015, *Panorama 2014 du marché des terres rares*, Paris.

BURST J.M., DUENOW J.N., ALBIN D.S., COLEGROVE E., REESE M.O., AGUIAR J.A., JIANG M., PATEL M.K., AL-JASSIM M.M., KUCIAUSKAS D., SWAIN S., ABLEKIM T., LYNN K.G., METZGER V.K., « CdTe solar cells with open-circuit voltage breaking the 1 V barrier », *Nature Energy*, Article number: 16015 (2016)

COMMISSION EUROPEENNE, 2016, *Raw material scoreboard, 2016*, Office des publications de l'Union européenne, Luxembourg.

COMMISSION EUROPEENNE, 2014. *Report on Critical Raw Materials For the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials*,http://ec.europa.eu/DocsRoom/documents/10010/attachments/1/translations/en/renditions/na tive.

CRUCIANI M., « Le paysage des énergies renouvelables en Europe en 2030 », Études de l'Ifri, juin 2017.

DEUTSCHE BANK, 2016, *Welcome to the Lithium-ion Age*, FITT Research, 9 mai.

ERGEN O., GILBERT S.M, PHAM T., TURNER S.J, TIAN ZHI TAN M., WORSLEY, M.A, ZETTL A., 2017, « Graded bandgap perovskite solar cells », *Nature Materials*, 16, pp 522–525.

EUMICON, 2015, *Mining in Europe toward 2020*.

GAINES L., 2014, « The future of automotive lithium-ion battery recycling: Charting a sustainable course », *Sustainable Materials and Technologies* 1–2 (2014) 2–7

HAND, M.M.; BALDWIN, S.; DEMEO, E.; REILLY, J.M.; MAI, T.; ARENT, D.; PORRO, G.; MESHEK, M.; SANDOR, D. (Dir.), 2012, *Renewable Electricity Futures Study*, NREL (National Renewable Energy Laboratory), 4 vols. NREL/TP-6A20-52409, Golden (Colorado).

HATAKEYAMA K., 2015, « Rare Earths and Japan : Traditional vulnerability reconsidered », in : RYAN David Kiggins (Dir.), *The Political economy of rare earth elements, Rising powers and technological change*, Palgrave Macmillan, New-York.

HEIN J., 2011, « Rare Metals and Rare-Earth Elements in Deep-Ocean Mineral Deposits », *SPC/SOPAC-ISA International Workshop on Environmental Needs for Deep Seabed Minerals Nadi*, Fiji, 29 novembre-02 décembre.

Hilpert H.G, Mildner S.A (Dir.), 2013, *Fragmentation or Cooperation in Global Resource Governance? A Comparative Analysis of the Raw Materials Strategies of the G20*. Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP) and the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Berlin.

HOENDERDAAL, S.; TERCERO ESPINOZA, L.; MARSCHNEIDER-WEIDEMANN, F.; « Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? », *Energy*, vol. 49, issue 2013, pp. 344 – 355.

IRENA, 2018, *Renewable energy and jobs, Annual review 2018*, International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi

JIN Y. X., LIN A., XIAO-LIANG L., YIDING W., WENBIN Z., ZHANHENG C.,□□ (2013), « China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation », *Environmental Development*, 8 pp. 131–136.

JRC, 2016, *Assessment of potential bottlenecks along the materials supply chain for the future deployment of low-carbon energy and transport technologies in the EU*, JRC Science for Policy report, Luxembourg.

LIU H., 2016, *Rare earths : shades of grey, Can China continue to fuel our global Clean & smart future ?*, China Water Risk, Hong-Kong.

MARSCHEIDER-WEIDEMANN F., LANGKAU S., HUMMEN T., ERDMANN L., TERCERO ESPINOZA L., 2016. *Rohstoffe für Zukunftstechnologien*. Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin.

MATHIEU C., 2017, *La course aux batteries électriques, quelle ambition pour l'Europe ?*, Études de l'IFRI, juillet.

MAZZUCATO M., The entrepreneurial state: Debunking public vs. private sector myths, Anthem Press, 2015. p.116

MOSS R.L., TZIMAS E., KARA, H., WILLIS, P., KOOROSHY, J., 2013, « The potential risks from metals bottlenecks to the deployment of Strategic Energy Technologies », *Energy Policy*, 55, 556–564.

ONUR E. S., MATT G., THANG P., TURNER S. J., TIAN ZHI TAN M., WORSLEY M. A., ZETTL A., 2017, « Graded bandgap perovskite solar cells », *Nature Materials,* 16, pp. 522–525.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement), 2011, *Recycling Rates of Metals*, Nairobi.
RABE W., KOSTKA G., SMITH STEGEN K., « China's supply of critical raw materials: Risks for Europe's solar and wind industries? », *Energy Policy*, 101 (2017) 692–699.

RESEARCH AND MARKETS, 2017, *Global and China Cobalt Industry Report - 2017-2021*.

SIMMONS L., 2016, "By monopolizing the mining of rare-earth metals, China could dictate the future of high-tech", *Foreign Policy*, Juillet-Août.

SIVARAM V., Innovations to harness solar energy and power the planet, MIT Press, 2018.

UBS, 2017, *UBS Evidence Lab Electric Car Teardown – Disruption Ahead?*, Q-Series, Global Research, 18 mai.

UNCTAD, 2014, *Commodities at a glance*, New York et Genève.

UNEP, 2011, *Recycling rates of metals, a status report. Global Metal Flows working group of the International Panel on Sustainable Resource Management*, 48 p.

USGS, 2015, *Mineral Commodity Summaries 2015*.

VIDAL O., 2017, *The crucial role of "structural raw materials" to the energy transition and social development*, Séminaire du COMES sur les métaux de la transition énergétique, 10 février. http://www.mineralinfo.fr/actualites/seminaire-comes-metaux-transition-energetique. Consulté le 23 juin 2017.

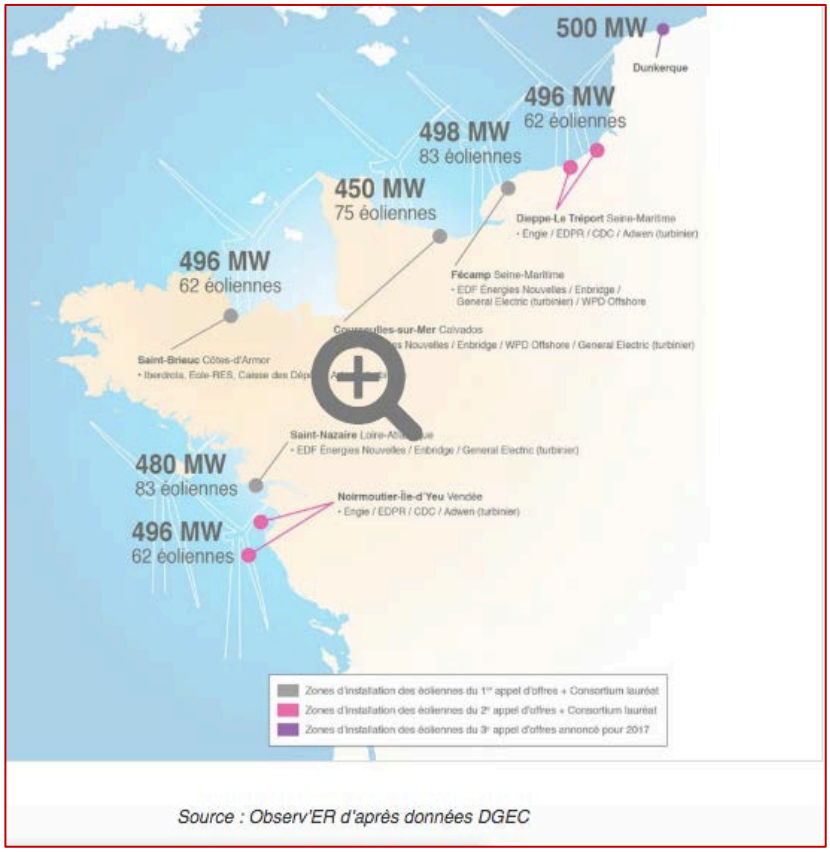
VIDAL O.,Goffé B., Arndt N., 2013, « Metals for a low-carbon society », *Nature Geoscience*, Vol. 6, Novembre, pp. 894-896.

Chapitre 2. Structuration d'une filière de l'éolien marin en France

François Bafoil

Introduction

La France bénéficie du deuxième domaine maritime au monde avec 20 000 kms environ de côtes pour une capacité de production évaluée à plus de 60 GW, soit 46 % de la capacité du parc électrique actuellement installé en France. Elle s'était fixée en 2009 des objectifs ambitieux, espérant installer 6 GW d'ici à 2020, soit entre 700 et 1 000 mâts. 10 % des besoins de la France en électricité pourraient être couverts en 2030 par l'éolien marin, soit autant que le solaire photovoltaïque. Pourtant, aucune ferme éolienne marine n'est encore exploitée commercialement en 2019.



Source : Observ'ER d'après données DGEC

Carte 2. Cartographie des 7 zones de développement de l'éolien posé en mer en France en 2019
Source : le journal de l'éolien on shore et offshore, chiffres, clés, objectifs

Lors des premiers appels d'offre (2004, 2011, 2013), les acteurs de la filière affichaient leur optimisme, un optimisme nourri par les conditions géographiques de la France (3 500 kilomètres de côtes en France métropolitaine), ses nombreux ports et un tissu industriel compétent dans des secteurs-clés pour l'éolien comme la métallurgie, l'aéronautique et les chantiers navals. Mais les recours se sont multipliés entraînant de nombreux retards.

Les changements législatifs introduits en 2018 et les avis rendus au cours de l'été 2019 par le Conseil d'État sont néanmoins de nature à changer la donne. La sécurité juridique qui faisait défaut semble enfin pouvoir être garantie. S'agit-il pour autant d'une phase nouvelle pour la filière de l'éolien marin, lui permettant de se structurer et de susciter enfin innovations et créations d'emplois dans les régions du littoral ?

Avant d'esquisser une réponse à cette question, il convient de préciser le nouveau contexte juridique et règlementaire qui a émergé depuis 2016 et qui incite à envisager un essor de l'éolien marin en France.

Le décret de 2016 sécurise les projets d'éolien marin

> Sur le plan règlementaire, un décret adopté en 2016[84] simplifia les procédures applicables aux projets d'ouvrages de production d'énergie renouvelable en mer (EMR). Le décret porta à 40 ans, au lieu de 30, la durée maximale des titres d'occupation du domaine public maritime pour les ouvrages de production d'EMR. La durée maximale des autorisations de production d'électricité, actuellement fixée à 10 ans, peut en outre depuis ce décret être prolongé pour une durée de trois ans renouvelable deux fois.

[84] Décret n° 2016-9 du 8 janvier 2016 concernant les ouvrages de production et de transport d'énergie renouvelable en mer, (Journal officiel du 10 janvier 2015).

Le décret attribua en outre à la cour administrative d'appel (CAA) de Nantes, à compter du 1er février 2016, la compétence pour juger en premier et dernier ressort des recours formés par des opposants à des projets éoliens. La CAA de Nantes doit statuer dans un délai de douze mois à compter du dépôt du recours contentieux. Enfin, une disposition fut introduite, permettant au juge administratif de fixer une date au-delà de laquelle des moyens de recours nouveaux ne pourraient plus être invoqués.

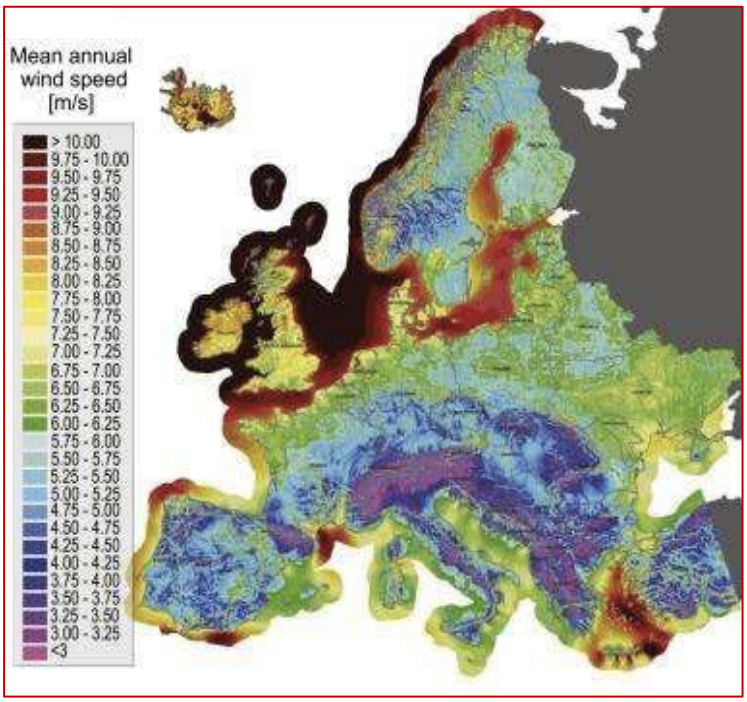
Pour des projets très capitalistiques (environ 2 milliards d'euros d'investissement par parc éolien en mer de 500 MW), ce décret a fourni de nouvelles sécurités juridiques. Il restait néanmoins à purger les recours formés au titre de la législation antérieure. Ce fut chose faite au cours de l'été 2019.

2019 : les recours formés à l'encontre des premiers parcs ont été purgés

Sur le plan juridique, le Conseil d'État rejeta le 7 juin 2019 le recours de deux associations de protection du cadre de vie pour le parc de Saint-Nazaire. Le 24 juillet, les contestations formulées à l'encontre de décisions nécessaires à la création des parcs de Saint-Brieuc, Fécamp et Courseulles-sur-Mer furent également écartées. Le 21 août, deux recours suscités par les autorisations du parc d'Yeu-Noirmoutier furent, là aussi, jugés non fondés. Ces décisions ont suscité un débat en raison d'une part de certaines contradictions apparentes (le recours formé par la société Nass and Wind au motif qu'elle aurait été irrégulièrement évincée d'un projet a été écarté mais une indemnisation a été accordée), d'autre part de l'émergence d'une jurisprudence qui pourrait faciliter l'essor de l'éolien marin dans les années à venir[85].

La Loi n° 2018-727 du 10 août 2018 réduit les possibilités de recours une fois le projet amorcé

L'article 58 de la Loi pour un État au service d'une société de confiance dispose notamment que pour les installations d'éoliennes faisant l'objet d'un appel d'offres, une saisine de la Commission nationale du débat public (CNDP) par le Ministre chargé de l'énergie s'impose avant la procédure de mise en concurrence des opérateurs. Celle-ci doit permettre la participation du public en une seule fois et en amont du projet.



Carte 3. Gisements de vents en Europe
Source : Trends of offshore wind projects, S. Rodrigues, C. Restrepo, E. Kontos, R. Teixeira Pinto, P.Bauer, Septembre 2015 (Fabrique écologique, 2019).

Le décret déclinant l'article 58 est paru au Journal officiel le 23 décembre 2018[86]. Y sont détaillées les modalités de ce « permis enveloppe » (déjà éprouvé par d'autres pays européens comme le Danemark depuis plusieurs années) qui regroupe les diverses autorisations requises (autorisation environnementale, concession d'utilisation du domaine public maritime et autorisation d'exploiter). Une fois la consultation publique

[85] Lire à ce sujet Laurent Radisson, *Comment le Conseil d'Etat est venu au chevet de l'éolien en mer*, Actu Environnement, 23 août 2019.
[86] Décret n° 2018-1204 du 21 décembre 2018 relatif aux procédures d'autorisations des installations de production d'énergie renouvelable en mer, JO du 23 décembre 2018, texte n° 8.

réalisée et le projet adopté, l'opérateur pourra modifier à la marge son projet (nombre d'éoliennes, puissance unitaire de la turbine, etc.) sans avoir à recourir à des actes modificatifs. Les délais de mise en service des parc devraient s'en trouver raccourcis.

Ces clarifications juridiques sont-elles pour autant de nature à soutenir le développement de la filière ? Pour réussir, le secteur de l'éolien doit remplir plusieurs conditions. Les gisements de vent doivent être de qualité, ce qui est un fait. Avec ses 20 000 kms de côtes et des vents puissants, la France est largement privilégiée.

Du point de vue économique, cette énergie doit avoir des coûts supportables. Sur ce point, l'État peut se targuer d'avoir renégocié en 2018 les tarifs initiaux en faisant une économie de 15 milliards d'€ sur les contrats passés avec 6 parcs éoliens (voir plus bas).

Par ailleurs, les conditions d'une acceptation sociale doivent être réunies. Le président du SER (Syndicat des énergies renouvelables) parle à raison d'appropriation sociale pour souligner que les riverains et populations doivent être mieux intégrés dans le processus de décision et d'implantation. Autre condition : les opportunités de structuration d'une filiale doivent être saisies et l'on verra dans les chapitres suivants qu'un espoir raisonnable peut être nourri sur ce point.

Enfin, le marché doit être soutenu par des appels d'offre suffisamment ambitieux. De ce point de vue, la sécurisation juridique de l'éolien marin semble s'accompagner d'une ambition réduite de la part de l'État. Si la filière et les régions littorales escomptaient la mise en service de 28 GW d'ici à 2028, l'État ne propose dans la PPE (Programmation pluriannuelle de l'énergie) présentée au Parlement en 2019 que le déploiement d'une puissance de 4,7 à 5,2 GW d'ici à 2028, un chiffre qui comprend les 3,1 GW actuellement en cours de déploiement en France.

Une ambition modeste au regard des efforts déployés par d'autres pays comme le Danemark, le Royaume-Uni, l'Allemagne ainsi qu'au regard des objectifs énoncés pour les autres énergies renouvelables (La PPE suggère de multiplier par 5 la puissance du parc photovoltaïque français d'ici 2028 (passant de 7,7 GW à plus de 35,6 GW) et de tripler la puissance éolienne en la portant à 35,6 GW d'ici 2028 (contre 13,6 GW en 2019). Or, sans marché intérieur dynamique, comment la filière française de l'éolien marin pourrait-elle se structurer ?

Avant d'analyser les enjeux et les modalités d'une structuration de la filière dans un tel contexte économique et juridique, il convient de rappeler l'état de développement des projets déjà amorcés et dont la réalisation devrait enfin se concrétiser à court-terme.

1. Chronologie et caractéristiques des premiers champs éoliens

- 2004

Un premier appel d'offres est lancé en 2004 (pour une capacité totale de 500 MW). Sur les dix projets candidats, un seul est retenu (21 au large de Veulettes-sur-mer en Seine-Maritime), projet rapidement abandonné en raison de failles dans les procédures et d'un manque d'acceptation sociale.

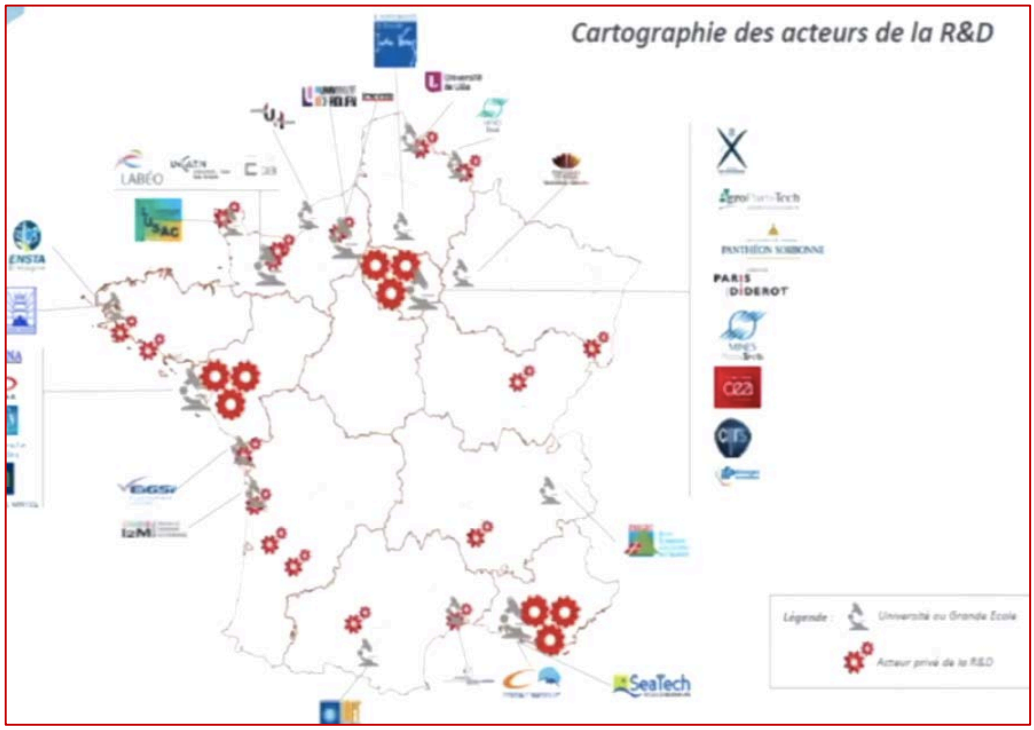
!	Capacité #$#%&'" ( ) * +!	, $ - . / '" d'éolienne 0!	! %1%23# é 453#%3/'" ( ) * +!	630#%52'" des côtes (7 - +!	) 30'"'5" 0'/832'" estimée"(9 : ; <+!	=$/#'4/">4" 1/$?'#!	@/$41' - '5#" 1$/#'4/">4" 1/$?'#!
Fécamp!	"#$!	$%!	&!	13 à 22!	'('*! '(''!	+,-./00/1! 23314,5/!6/1! 789:/1! ;8-8.1/1!	+<;!+=>! +0?5.6@/>! AB<!23314,5/!
C,951/9--/1D! 195D E /5!D! C8-F86,1!	"G(!	HG!	&!	)(!	'('%!	+,-./0! E85.:. I /! ;580J/!	+<;!+=>! +0?5.6@/>! AB<!23314,5/!
K8.0:D =8L8.5/!	"$(!	$(!	&!	)'!	'()!	+,-./00/1! ,3314,5/!69! C8-F86,1!	+<;!+=>! +0?5.6@/!
K8.0:DM5./9J!	"#&!	&'!	$!	!	'('%!	N.-/1!E85.0/1! KNK!	0?/565,-8>! P+K>!C6C!

Tableau 3. Caractéristiques des parcs issus du premier appel d'offres (2011).

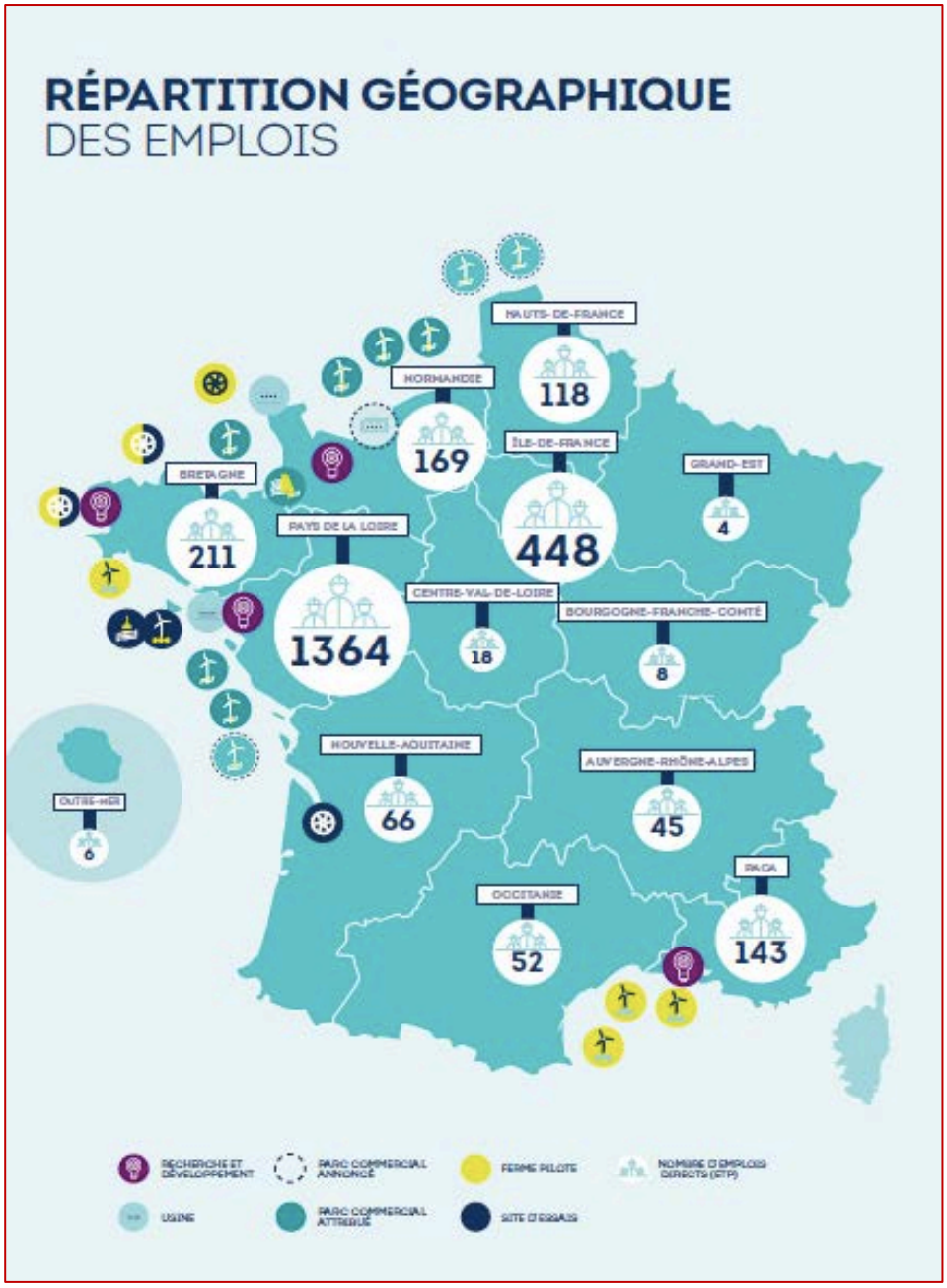
Un appel d'offres est lancé pour une mise en service prévue à partir de 2015 et pour une capacité totale de 3

La filière de L'éolien en mer anticipe la création de 15.000 emplois en 2029, sous réserve que les appels d'offres atteignent 1 GW par an. Ces 15000 emplois devraient se répartir selon le SER de la manière suivante : 6 800 pour la construction des éoliennes et 7 000 pour la construction des autres composants (câbles inter-éoliennes, fondations, sous-stations, raccordement, travaux). 2600 emplois ont été créés en 2017, ainsi que 564 ETP, ce qui représente une progression de 26% par rapport à l'année précédente.

50% des emplois relèvent de l'ingénierie, à part égale de ceux dans la production. Les 15 métiers qui recrutent le plus,



essentiellement ingénieurs et techniciens, feront l'objet d'une campagne dédiée pour attirer les recrues. L'État s'engage de son côté à déployer des formations (initiale et continue) à l'efficacité énergétique. Selon l'observatoire des énergies de la mer (2019), environ 1 300 emplois directs ont été créés à la fin 2018 par la filière pour développer les six premiers projets posés. Ceux-ci sont localisés principalement en Pays de la Loire, autour de l'usine de production de General Electric à Montoir de Bretagne, et en Normandie, avec l'usine de pales d'éoliennes offshore LM Wind Power, à Cherbourg.



S'y ajoutent les efforts de formation très importants qui se développent désormais en direction de l'éolien et dont l'ESTA de Brest témoigne largement avec ses nombreuses formation Bac + 6, en master (voir plus haut). En 2017, 152 acteurs ont été identifiés en lien avec la RD qu'elle soit dans le champ des sciences techniques (mécanique, électronique, etc.) ou des sciences sociales (liées avec l'acceptabilité sociale ou l'environnement). Parmi ces 152 acteurs, on note la présence 81 acteurs publics (agences, universités, laboratoires), 55 acteurs privés (laboratoires et bureaux d'étude), 11 clusters dont 5 pôles de compétitivité

Conclusion

La France bénéficie du deuxième domaine maritime au monde avec 20 000 kms environ de côtes, dispose d'un système de formation et de recherche de qualité, d'infrastructures portuaires adaptées mais aucune ferme éolienne marine n'y était encore exploitée commercialement en 2019. Au cours des décennies passées, ses voisins européens en mer du Nord en ont installé près de 5 000 et en ont tiré d'appréciables bénéfices en termes d'innovations et d'emplois.

Quatre facteurs majeurs apparaissent devoir être soulignés : le coût, le cadre juridique, les objectifs de production, la politique industrielle.

S'agissant du coût, la renégociation en 2018 des prix agréés en 2011 et 2014 a illustré la baisse sensible rendue possible par les évolutions technologiques et les économies d'échelles auxquelles sont parvenues les industriels (européens pour la plupart). En mer du Nord, plusieurs projets ont été adoptés ces dernières années pour des tarifs voisins de 50€/MWh, loin des 190€ agréés au début des années 2000. Force est de constater que le 0 subvention n'est plus une utopie mais une réalité appelée à se généraliser

en Europe. Invoquer le coût de l'éolien marin pour justifier des ambitions modestes en la matière ne tient plus.

S'agissant du cadre juridique, les recours se sont multipliés entraînant de nombreux retards. Les changements législatifs introduits en 2018 et les avis rendus au cours de l'été 2019 par le Conseil d'État sont néanmoins de nature à changer la donne. La sécurité juridique qui faisait défaut semble enfin pouvoir être garantie. S'agit-il pour autant d'une phase nouvelle pour la filière de l'éolien marin lui permettant de se structurer et de susciter enfin innovations et créations d'emplois dans les régions du littoral ?

Probablement pas tant les objectifs de production avancés dans la PPE soumise à discussion en 2019 sont modestes. Le potentiel technique théorique estimé en France pour l'éolien en mer est donc de 80 GW répartis sur une superficie de 10 000 km2 pour l'éolien posé, et de 140 GW répartis sur une superficie de 25 000 km2 pour l'éolien flottant, moins dépendant de la bathymétrie et de la distance à la côte. Malgré des conditions favorables, l'État ne prévoit dans la PPE présentée au Parlement en 2019 que le déploiement d'une puissance de 4,7 à 5,2 GW d'ici 2028, chiffre qui comprend les 3,1 GW actuellement en cours de déploiement en France. Les volumes d'appels d'offres engagés diminueront même après 2024 (500 MW), alors que la compétitivité de la filière sera encore améliorée.

Enfin la politique industrielle, dont les acteurs français déplorent régulièrement l'absence à l'échelle européenne, n'aura pas jusqu'à ce jour frappé par son efficacité. Les premiers appels d'offre encourageaient des projets contribuant à l'ancrage dans le tissu industriel. Outre que cette approche s'est avérée peu structurante compte-tenu des lacunes du cadre juridique, elle a perdu de son sens depuis le retrait des acteurs français du secteur. Le paysage a en effet radicalement changé en la matière. AREVA et Alstom, 2 acteurs majeurs lors des premiers appels d'offres, ne sont plus ce qu'ils étaient.

AREVA a cédé ses activités relatives à l'éolien et les actifs d'Alstom ont été repris par GE. Renforcer la filière n'est pas pour autant illusoire et les efforts entrepris à cette fin ces dernières années apparaissent d'autant plus louables que la gouvernance instituée accorde une large place aux acteurs industriels concernée. À proximité des côtes ou dans l'arrière-pays, de nouvelles activités peuvent se créer, notamment dans les PME, quel que soit leur cœur de métier. Néanmoins, l'industrie mondiale de l'éolien marin évolue rapidement, avec notamment une modularisation croissante qui invite à définir certains segments de la chaîne de valeur à privilégier. Des options technologiques spécifiques (l'éolien flottant par exemple) pourraient également être jugées prioritaires afin que la France se forge des positions fortes lesquelles, compte-tenu de ses atouts initiaux, lui semblaient promisse aux débuts de l'éolien marin.

Références

ADEME, 2017, *Étude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie, Étude réalisée pour le compte de l'ADEME* par : E-CUBE Strategy Consultants, I Care & Consult, et In Numeri.

ADEME, 2016, *Impacts environnementaux de l'éolien français*, Paris.

ADEME, 2016, *Côut des énergies renouvelables en France*, Paris.

Observatoire des énergies de la mer, 2019, *Les énergies de la mer*, juin, Paris.

Articles et dossiers de presse, in. : *Le Monde de l'énergie*, *Le Point, le Monde, Les échos, Dossiers de presse Seaenergy Bretagne, énergies renouvelables*.

ADEME, 2018, *Marchés et emplois dans le domaine des énergies renouvelables, Situation 2013-2015 et perspective à court terme*, Paris.

ADEME, 2017, *Caractérisation des innovations technologiques du secteur de l'éolien et maturités des filières*, Paris.

Cour des Comptes, 2018, *Le soutien aux énergies renouvelables*, Communication à la commission des finances du Sénat, mars 2018.

La Fabrique écologique, 2019, *L'éolien offshore en France, un rattrapage indispensable*, Note 35, juillet, Paris.

France Energie éolienne, 2019, *L'éolien, la clé de la transition énergétique*, Paris.

GWEC, IEA, Deutsche Windguard, E-CUBE, Stratégy Consultants, 2019

Alain Nadai, Olivier Labussière, 2014, *Recomposer la mer pour devenir Offshore : le projet éolien de Veullettes sur mer* , EDP Sciences, « Natures Sciences, Soxiétés », pages 204 à 218.

Observatoire de l'économie maritime en Bretagne, 2018, *Région Bretagne*, septembre.

Observatoire des stratégies de la mer, 2019, *Les énergies de la mer. Une réalité industrielle ; une dynamique collective*. juin, Paris. www.merenergie.fr

Observatoire des stratégies de la mer, 2019, *Les énergies de la mer. Un levier de croissance pour la France*. www.merenergie.fr

Programme éolien en France Contexte, stratégie et perspectives Formation DGPR – 21 janvier 2019 Louis ORTA – DGEC/DE/SD3/3B Sébastien BILLEAU – ADEME – Service des Réseaux et Energies Renouvelables

S. Rodrigues, C. Restrepo, E. Kontos, R. Teixeira Pinto, P. Bauer, « Trends of offshore wind projects », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 49, September 2015, Pages 1114-1135.

RTE, bilan électrique 2018, Uhttps://bilan-electrique-2018.rte-france.com.

Terra Nova, 2018, *Pour un débat serein sur la Programmation pluriannnuelle de l'énergie une stratétgie claire pour le secteur électrique*, Paris.

Chapitre 3. Structuration des filières de la transition énergétique au Danemark

Gilles Lepesant

Introduction

Une concentration de production d'électricité à base d'éolien marin s'est constituée en mer du Nord, incarnée à la fois par de nombreuses fermes éoliennes (90% des installations déployées dans le monde s'y trouvent) et par des capacités de production manufacturière[110].

Cet espace de la mer du Nord doit beaucoup aux choix politiques effectués par les pays riverains, choix fondés à la fois sur des considérations sécuritaires et sur des préoccupations environnementales (Wieczorek et al., 2013). Le Royaume-Uni dispose ainsi de la moitié des éoliennes marines installées dans le monde et en a tiré profit pour développer une intense activité de services, ses positions étant en revanche faibles dans le volet manufacturier (Piirainen et al., 2017). La Norvège a un profil voisin, grâce notamment aux activités de services développées dans le secteur gazier et pétrolier et à sa flotte de bateaux spécialisés. Dans le seul secteur manufacturier, des spécialisations se sont constituées. Le Danemark peut ainsi s'appuyer sur un foyer de compétences dans le secteur des turbines, l'Allemagne compte plusieurs acteurs dans les domaines de l'installation et des connections au réseau tandis que les entreprises britanniques se retrouvent tout au long de la chaîne de valeur, sans spécialisation particulière.

Le Danemark constitue un des piliers de cet espace centré sur la mer du Nord. En 2015, l'énergie éolienne y couvrait 42% des besoins du pays en électricité, voire 100% certains jours. Le turbinier Vestas, l'entreprise de services Orsted sont leaders mondiaux dans leur secteur et un écosystème s'est constitué à partir des années 70 qui abrite environ 30 000 emplois et assure 5% des exportations du pays. Peuplé de 5 millions d'habitants, le Danemark a pu en l'espace de 3 décennies non seulement transformer son mix énergétique au profit de l'éolien (même si le charbon y conserve encore un rôle important) mais surtout constituer une filière qui s'impose aujourd'hui sur les marchés européens comme aux États-Unis et en Asie.

Pour tirer les enseignements de cette mutation rapide, cette note souligne qu'aucun plan national prédéfini n'a présidé à ce succès, que ce dernier est avant tout le fruit d'initiatives isolées de la part d'acteurs qui ont peu à peu noué des liens entre eux jusqu'à ce qu'une industrie et un écosystème innovant se formalisent. Il convient pour en juger de détailler les facteurs relevant de la demande, ceux relevant de l'offre avant de s'interroger sur les capacités de la filière éolienne danoise à relever les défis induits par la forte croissance annoncée de l'éolien à travers le monde dans les prochaines années.

1. Une demande soutenue par une politique volontariste

Succès et limites du système danois de soutien à la demande

Lorsque le Danemark fut affecté par le premier choc pétrolier en 1973, 90% de la consommation d'énergie était couverte par des importations de pétrole du Moyen-Orient. Des initiatives furent prises pour limiter la consommation (dimanche sans voiture, réduction de l'éclairage public, vitesses limite abaissées sur les routes). En matière d'offre, le pays renforça ses efforts dans l'exploration des ressources pétrolières de la mer du Nord (avec des retombées dans les années 80), envisagea l'option d'un parc nucléaire avant de privilégier les énergies renouvelables.

Avec une géographie exposant très largement le pays aux vents dominants du sud-ouest, le secteur éolien fut plus particulièrement soutenu. La première éolienne connectée au réseau le fut dans les années 1970. Durant la même période, le centre d'essais et de certification du Laboratoire national de Risø fut ouvert par la Danish Technical University (DTU).

À l'origine, les premières éoliennes furent le projet de militants soucieux de protection de l'environnement et désireux de répondre à des besoins locaux. Peu à peu se constitua une filière qui permit l'implantation, entre 1977 à 2000, d'environ 8000 éoliennes terrestres dans le pays. Le manque

[110] En 2015, près de 9GW d'éolien marin était installé en mer du Nord (Smith et al., 2015) et plus de 4,4 GW étaient en construction

d'espaces sur terre conduisit à envisager l'éolien marin à parti de 1991 jusqu'à la mise en place de la plus grande ferme éolienne du monde installée en 2002 à Horns Rev.

Si les échecs de certains pays européens sont attribués aux revirements de leurs politiques de soutien aux EnR, le Danemark a connu, lui aussi, plusieurs inflexions majeures. Ainsi, lorsque la majorité socialiste-écologiste perdit le pouvoir aux élections de 1991, un coup d'arrêt fut porté au développement de l'énergie éolienne. Confrontées aux plaintes croissantes des populations locales, les nouveaux ministres de l'environnement et de l'énergie limitèrent en effet l'essor de l'éolien jusqu'à ce que l'ancienne coalition revienne au pouvoir dès 1993 à la faveur d'un scandale politique.

Arguant de la nécessité de limiter le réchauffement climatique, les autorités initièrent une nouvelle stratégie énergétique (E-21). De nouveaux tarifs d'achat furent négociés entre pouvoirs publics, propriétaires d'éoliennes et entreprises conduisant à une nouvelle croissance du nombre d'éoliennes installées. De 1994 à 2000, la contribution de l'éolien à la production d'électricité fut portée à 18% (Karnøe & Buchhorn, 2008).

En 2018, c'est l'arrêt du dispositif classique en février pour l'éolien terrestre qui suscita des inquiétudes dans le secteur. Cette année-là, 4 187 turbines (d'un âge moyen de 19 ans) étaient implantées sur le territoire (4GW soit 27% de la consommation électrique du pays). En février 2017, DWIA et l'association des propriétaires d'éoliennes avaient publié un communiqué commun appelant à la mise en place d'un nouveau dispositif[111]. En juin de la même année, les principaux partis danois approuvèrent le lancement de 3 appels d'offre pour l'éolien marin pour un total de 2.4GW, mais une réduction de l'éolien terrestre d'ici à 2030 fut acté dans le même temps (de même que l'abandon du charbon)[112].

Concernant l'éolien terrestre, le gouvernement opta pour un système fondé sur des appels d'offres technologiquement neutres de 200 MW environ en 2018 et 2019 (134 millions € sont prévus). Réduire le coût de la transition, soutenir les efforts de R&D[113], simplifier le système de subvention, impliquer davantage les développeurs dans la prise de risque furent les principales priorités énoncées. Les autorités envisagent désormais un FiP[114] fixe de l'ordre de €0.017/kWh sur 20 ans (contre €0.034/kWh pour le système en vigueur jusque-là)[115]. L'industrie a critiqué ce système, lui préférant le modèle CfD mis en œuvre notamment en Allemagne, au Royaume-Uni ou pour l'éolien marin au Danemark[116] afin de mieux se prémunir contre d'éventuelles baisses des prix du marché.

Un modèle décentralisé

Les principaux acteurs à l'échelle gouvernementale

- Le Ministère du climat et de l'énergie (Ministère à part entière) élabore entre autres les plans climat.

- Le Ministère des Affaires étrangères promeut la filière à l'export, notamment pour mettre en œuvre la stratégie adoptée en 2018 de doubler d'ici à 2030 les exportations.

- L'Agence danoise de l'énergie certifie les éoliennes et contribue à la définition des systèmes de soutien.

[111] David Weston, 28 juin 2017, *Denmark reaches 4GW onshore wind*, WindPower monthly, https://www.windpowermonthly.com/article/1437919/denmark-reaches-4gw-onshore-wind. Consulté le 12 novembre 2018.
[112] Les premiers 800MW sont appelés à être agréés en 2019/20 pour une mise en service en 2024 et en 2027, avec pour la première fois des coûts de connexion qui pourraient être inclus dans les projets à soumettre. Deux autres projets de 800MW seront sollicités en 2021 et en 2023. Le gouvernement a exprimé son souhait de voir à terme des projets ne sollicitant aucun soutien public. Afin de limiter les problèmes d'acceptabilité, les municipalités sont depuis cette date autorisées à approuver des projets situés à 15 kilomètres des côtes (contre 8 actuellement).
[113] L'accord prévoit un financement de 150 million DKK sur 3 ans pour financer un centre d'essais de turbines à installer en 2018 et 2019 sur la base du principe, premier arrivé, premier servi.
[114] Feed-in premium.
[115] S'agissant de l'éolien terrestre, le parc ne devrait compter que 1 850 machines contre 4 300 en 2018 grâce au remplacement d'anciennes éoliennes par de nouvelles plus puissantes. Entre 2020 et 2024, des appels d'offre neutres seront lancés mettant notamment en concurrence l'éolien et le photovoltaïque. In : David Weston « Denmark agrees "ambitious" energy deal », Windpower monthly, 29 June 2018 by https://www.windpowermonthly.com/article/1486456/denmark-agrees-ambitious-energy-deal. Consulté le 12 novembre 2018.
[116] David Weston, DWIA rebukes 'expensive' political agreement, 26 September 2017, https://www.windpowermonthly.com/article/1445706/dwia-rebukes-expensive-political-agreement

Le rôle clef des municipalités

Les municipalités et les particuliers détiennent une grande partie du parc éolien. En outre, la législation oblige les développeurs à associer les riverains aux retombées financières des projets. Au final, plus de 80% des éoliennes sont la propriété de coopératives, d'agriculteurs et 150 000 familles ont des participations dans des coopératives. Les actionnaires sont rassemblés dans l'Association des propriétaires danois d'éoliennes (Krohn, 2002). L'implantation d'éoliennes repose pour l'essentiel sur les municipalités qui décident tous les 4 ans leur plan d'occupation des sols en y incluant (ou pas) des espaces réservés à l'énergie éolienne. Les citoyens ont voix au chapitre à 2 moments : lors de la consultation préalable à la définition des plans d'occupation des sols et au cours de la phase de consultation pour un projet précis. La phase de consultation dure au minimum 8 semaines, période au cours de laquelle les habitants peuvent faire entendre leur avis.

Comme dans plusieurs autres pays, la multiplication des éoliennes a peu à peu suscité des oppositions locales (Sovacool, 2013). La loi de 2009 sur les énergies renouvelables fut pensée entre autres comme une réponse à cette montée des oppositions, notamment 4 dispositions mises en œuvre pour favoriser l'acceptation sociale (Johansen, Emborg, 2018) : le système de copropriété, le système de partage des bénéfices avec la collectivité (the green scheme (Anker and Jørgensen, 2015), le système de compensation pour perte de valeur du bien immobilier, le fonds de garantie. S'il est communément admis que de telles dispositions sont de nature à favoriser l'acceptation sociale (Cowell et al., 2011, p. 552), leur impact est fonction de différents paramètres (Bidwell, 2013; Cass et al., 2010; Kerr et al., 2017) et leur impact local est sujet à caution (Johansen, Emborg, 2018).

Ainsi Johansen et Emborg (2018) ont étudié plus précisément le système de copropriété qui prévoit que tout développeur est soumis à l'obligation de proposer à la population locale une participation de 20% au parc mis en œuvre[117]. Ils ont souligné un biais, les habitants jeunes, masculins, déjà acquis à la cause de l'éolien étant nettement mieux informés et plus désireux de participer que le reste de la population. En somme, l'effet d'aubaine serait notable, les populations les plus affectées et/ou les plus sceptiques à l'égard de l'éolien ne faisant pas partie des bénéficiaires principaux. Certes, la législation prévoit 3 autres dispositifs mais le système de copropriété est de loin le plus significatif d'autant que le *green scheme*, qui bénéficie lui, à l'ensemble de la collectivité concernée par la pose d'éolienne, demeure peu sollicité (Johansen, Emborg, 2018).

Des coopératives omniprésentes

L'une des particularités du système danois est l'abondance de coopératives, responsables d'une grande partie des fermes éoliennes installées dans les années 80 et 90. La première réalisation de ce type fut établie en 1980 à proximité d'Aarhus dans le Jutland. Si les entreprises municipales et privées ont peu à peu pris en charge le développement de l'éolien, le rôle des coopératives demeure crucial. Il a été renforcé par la législation de janvier 2009 (voir plus haut) qui prévoit notamment que le développeur de tout projet doit proposer au moins 20% des parts de son projet aux habitants, par exemple à travers une coopérative. En somme, la transition énergétique a, comme en Allemagne, réactivé la création de coopératives qui remonte au 19ème siècle (la première coopérative de produits laitiers fut créée en 1882 dans le Jutland de l'Ouest). Si le nombre de coopératives a chuté dans les années 70, elles demeurent un cadre apprécié dans le secteur de l'énergie éolienne. Le risque pris par les sociétaires est en effet minime (les coopératives ne sont pas autorisées à contracter des emprunts). Le plus souvent, une part équivaut à une production de 1000 kWh d'une éolienne particulière et l'influence du sociétaire dépend du nombre de parts détenues.

De nos jours, environ 15% des éoliennes danoises sont détenues par environ 300 coopératives. Le nombre des petites éoliennes étant appelé à diminuer, celui des coopératives devrait suivre la même tendance même si la loi de 2009 leur fournit un soutien en vue de renforcer l'acceptation sociale des projets. De fait, l'implication financière des citoyens vaut désormais également pour des projets d'éolien

[117] Citizens eligible for investing in wind farm shares through OPSS must be 1) minimum 18 years of age. Citizens must also be registered in the Danish CPR-register with 2) permanent residency address a) up to 4.5 km from the wind farm project site, or b) in the municipality hosting the wind farm project, or c) in municipalities with coastline up to 16 km from off-shore project sites when shares are sold. Shares are sold at cost price. Group a is prioritized, and citizens in this group a can buy up to a maximum of 50 wind farm shares. The remaining shares are then offered to citizens above 18 in groups b and c. The wind farm developer disposes freely over shares not sold during the min 8 week period when shares are offered for sale (Anker and Jørgensen, 2015;

marin. La ferme offshore Middelgrunden (40 MW) près de Copenhague fut ainsi développée à travers une entreprise et plusieurs personnes privées (avec 8 000 sociétaires, elle constitue à ce jour la plus importante coopérative énergétique au monde). Le projet Samsø Project sur la côte Est du Jutland (23 MW) fut également financée par des habitants de l'île de Samsø et par la municipalité.

2. Une offre qui s'est structurée depuis les années 50

Les estimations du rôle du secteur de l'éolien dans l'industrie nationale varient mais attestent toutes d'une montée en puissance. Selon Megawind, les exportations du secteur s'élevaient à 7,3 milliards en 2017 et représentaient 6,7% du total des exportations de marchandises en 2017[118], l'objectif affiché par le gouvernement et le secteur étant d'atteindre 19 milliards d'ici à 2030[119]. En 2016, le secteur pouvait se targuer d'un chiffre d'affaires (15,7 milliards €) plus élevé qu'au cours des 7 années antérieures, proches des niveaux record atteints en 2008 et 2009.

Si la montée en puissance de l'éolien est récente dans l'histoire du Danemark, les raisons du succès de son déploiement et de la filière industrielle sont à rechercher dans les années 50 lorsque plusieurs initiatives isolées posèrent les bases d'une industrie qui domine aujourd'hui le marché mondial.

Les origines artisanales de la filière

Avant même les années 50, les premières initiatives esquissant le développement de l'éolien furent prises en milieu rural, dans des zones propices à l'innovation en raison d'une faible diffusion des technologies modernes au-delà des centres urbains. Faute de pouvoir disposer de réseaux distribuant du courant alternatif, du courant continu fut produit, notamment pour alimenter des batteries, ce type de courant étant mal adapté à un transport sur longue distance. Les restrictions aux importations de gas-oil après la guerre limitèrent l'essor du diesel, contribuant encore à l'adoption en zone rurale d'éoliennes.

Dans cette histoire de l'éolien, Poul la Cour, météorologue danois, figure parmi les pionniers de l'énergie éolienne, du moins en Europe[120]. Dans les années 1890, il expérimenta la production d'électricité à partir de la technologie utilisée pour les moulins (Nissen et al., 2009). Une première éolienne produisant du courant continu fut érigée à Askov, à l'Est d'Esbjerg en 1891 à laquelle il adjoignit un dispositif spécifique (« kratostat ») destiné à atténuer les variations de puissance dues à l'intermittence des vents (Simmie, 2012). Il breveta le mécanisme permettant de stabiliser les éoliennes à couple, utilisa l'électrolyse pour stocker l'énergie sous forme d'hydrogène et put ainsi assurer l'éclairage de son école. Plusieurs centaines de machines de maximum 30 KW furent vendus à des fermes ou à des magasins situés en milieu rural (Karnøe, 1991, p. 162).

Certains de ses élèves prolongèrent par la suite l'expérience, sans succès majeur jusqu'au lendemain de la Seconde Guerre mondiale. Dans les années 50, Johannes Juul, ancien élève de La Cour occupa sa retraite à tenter des expériences Il put obtenir d'une entreprise d'énergie (SEAS) un budget de recherche lui permettant de construire la première éolienne en courant alternatif (asynchrone) et de la connecter au réseau électrique dans la région d'Egesborg. Un modèle plus grand fut conçu en 1958 à Gedser (au sud de Copenhague), l'éolienne en question demeurant longtemps la plus grande éolienne au monde. Si elle cessa de fonctionner dans les années 60, elle fut restaurée dans les années 70 par la NASA dans le cadre d'un programme de mise au point d'éoliennes de grande taille avant d'être définitivement remisée au musée danois de l'électricité de Bjerringbro.

Dans les années 70, les innovations dans l'éolien furent le fait d'amateurs s'employant à améliorer le modèle Gedser, avec des niveaux de production trop bas (de l'ordre de 10 à 15 kilowatts) pour conquérir un large marché. La première éolienne d'1 MW fut conçue par les enseignants de l'école de Tvind, dans un but militant (renoncer aux énergies fossiles sans pour autant céder au choix du nucléaire). Conduits par Amdi Peterson, ils utilisèrent un générateur et une boîte de vitesse récupérés sur un treuil de mine,

[118] http://www.megavind.windpower.org/en/knowledge/statistics.html
[119] Think Denmark, White papers for a green transition- Wind Energy Moving Ahead, How wind energy has changed the Danish energy system, 2017, p. 24.
[120] Au cours de la même période, des installations éoliennes furent conçues, notamment par James Blyth en Ecosse (1888) and Charles Brush aux États-Unis (1888).

un arbre de transmission fourni par un chantier naval pour les installer sur une tour construite par des volontaires. Pour les pales, l'aide d'Ulrich Hutter à Stuttgart fut précieuse et l'Université technique de Danemark fournit un soutien pour résoudre les problèmes de connexion au réseau. Achevée en 1978, l'éolienne fut connectée au réseau jusqu'en 2010

L'un d'eux, Christian Riisager (charpentier), parvint à construire une trentaine de machines sur la base de solutions techniques qu'il avait éprouvées en réparant des moulins (Jensen, 2003, pp. 19 – 20). Ses avancées intéressèrent l'ingénieur Medelbye, dont le père avait travaillé avec Juul (Wistoft et al, 1991: 212) qui suggéra à Riisager de recourir à un moteur asynchrone (comme dans le modèle développé par Juul) pour la connexion au réseau, laquelle fut refusée par la compagnie locale d'électricité. Un journaliste voisin fit par erreur état d'une réponse positive de cette compagnie, information reprise par plusieurs organes de presse, ce qui conduisit l'entreprise concernée à finalement accorder son autorisation (Møller, 1978). Dans la foulée, une série de dispositions fut prise par l'association des entreprises danoises d'électricité pour la connexion au réseau des éoliennes (Karnøe et al., 2012).

Plusieurs autres initiatives isolées contribuèrent *in fine* à forger la filière éolienne. Ainsi, un établissement du réseau des écoles Tvind (destinées à promouvoir les valeurs socialistes) de la petite ville d'Ulfborg (Jensen, 2003, pp. 60 – 63) sollicita le centre de recherches de Risø, qui avait conçu des pales pour des éoliennes F.L. Smidth durant la Seconde Guerre mondiale. Le projet Tvind permit des avancées pour la conception des pales, le recours à des matériaux nouveaux et la mise au point d'éoliennes dotées de 3 pales et non plus de 2. Près de Tvind, dans la ville d'Herborg, Erik Jørgensen, un mécanicien voulut se doter d'une éolienne pour réduire ses dépenses en énergie pour laquelle il privilégia le métal et une structure en rose. En février 1978, un étudiant, Henrik Stiesdal le convainquit d'adopter le système des pales et les 2 mirent au point en 1978 leur modèle Stiesdal doté de 3 pales et d'un générateur asynchrone. Grove-Nielsen, qui avait acquis les moules du modèle Tvind, conçut les pales. Des vents violents mirent en lumière les faiblesses du modèle, encourageant Grove-Nielsen à innover. Au final, une succession d'inventions, initiée par des acteurs certes isolés mais en lien direct ou indirect les uns avec les autres, habitant dans des localités voisines ont posé les bases d'une filière.

Soucieux de se prémunir contre la hausse des prix du pétrole, le journaliste Møller fut le premier à acheter une éolienne Riisager en 1976 pour sa maison de campagne. Il sollicita une connexion au réseau, sans succès en raison de l'absence de cadres juridiques en la matière. La législation permettant aux fournisseurs de se connecter aux réseaux locaux basse tension fut adoptée en 1976. Dans la foulée, le journaliste Møller relata son expérience avec son éolienne de 22 kW (connectée en novembre 1976) et une série d'articles éclaira les conditions dans lesquelles les particuliers pouvaient valoriser leurs équipements (Møller, 1978, pp. 43–46). Les premiers intéressés furent les agriculteurs dont beaucoup constituèrent des coopératives.

Le mécontentement affiché par certaines municipalités et des entreprises locales d'énergie ainsi que la fiabilité inégale des éoliennes empêchèrent le marché de décoller (150 éoliennes construites entre 1976 and 1978). En 1978, l'Association des propriétaires d'éoliennes (DWO) fut constituée au domicile de Møller's et se proposa d'agir dans différents domaines (cadre règlementaire, innovation technologique, financements, assurance, planification spatiale afin que les municipalités puissent octroyer des permis d'implantation). Ainsi, se constitua peu à peu un « lobby » qui, au-delà de ses activités vers différents publics constitua un lieu d'échanges favorable à l'innovation, notamment à travers une publication mensuelle relatant les différentes avancées et les performances des modèles disponibles[121].

Essor d'un écosystème à partir de logiques de « bricolage »

Compte-tenu de cet héritage, Karnøe suggère de remonter aux années 70 pour expliquer le succès actuel des industriels danois. Les initiatives pour prolonger les efforts d'innovation des pionniers (notamment Juul ou Riisager) ont permis au tissu industriel danois de profiter de l'éclosion du marché californien entre 1980 et 1987. Par la suite, le choix des énergies renouvelables opéré par les autorités danoises au détriment de l'option nucléaire créa de nouvelles conditions favorables. L'éolien put compter sur certaines associations, des industriels (tels Riisager), le réseau certains membres du milieu académique et certains responsables politiques.

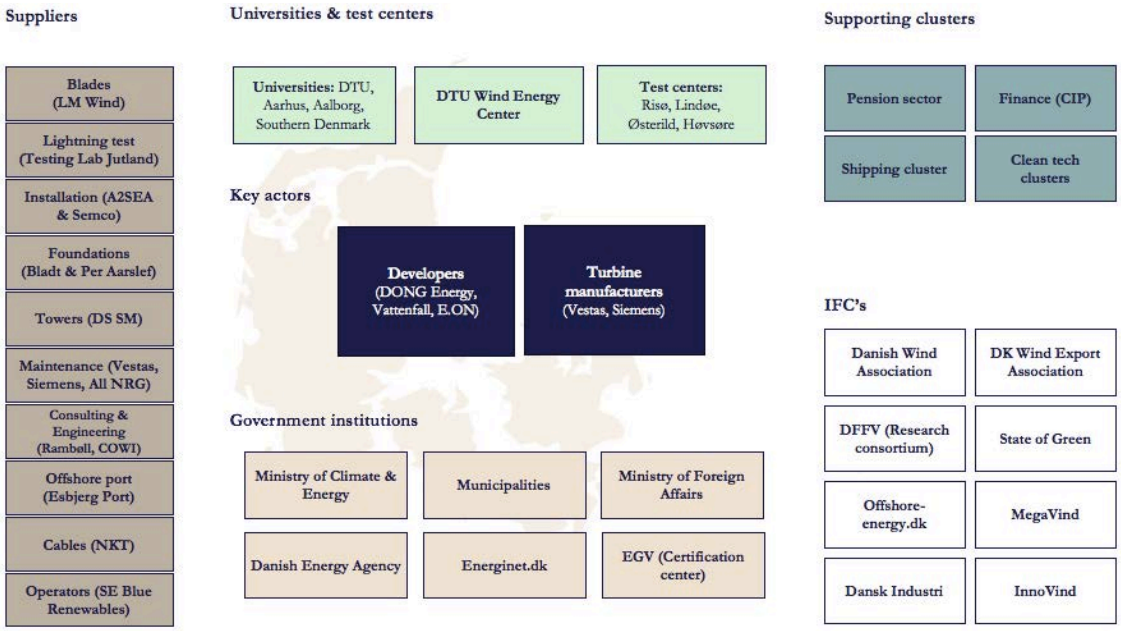
[121] Natural Energy

Les gouvernements successifs ont peu à peu adopté les règlementations idoines (par exemple pour convaincre les utilities d'intégrer au réseau électrique centralisé la production d'éoliennes). En outre, « l'accord 100 MW » fit des utilities des acheteurs d'équipements la fin des années 80. En somme, lors de la montée en puissance du marché européen au début des années 90, les industriels danois étaient prêts.

Si l'expérience danoise s'inscrit en faux par rapport aux théories liées à la dépendance du chemin, elle se distingue également des processus décrits au sujet des systèmes d'innovation nationaux. La notion de « path creation » s'impose estime Kenoe. Sans initiative provenant du sommet de l'État, sans politique de R&D spécifique déployée par l'État, les acteurs danois ont en effet mobilisé des ressources existantes, les ont adapté – parfois à la marge – pour innover en matière de conception et de production d'éoliennes. L'écosystème s'est forgé à partir de microdécisions provenant de consommateurs, d'entreprises d'électricité, de partis politiques, de compagnies d'assurance, d'autorités régulatrices dans un contexte où 2 options (éolien et nucléaire) s'opposaient et étaient en quête de légitimité.

Loin de découler d'une autorité centralisée, les innovations ont beaucoup dû au hasard ou du moins à des rencontres entre pionniers, par exemple lorsque Medelbye suggéra d'utiliser le générateur asynchrone de Juul pour améliorer l'éolienne de Riisager (qu'il avait aperçue depuis la route) ou lorsque Stiesdahl proposa à Vestas de recourir à la turbine de Herborgs. Les réticences des banques à avancer les capitaux nécessaires à Herborgs furent compensés par la commande d'une cinquantaine de turbines passée par Vestas. Les vents parfois violents le long de la côte danoise furent précieux pour tester la robustesse des premières éoliennes à l'heure où la concurrence rencontrait des problèmes de fiabilité.

En somme, loin de répondre à un schéma structuré et pensé a priori, l'émergence de l'écosystème a suivi une trajectoire non-linéaire forgée par des rencontres, des opportunités (comme la forte demande



momentanée sur le marché californien) qui fait écho à la notion de "garbage can" mise en avant par les théories de l'organisation (Cohen et al., 1972). Au fond, dans ce type de processus, le succès semble moins relever d'un plan que de la simultanéité de différents faits, d'initiatives, loin des schémas d'apprentissage mutuel pensés à priori (Martin & Sunley, 2003). L'écosystème danois ne doit son succès ni à une politique publique pensée sur le long terme, ni à des conditions favorables apparues à un moment donné sur le marché mais plutôt à une série d'initiatives non coordonnées.

Graphique 24. Cartographie du cluster éolien danois
Source : The Danish Wind Cluster

Des initiatives déployées parallèlement par les autorités danoises dans le secteur du biogaz et dans celui du photovoltaïque se sont avérés vains. En somme, le scénario ne saurait se comparer à celui de la Silicon Valley, de la Corée du Sud ou de la voie chinoise pour développer l'éolien, ni même de la politique industrielle développée en Allemagne pour le photovoltaïque. L'expérience danoise suggère plutôt que l'action publique peut être couronnée de succès même si elle se limite à accompagner des initiatives décentralisées. Il s'est agi pour les pouvoirs publics d'accompagner un mouvement, d'apporter la confiance, la légitimité, la visibilité nécessaire pour que le cluster prenne peu à peu forme. Cela peut se faire à travers des « hybrid forums » (Callon et al., 2009) qui promeuvent interactions et dialogues entre acteurs, qui permettent la fertilisation croisée entre expériences diverses.

Le succès de la filière éolienne est d'autant plus intéressant que lors de son émergence, l'option du nucléaire était présentée par plusieurs organes gouvernementaux comme l'unique choix réaliste. « Vous pouvez discuter autant que vous voulez mais c'est le nucléaire que vous allez avoir » déclarait ainsi le Directeur du DEF (Karnøe & Buchhorn, 2008). En réaction, une association nouvelle (Organisation pour l'information sur l'énergie nucléaire – OOA) fut créée et fut précieuse pour crédibiliser d'autres options. Une campagne sur les énergies alternatives se développa (Meyer, 2000, p. 87; Nielsen, 2001, p. 70) malgré les efforts du gouvernement en 1975 pour clore le débat public en faveur du nucléaire.

La promotion des énergies renouvelables s'opéra à la faveur d'ouvrages largement diffusés (S*oft Energy Paths*, Amory Lovins, présenté en 1975 à l'Agence danoise de l'énergie) (Meyer, 2000, p. 77). Le réseau des bureaux de l'énergie présent dans l'ensemble du pays grâce aux « Écoles populaires », se proposa de développer des compétences pour construire des éoliennes, des centrales à base de biogaz ou des centrale solaires (Beuse, 2000, p. 62). Sans oublier les débats inspirés par le Club de Rome sur les limites des modèles de croissance (Meadows et al., 1972).

En 1974 et 1975, Niels Meyer, Professeur de physique et président de l'Académie des sciences techniques mit sur pied 2 Comités consacrés à l'énergie éolienne dont les rapports (en mai 1975 et en janvier 1976) recommandèrent des initiatives industrielles. Loin d'inspirer une politique favorable aux énergies renouvelables, ces initiatives coïncidèrent avec le premier Plan énergie (Energy Plan EP'76) qui envisageait la construction de 4 à 6 centrales nucléaire d'ici à 1995. Un groupe de scientifiques proposa un plan alternatif à l'été 1976, alimentant ainsi une vague de débats. Ce n'est qu'en 1976 que la stratégie gouvernementale en matière de recherche sur l'énergie encouragea l'industrialisation d'éoliennes à travers un programme spécifique et que le centre de Risø fut soutenu pour encourager l'innovation en matière d'éoliennes de petite taille (Meyer, 2000, p. 97; Nielsen, 2001, p. 114).

Les premiers soutiens d'envergure ne furent décidés qu'à la fin des années 70. Le Ministre du logement argua en juin 1979 que les subventions allouées à l'industrie de l'éolien se justifiaient pour « créer des opportunités pour l'industrie danoise afin qu'une production en série puisse démarrer » (Van Est, 1999, p. 79). La législation adoptée à cette occasion exigeait une certification par un organisme spécifique (le TRC) des éoliennes, incitant ainsi les producteurs à coopérer étroitement avec lui et posant les bases d'un écosystème qui allait se développer. Des collaborations plus ou moins formalisées furent nouées avec différents acteurs de l'industrie et furent à la source d'une innovation incrémentale qui permit notamment à l'éolienne Design de 55 kW de voir ses performances accrues de 50% entre 1981 et 1984 (Karnøe, 1991).

Encouragées par les subventions accordées à partir de 1979, plusieurs entreprises dont Vestas, Nordtank, Bonus et Micon se lancèrent dans une diversification en étendant leur portefeuille d'activité dans l'éolien et en faisant l'acquisition ou en s'inspirant des innovations réalisées par Riisager et Herborg. En 1980, une dizaine d'entreprises commercialisaient des éoliennes au Danemark, notamment des entreprises soucieuses de diversifier leur portefeuille d'activités.

Confrontée au déclin de ses ventes pour ses productions traditionnelles (réservoirs, équipement pour la gestion de l'eau dans les fermes), Nordtank fut l'une d'entre elles. Un des ingénieurs de l'entreprise convainquit la Direction de s'orienter vers la production d'éoliennes (Jensen, 2003, p. 78). Les solutions techniques adoptées s'inspirèrent des travaux de Riisager et de Herborg ou encore de Grove-Nielsen, d'Økær Energy pour les pales (fournisseurs attitrés de Herborg). En mai 1980, Nordtank présentait ses éoliennes au Salon de l'agriculture. Bonus était également affecté par le déclin des ventes de ses productions traditionnelles.

Le Directeur finit par céder aux pressions de son fils qui l'incitait à s'orienter vers la filière éolienne. Une éolienne produite par Nordtank fut améliorée (Jensen, 2003, pp. 82–83) grâce au centre de recherche de Risø. Bonus construisit la structure de la nacelle et développa une collaboration avec les industriels locaux pour la production de pales, de roulements et arbres de la turbine. Ainsi, une série d'entreprises, le plus souvent des PME, mirent à profit leur savoir-faire dans l'industrie mécanique pour progresser dans la mise au point d'éléments nécessaires aux éoliennes. Dans le centre de recherche de Risø, les météorologistes inventèrent en 1981, une méthodologie permettant de prévoir la vitesse du vent en fonction des formes du relief (Nielsen, 2001).

Ce n'est que dans les années 80 que ces collaborations informelles furent peu à peu complétées par des programmes de R&D plus institutionnalisés. Néanmoins, cet ensemble de savoir-faire ne profita pas immédiatement du marché danois qui restait atone en dépit des premier soutiens apportés. La Stratégie énergétique édictée en 1981 mentionnait que la production d'électricité pouvait certes reposer sur l'éolien à hauteur de 10% d'ici à 2000 mais la priorité restait le développement du nucléaire. Une opportunité majeure apparut avec l'éclosion du marché californien. L'État de Californie décida en effet dans les années 80 de soutenir massivement les énergies renouvelables et notamment l'éolien. L'industrie américaine aurait pu bénéficier de la manne mais les concurrents danois s'avérèrent plus performants pour plusieurs raisons.

L'industrie américaine du secteur s'est distinguée par une nette séparation des tâches, notamment entre cols blancs et cols bleus (Karnøe 1999) mais également entre activités de production et activités de maintenance. En outre, les entreprises américaines ont eu tendance à développer en interne leur système d'innovation et à moins s'appuyer que les entreprises danoises sur les interactions entre firmes. Karnøe (1999) souligne pour sa part la persistance au Danemark de modes de fonctionnement pré-fordistes, d'artisanat induisant au final des liens forts entre les différentes tâches et une moindre hiérarchisation. Loin de se limiter au périmètre des firmes, les interactions ont également été fortes entre fabricants d'éoliennes et propriétaires, très tôt rassemblés dans une association spécifique (Garud et Karnøe 2003). Les ajustements incrémentaux se sont au final avérés plus pertinents que la recherche d'innovations de rupture.

Une autre différence entre États-Unis et Danemark porte en effet sur la conception même des éoliennes. Si certains énergéticiens danois avaient perçu l'intérêt de l'éolien (la machine Gedser fut construite et financée par l'entreprise SEAS), leurs efforts pour développer des éoliennes puissantes (de l'ordre de 600 kW) ne donnèrent pas les résultats escomptés. Ce sont des entreprises de machinerie agricole qui permirent l'essor de la filière (telles Vestas, Nordtank, Bonus, Nordex) en y consacrant leur savoir-faire en matière d'ingénierie et en donnant la priorité à la robustesse. Aux États-Unis, les acteurs de l'éolien se sont pour leur part appuyés sur leurs compétences dans l'aéronautique (Boeing, Lockheed par exemple), sans succès. Même si la technologie de l'éolien emprunte à celle de la fabrication d'hélicoptères, les pales évoluent en effet dans des flux d'air beaucoup plus lents et les exigences aérodynamiques ne sont pas les mêmes pour la construction d'un avion et pour celle d'une éolienne. En somme, même si les éoliennes ont dans leur design emprunté au savoir-faire de l'aéronautique (par exemple pour le profil des pales), la filière de l'éolien devait se constituer ses propres normes.

Autant les États-Unis firent le choix de l'innovation de rupture, autant les acteurs danois eurent recours à une forme de « bricolage » (Garud et Karnøe, 2003), à une approche fondée sur les interactions entre acteurs. Aux États-Unis, plusieurs avancées sont nées de recherches conduites à l'Université, à la NASA qui coordonna un vaste programme de recherche consacré à l'éolien par le Ministère de l'énergie et qui mit à disposition un centre d'essai à Rocky Flats (Menzel et Kammer, 2017). À l'opposé, le modèle danois a reposé sur la mise en commun de compétences issues des secteurs de la machinerie agricole et de la construction navale.

En recherchant l'innovation de rupture à partir des conceptions en vigueur dans l'aéronautique, les acteurs américains ont mis au point des éoliennes à rotation rapide, constitués de matériaux légers et dotés de 2 ou 3 pales (Gipe, 1995) qui se sont avérées beaucoup moins fiables que les modèles développés dans le même temps par les acteurs danois. Dans la conception danoise, les éoliennes sont constituées de 3 pales, avec un rotor en position face au vent et élaborés avec un primat accordé à la robustesse.

Dans une enquête consacrée à 29 firmes américaines et 32 firmes danoises opérant dans le secteur de l'éolien, Menzel et Kammer font en outre le constat que le savoir-faire s'est d'autant mieux transmis dans le cas danois que la plupart des firmes ayant survécu ont racheté des firmes actives dans les mêmes domaines et ont ainsi pu capitaliser sur une expertise existante. Sur le plan théorique, Menzel et Kammer font ainsi le lien entre la perspective institutionnaliste développée notamment par Boyer, Nelson (2002), Hall et Soskice (2001) qui soulignent l'importance des contextes institutionnels et la théorie de l'héritage développée notamment par Klepper (1996) qui voient dans les « routines » des firmes les explications aux évolutions industrielles.

Dans la foulée de l'éclosion du marché californien, le Danemark devint de plus en plus ouvert à la promotion de l'éolien, au détriment du nucléaire. Au cours des années 80, la politique énergétique se fit plus favorable au secteur avec une succession de décisions prises (comme la mise en place d'une subvention fixe par kWh produit).

Un accord signé avec les entreprises d'électricité pour la période 1984–1994 offrit une visibilité à la filière mais l'enrichissement d'une minorité apte à accaparer les subventions mina la crédibilité de la politique énergétique. Plusieurs mesures furent prises pour favoriser l'acceptation sociale (il fut notamment imposé que la résidence du propriétaire d'une éolienne et que cette dernière soit dans la même municipalité). Le gouvernement décida de porter la production d'électricité d'origine éolienne à 100 MW entre 1986 et 1990 (entre 1978 et 1985, celle-ci n'avait pas dépassé 75 MW).

Dans un pays d'inspiration libérale, les subventions apportées au secteur se heurtèrent néanmoins régulièrement à des oppositions, d'autant que toutes les municipalités n'étaient pas favorables à l'implantation d'éoliennes. En outre, en 1986, la Californie revit à la baisse ses incitations fiscales et certains problèmes techniques fragilisèrent la réputation de la technologie danoise (Gipe, 1995). À ces difficultés industrielles, la filière répondit par une série d'innovations portant la puissance des éoliennes à 450 kW et le marché danois connut une forte hausse, alimentée par les investissements privés et par ceux des entreprises d'électricité.

Parallèlement, la demande croissante sur les marchés allemands, britannique, espagnol offrit une nouvelle opportunité qui permit aux industriels danois de monter en gamme. Comme preuve des atouts de l'écosystème danois, Gamesa (à l'origine une joint-venture associant Vestas en 1992) et l'indien Suzlon installèrent leurs centres de R&D au Danemark pour pouvoir profiter des compétences de la main d'œuvre locale. Siemens acheta Bonus Wind Power en 2005. En 2006, le Ministère de la science identifia les biotechnologies, les TIC et l'énergie éolienne comme les nouvelles industries high-tech danoises. Un cluster était né mais dont l'organisation semble encore imprégnée des principes qui ont prévalu aux débuts de l'industrie éolienne danoise, notamment la flexibilité, le pragmatisme et une forte collaboration entre les acteurs.

3. Les particularités du cluster danois

Nous considérons ici un cluster comme « une concentration de firmes interdépendantes dans un même secteur industriel ou dans des secteurs voisins sur une aire géographique spécifique » (Isaksen & Hauge, 2002; Porter, 2000). La recherche sur les clusters a dégagé plusieurs types, l'agglomération (Silicon Valley), des modèles plus complexes (Silicon Glenn, Scottish Electronics Industry) des réseaux interdépendants sociaux (districts industriels italiens) (Iammarino & McCann, 2006, p. 1029). La plupart des recherches conduites mettent l'accent sur les effets d'inertie, sur l'ancrage historique des clusters mais Martin (2010) souligne le caractère non-opératoire de concepts comme ceux de dépendance du chemin pour analyser les clusters nouveaux.

La création plutôt que la dépendance du chemin prévaut dans de nombreux cas de sorte qu'une littérature atténue la distinction entre agency et structure et mettent en relief une « perspective relationnelle » (Czarniawska, 2004).

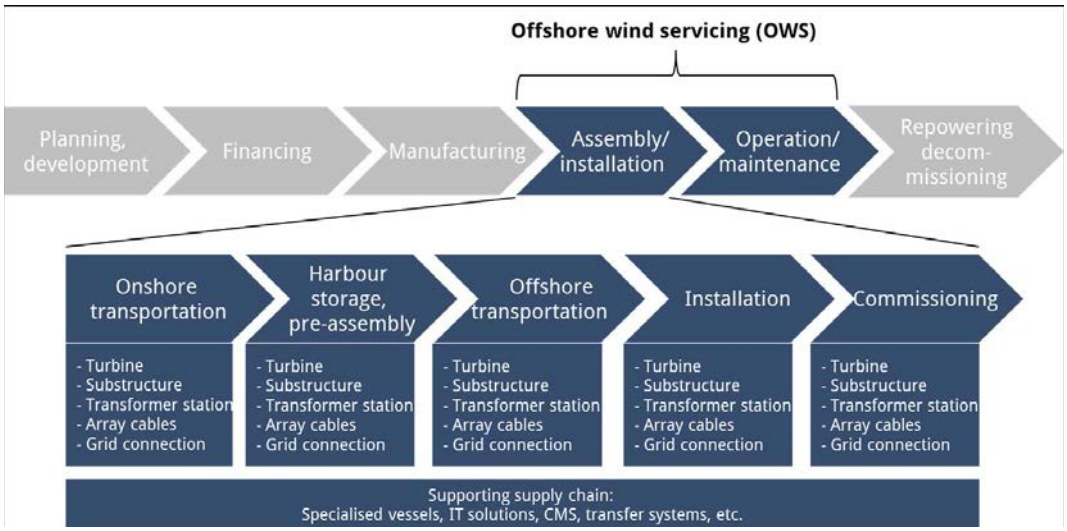


Figure 3
Chaîne de valeur dans l'éolien offshore (secteur des services)
Source : Renewable and Sustainable Energy Reviews

Dans ce contexte, l'agent n'est plus perçu comme un produit du réseau, les deux sont les faces d'une même pièce. La création du chemin n'est pas comprise comme une série d'action induite par le passé mais comme des arrangements sociotechniques qui donnent naissance à des projets, davantage inspirés que directement induits par des héritages.

Un des exemples cités ici est celui de l'usine de centrales à gaz utilisées par Edison pour ses innovations en électricité (Hargadon & Douglas, 2001) ou les efforts des premiers acteurs danois du secteur de l'éolien qui parvinrent à mobiliser les acteurs du réseau électrique pour assurer le succès à grande échelle de leurs innovations.

Les acteurs publics du cluster de l'éolien

Si les premières machines étaient peu performantes (25 kW pour un diamètre de 10,6 mètres), elles ont rapidement ont laissé la place à des machines d'une puissance comprise entre 750 et 1300 kW, un rotor de diamètre compris entre 48 et 54 mètres). Les machines contemporaines les plus grandes ont une puissance de 2 500 MW et une hauteur de 70 à 80 mètres (une machine actuelle de 200 MW produit autant que 200 éoliennes des années 1980) (Krohn, 2002). C'est moins l'État qui a joué un rôle que les particularités du capitalisme danois.

L'État

Menzel et Kammer relèvent plusieurs caractéristiques de l'essor d'une industrie de l'éolien au Danemark en se référant au cadre théorique développé par Hall et Soskice (2001). Ces derniers prônent une approche fondée sur la diversité des capitalismes (VoC[122]) et établissent notamment une distinction entre économies libérales (LME[123]) et économies coordonnées (CME[124]). Dans ces dernières, le cadre institutionnel et notamment les acteurs non marchands sont supposés influer sur l'affectation des ressources entre industries tandis que dans les LME, les interactions entre acteurs sont pour l'essentiel laissées au marché.

À l'échelle des marchés du travail, l'une des traductions de ces deux approches différentes est que la flexibilité prévaut au sein des LME, que les compétences qui y sont diffusées visent à servir différentes types d'emploi. En revanche, des approches plus ciblées et adossées à des relations au long cours entre acteurs du marché du travail prévalent dans le cas des CME. Sur le plan de l'innovation, la capacité des firmes à se saisir rapidement de nouvelles opportunités, à initier pour cela des innovations de rupture serait plus prononcée dans le cas des LME tandis que l'innovation dans les CME serait incrémentale et dépendante de la capacité des acteurs à coopérer (Hall et Soskice, 2001).

[122] Varieties of capitalism.
[123] liberal market economies
[124] coordinated market economies

Hall et Soskice (2001, p. 49) identifient les politiques des économies libérales comme reposant sur « des incitations fiscales, des programmes de formation axés sur des compétences opérationnelles et des subventions à la recherche fondamentale ». Au-delà des controverses sur la pertinence de cette classification, sur la nature du capitalisme danois[125], ces caractéristiques se retrouvent au Danemark (Gipe, 1995), pourtant considéré comme une économie coordonnée. Néanmoins, le rôle des Instituts de recherche mis en place fut différent aux États-Unis et au Danemark. Aux États-Unis, l'Institut de recherche sur l'énergie solaire (Solar Energy Research Institute) devenu par la suite le Laboratoire des énergies renouvelables (National Renewable Energy Laboratory) se consacra à la conception des éoliennes à partir de 1977 dans une démarche classique de recherche appliquée.

Son homologue au Danemark (le DWTS[126], créé en 1979) eut non seulement pour fonction de développer la recherche mais également de certifier les machines élaborées par les industriels danois. Les normes n'étant pas clairement établies dès le départ, un dialogue s'est noué entre le secteur privé et l'organisme pour les préciser peu à peu. En somme, à l'heure où l'Institut américain se consacrait à des activités de recherche pure, son homologue danois structurait la filière nationale et contribuait à forger un savoir commun aux différents acteurs de la filière.

Le Danemark compte aujourd'hui plusieurs clusters dans les sciences de la vie, les TIC, la logistique, l'agro-alimentaire, le design qui ont fait du pays l'un des plus innovants de l'OCDE et le pays compte plusieurs organismes qui font le lien entre structures de recherche, soutien à l'export et industrie. L'investissement dans la R&D atteint 1% of PNB, un niveau élevé dépassé uniquement par la Corée du Sud à l'échelle mondiale, un chiffre atténué par le pourcentage dans le secteur privé (1.86% of BNP), un chiffre inférieur à celui des voisins du Danemark comme la Suède et la Finlande. Le rôle des autorités s'est par ailleurs manifesté à travers une législation sur les normes destinée à assurer la sécurité et la fiabilité des équipements. L'expertise en la matière fut confiée au Laboratoire national de Risø, dédié à l'origine au nucléaire, mais fort de nos jours d'une centaine de spécialistes en aérodynamique, météorologie, matériaux avancés et qui est devenu un acteur majeur de l'innovation et de la valorisation à l'export de la filière.

Il n'existe cependant pas de politique comparable à celle des pôles de compétitivité en France et les liens tissés entre les industriels n'ont le plus souvent pas la densité de clusters définis comme telle par la littérature. Dans le cas danois, il conviendrait probablement mieux de parler d'un écosystème qui n'a pas de logique territoriale précise, même s'il s'appuie sur certains pôles au sein duquel les coopérations sont souples et cofinancées par l'État selon des modalités moins institutionnalisées qu'en France.

Sur le plan territorial, la montée en puissance a conduit certains ports à jouer un rôle majeur d'autant que l'industrie nautique a bénéficié des besoins en équipements d'installation et de transports de machines en mer. Sur la côte occidentale du pays, Esbjerg figure parmi l'un des clusters les plus denses au monde en matière d'équipement pour les activités offshore.

Les dispositifs de formation

Selon l'Association danoise de l'industrie de l'éolien, le secteur employait en 2016 31 000 salariés soit 2% de la main d'œuvre du secteur privé. En 2011, cette main d'œuvre relevait principalement des activités de production (51%), d'expérimentation et de recherche (11%), dans les activités de process et de suivi qualité (10%), de ventes et de marketing (10%), le reste absorbant 7% de cette main d'œuvre. Sur les 30 000 personnes employées, 11% seulement étaient peu qualifiées, 14% étaient diplômées et 41% sortaient de l'enseignement supérieur (contre 25% dans l'industrie en général)[127]. 15% de la force de travail dans l'industrie de l'éolien est d'origine étrangère[128].

[125] Kenworthy (2006) la définit comme une économie de type intermédiaire et Campbell et Gingerich (2007) voient dans l'économie danoise une forme hybride de capitalisme. Menzel et Kammer (2007) suggèrent d'attribuer cette différence d'appréciation à la date à laquelle les analyses concernées ont été rédigées (la fin des années 90 pour Hall et Soskice tandis que l'analyse de Campbell et Gingerich intervient après la libéralisation du marché du travail.

[126] Danish Wind Turbine Test Station

[127]Danish Wind Association (2016). Branchestatistik 2016, pp. 15-16. Disponible sur le site : http://www.windpower.org/da/fakta_og_analyser/statistik/branchestatistik.html.

114 Danish Wind Association (2011). Profile of The Danish Wind Industry. Denmark – Wind Power Hub. Pp 6-7.

[128] Entretien de l'auteur avec le Directeur de Wind Denmark, mai 2019.

80% des emplois (lesquels sont pour l'essentiel des emplois qualifiés) se situaient dans les régions occidentales (et rurales) du pays[129].Les caractéristiques générales de la main d'œuvre au Danemark (forte participation au marché du travail, productivité élevée contribue également au dynamisme de la filière.

Les structures de coopération

La filière danoise connaît un chiffre d'affaires en croissance régulière et tiré à 55-60% par les exportations (celles-ci atteignirent un montant record en 2008 avec 9,5 milliards€[130]). Dès ses origines, la filière s'est employée à exporter. Comme l'explique un industriel :

> « Dès le début, nous avons eu le souci d'être présent sur les marchés extérieurs pour 2 raisons, d'une part parce que le marché californien s'est effondré et qu'il fallait donc des alternatives, d'autre part parce que le marché danois est minuscule. Très vite, acteurs économiques, régulateurs, responsables politiques qui se connaissent tous très bien vu la taille du pays ont compris qu'il leur fallait agir ensemble »[131].

Elle compte plus de 500 acteurs industriels liés entre eux par diverses institutions sans institutionnalisation comparable à ce qu'on peut observer dans d'autres pays (par exemple les pôles de compétitivité).

L'écosystème danois reposait jusqu'en 2019 sur 2 associations principales : Wind Energy Association (Danemarks Vindmølleforening) et la Danish Wind Industry Association (Vindmølleindustrien), la première rassemblant principalement des usagers, la seconde les industriels. En 2019, les 2 associations (celle-ci et Danish wind association) ont fusionné pour former l'organisme Wind Denmark. Son nouveau Directeur explique :

> « ce sont principalement les problèmes de qualité qui justifiaient pour les consommateurs de se rassembler et de de se distinguer des industriels. En outre, l'industrie manufacturière s'est toujours préoccupée de disposer d'un cadre règlementaire aussi favorable que possible quand les usagers peuvent avoir d'autres priorités. Dans les années 90, la nécessité est apparue de disposer d'organismes plus puissants. En 2008, les premières utilities ont rejoint l'association Danish Wind industry association. Chacun est désormais convaincu que le rassemblement en un organisme permettra de mieux défendre ses intérêts au Danemark et à l'étranger. Nous disposerons ainsi d'une capacité de lobbying accrue. À l'heure du 0 subvention, la nature de la relation avec les pouvoirs publics est appelée à évoluer profondément et il faut s'y préparer » [132]

Manufacturiers, développeurs, entreprises de services, grandes comme petites entreprises sont membres de l'organisme même si l'adhésion n'est pas obligatoire. Un Conseil d'administration de 30 membres choisit le dirigeant. La moitié des 30 membres est présente de droit, les autres sont élus par l'assemblée générale. Les frais d'inscription dépendent de la capacité de production pour ce qui concerne les membres qui sont des clients de l'industrie. Pour les autres, ils sont fixés par l'Assemblée générale.

Au-delà des activités de lobbying, une activité de conseil est conduite. «Notre principale valeur ajoutée, explique son Directeur, est de mettre en relation les acteurs les uns avec les autres sur quantité de sujets : comment s'exporter, comment s'adapter à des normes spécifiques, etc… Chaque année, un événement réunit tous les acteurs du secteur pendant 2 jours. Nous sommes LE cluster. Néanmoins, nous ne soutenons pas de projet d'innovation. Nous animons simplement une plate-forme (joint innovation platform) ».

D'autres organismes contribuent également à structurer la filière :

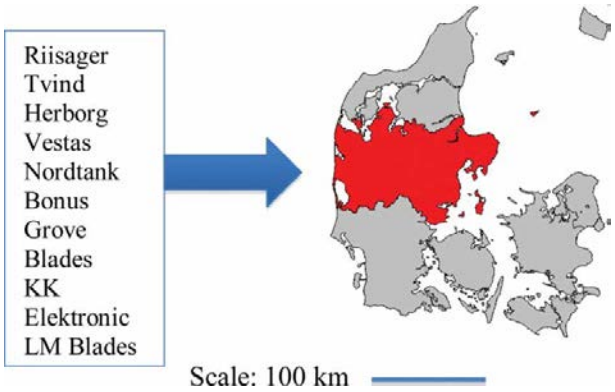
- l'Association des industries exportatrices (DWIA-Danish Wind Exports Association) forte de 300 membres. La Mission Innovation conduite par la Confédération de l'industrie danoise permet aux industries de l'économie verte d'influer.

[129] Think Denmark, White papers for a green transition- Wind Energy Moving Ahead, How wind energy has changed the Danish energy system, 2017, p. 24.
[130] Danish Wind Association (2016). Branchestatistik 2016. At http://www.windpower.org/da/fakta_og_analyser/statistik/branchestatistik.html
[131] Entretien avec l'auteur en janvier 2019.
[132] Entretien avec l'auteur, mai 2019.

- Entre acteurs privés et institutions de R&D, Megavind joue un rôle majeur depuis sa création en 2006. L'association a notamment à son actif la création du centre d'essais d'Østerild. Autre forme de collaboration, le projet InnoVind où la DTU coopère avec DHI GRAS, EMD International, Vestas et Vattenfall pour la mise au point d'une technique permettant d'identifier les zones les mieux adaptées à l'éolien afin de réduire la marge d'erreurs (environ 10%) inhérente aux modèles mathématiques communément utilisés[133].

- Offshoreenergy.dk, organisation à but non lucratif, associe différentes entreprises présentes dans les secteurs du pétrole offshore, du gaz, des renouvelables pour nouer des coopérations sur des savoir-faire communs[134].

Les pouvoirs locaux



Dans l'éolien marin, le rôle des autorités locales importe pour l'aménagement des infrastructures routières, surtout à un moment où les équipements sont de plus en plus lourds et encombrants. Le centre de gravité de l'industrie tend à se déplacer vers les littoraux.

Carte 5 : Géographie de l'écosystème de l'éolien au Danemark
Source : Peter Karnøe & Raghu Garud (2012)

Le cœur des activités de Siemens Gamesa est ainsi à l'intérieur des terres. Malgré les aménagements effectués, des problèmes de sécurité apparaissent sur certaines routes et sur certains ponts. Conséquence : des activités sont déplacées vers le littoral, notamment le port d'Isborg. Comme dans le cas allemand, les activités de l'éolien marin s'inscrivent fréquemment dans une stratégie de reconversion, en l'occurrence de l'industrie de la pêche (et non des chantiers navals). Linie s'emploie ainsi à accueillir toujours plus activités.

Les centres de R&D

Plusieurs Universités développent des activités de R&D en lien avec les acteurs privés et 2 Centres de recherche appelés GTS à l'intérieur du Danish Research Consortium for Wind Energy[135]. La principale Université est la Danish Technical University (DTU) et son Département Energie éolienne qui comptait en 2017 plus de 250 personnels. L'unique Master au monde en énergie éolienne y est proposé. L'Université collecte et analyse par ailleurs les données des 3 centres d'essais : le Laboratoire national de Risø, le Centre d'essais d'Østerild (qui permet de tester des éoliennes jusqu'à 250 mètres de haut en conditions réelles grâce à 6 zones d'essais en mer[136]), le Centre de Høvsøre, le LROC (Lindøe Offshore Renewable Center (LROC) financé par des acteurs privés (Vestas, Siemens, DONG, Vattenfall) et par l'Université du Danemark du Sud[137].

En décembre 2017 le gouvernement proposa d'accroître le nombre de sites d'essais et compléter ainsi le dispositif composé des centres d'Østerild et de Høvsøre avec 4 nouveaux centres. Les industriels intéressés par ces sites bénéficieront d'un soutien spécifique. Les prototypes implantés en 2018

[133] State of Green, 12 avril 2017, « Data from Space Will Boost Danish Wind Turbines », https://stateofgreen.com/en/partners/innovation-fund-denmark-innovationsfonden/news/data-from-space-will-boost-danish-wind-turbines/. Accès le 12 décembre 2018.
[134] https://offshoreenergy.dk
[135] Danish Research Consortium for Wind Energy (2017). At: http://www.dffv.dk/english/about-dffv 96 DTU WIND Energy (2017). at http://www.vindenergi.dtu.dk/Test-centers & http://www.vindenergi.dtu.dk/Test-centers/Oesterild & http://www.vindenergi.dtu.dk/Test- centers/Hoevsoere_DK
[136] Vestas have bought three, Siemens two, and Envision and GE Alstom one
[137] LORC (2017) at: http://www.lorc.dk/about#initiators

recevront chacun un soutien de €0.015/kWh tandis qu'en 2019, le niveau de soutien sera fixé par appel d'offres. L'idée est d'assurer que les industriels disposent de conditions favorables à l'innovation malgré l'introduction d'appels d'offres pour lesquels le principal critère est celui du prix.

Les acteurs privés du secteur

Au-delà des actions entreprises par les acteurs publics, l'écosystème danois est avant tout structuré par les acteurs privés de la chaîne de valeur, laquelle s'est constituée peu à peu avec l'aide d'acteurs danois puis étrangers. S'y développent d'étroites interactions entre donneurs d'ordre et PME.

Genèse d'une chaîne de valeur

Dans le contexte de la montée en puissance de l'énergie éolienne, une chaîne de valeur s'est en effet constituée avec des acteurs qui avaient initialement un cœur de métier relevant d'autres secteurs. À titre d'exemple, Riisager sollicita les services de KK Electronics, une PME de 20 employés, en 1976 et qui ajusta à la marge certaines de ses productions pour satisfaire la demande nouvelle. Cette entreprise est aujourd'hui leader de son marché. S'agissant des pales, Riisager approcha LM Fiber Glass, un sous-traitant de l'industrie nautique. Sceptique quant aux perspectives de développement de la filière, l'entreprise ne donna pas suite. Avec la montée en puissance du marché californien, une autre entreprise (Coronate Boats rebaptisée Alternegy) reprit à son compte les productions que l'entreprise Økær Blades avait développées entre 1975 et 1980 (Karnøe, Garud, 2012).

Une nouvelle phase s'ouvrit dans les années 80 avec le recours à des composants plus sophistiqués, développés conjointement par les sous-traitants et les donneurs d'ordre. Peu à peu des pôles de compétence se sont ainsi constitués avec des PME d'autant plus intéressées que des débouchés nouveaux apparaissaient. Les donneurs d'ordre tels que Vestas, Micon, Nordtank, Bonus se constituèrent ainsi un volant de sous-traitants, avec un niveau d'externalisation variable, Vestas se distinguant en conservant la conception et la production de pales et de la partie électronique. Entre les différents éléments constitutifs de cet écosystème, des relations relevant à la fois de la concurrence et de la coopération se constituent (Andersen and Christensen, 1999; Lorenzen, 2003; Maskell et al., 1998), une configuration caractéristique du milieu industriel danois reposant pour l'essentiel sur des PME collaboratives (Karnøe et al., 1999).

En somme, comme dans le cas allemand, l'industrie éolienne a pu reposer sur un ensemble de PME capables de s'adapter rapidement aux besoins spécifiques d'une filière nouvelles épargnant ainsi aux assembliers les risques et les investissements nécessaires pour développer en interne toutes les compétences requises (Langlois, 1992).

Le rôle des acteurs privés dans l'industrie manufacturière

Le Danois Vestas et l'allemand Siemens ont largement contribué à structurer la chaîne de valeur qui s'est peu à peu constituée, d'une part en organisant en amont des activités de sous-traitance, d'autre part en cofinançant des activités de R&D. Siemens dispose ainsi d'un centre d'essais pour pales à Aalborg (le plus grand à l'échelle mondiale) et un autre centre d'essai à Brande pour les turbines[138]. Vestas a son centre d'essai à Osterild. Le tissu de spécialistes et d'infrastructures constitue par ailleurs un facteur d'attractivité pour les autres turbiniers, notamment pour GE, Goldwind, Envision, Suzlon tous présents au Danemark.

À l'échelle mondiale, les 2 principaux acteurs de l'éolien marin sont Vestas Wind Systems et Siemens Wind Power (devenu Siemens-Gamesa). En 2014, Siemens et Vestas (MHI-Vestas, joint-venture constituée par le turbinier danois et Mitsubishi) avaient installé 90% des éoliennes marines dans le monde[139].

Après avoir été devancé par son concurrent chinois (Goldwind) en 2015, principalement en raison de la montée en puissance du marché chinois, Vestas est redevenu premier fournisseur mondial en 2016 avec

[138] Siemens opens the worlds largest wind turbine R&D test facilities. At: http://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2013/energy/wind-power/ew201303023.htm&content[]=EW&content[]=WP

[139] Bloomberg New Energy Finance (2017). Vestas reclaims top spot in annual ranking of wind turbine makers. At: https://about.bnef.com/blog/vestas-reclaims-top-spot-annual-ranking-wind- turbine-makers/

un capacité installée cette année-là de 9GW (soit 15.8% du marché mondial). Vestas est parvenu à s'internationaliser (il était présent sur 34 marchés en 2016), notamment sur le continent américain et en Asie. Afin de s'adapter à l'épuisement progressif du nombre de sites très favorables en Europe, des turbines adaptées à des conditions de vent moyennes sont mises en avant sur le marché européen. Des machines adaptées aux conditions cycloniques sont néanmoins commercialisées, notamment pour s'imposer sur le marché asiatique. Ici, la porte d'entrée est Taïwan avec le marché côtier de la Chine, du Japon, du Vietnam en perspective.

Vestas tend à élargir son périmètre à d'autres segments de la chaîne de valeur, notamment dans le secteur des services pour lequel les marges sont plus substantielles (17% contre 7% pour les turbines). Vestas attend une croissance dans le marché des services de 9% par an dans les 10 prochaines décennies. Ainsi s'explique l'acquisition d'UpWind Solutions et d'Availon. Le carnet d'ordre en matière de services est passé de 1.8 milliards € en 2015 à 10,7 milliards en 2017. « Nous avons cessé de nous voir comme de simples fournisseurs d'équipements » expliquait en 2017 le vice-président de l'entreprise - « nous adoptons une approche davantage holistique, nous nous voyons comme un élément du système électrique dans sa globalité au sein duquel l'équilibre résulte de l'association de différentes technologies »[140]. Autre axe de la diversification engagée : l'entreprise entend à l'avenir proposer des solutions associant des dispositifs de stockage, notamment grâce à une coopération nouée avec Tesla.

Si le volet manufacturier est crucial, il convient de ne pas négliger la part des services. Les coûts occasionnés par le développement, l'installation et l'entretien étant significatifs (de l'ordre de 46% du coût actualisé, le rôle des activités de service est crucial (Arwas et al., 2012) si bien que l'espace de la mer du Nord doit aussi être vu comme un cluster d'activités tertiaires voué à innover pour contribuer à la baisse des coûts.

Le rôle des acteurs privés dans les activités de service

Créée en 1972 en tant qu'entreprise d'État, Dansk Naturgas A/S fut dans un premier temps chargé de gérer les ressources gazières de la partie danoise de mer du Nord avant de prendre le nom de Dansk Olie og Naturgas A/S (DONG). Sa diversification dans le secteur de l'électricité remonte au début des années 2000 lorsque débuta une série de prises de participations dans des entreprises de ce secteur. DONG prit ainsi part en 2005 à la fusion des producteurs Elsam et Energi E2 et des sociétés de distribution d'électricité NESA, Københavns Energi et Frederiksberg Forsyning. Début 2014, le gouvernement danois donna l'autorisation à la banque d'affaires Goldman Sachs de se porter acquéreuse de 18 % du capital de la société, une décision qui provoqua une crise politique et la démission de plusieurs ministres du Parti populaire socialiste[141]. En 2016, Dong Energy fut introduit en Bourse et la participation de l'État passa de 59% à 50,1 %.

En mai 2017, Dong Energy annonça la vente de l'ensemble de ses activités pétrolifères à Ineos pour 1,3 milliard de dollars puis fut la même année rebaptisée Ørsted. L'entreprise est en 2018 le premier producteur d'énergie au Danemark, avec 49 % de parts de marché dans le secteur de la production électrique et 35 % dans celui de la production de chaleur. Il est également propriétaire de sites de production d'énergie, en service ou en projet, en Allemagne, en Suède, aux Pays-Bas, en Norvège et au Royaume-Uni.

L'entreprise a innové dans plusieurs domaines, notamment en matière de financement, à travers des partenariats avec des fonds de pension et restera comme le premier développeur au monde à avoir proposé l'aménagement d'un parc marin sans solliciter de subventions (en Allemagne, à l'horizon 2024). En 2016, l'entreprise estimait avoir conçu 25% des fermes éoliennes dans le monde, notamment grâce à sa capacité à monter des financements avec des fonds de pension, lesquels jugent l'investissement dans l'éolien à la fois peu risqué et source de revenus récurrents[142].

[140] David Weston, « We have definitely stopped seeing ourselves as merely providing turbines », *Windpowermonthly*, 22 juin 2018. https://www.windpowermonthly.com/article/1428343/we-stopped-seeing-ourselves-merely-providing-turbines. Consulté le 2 juillet 2018.
[141] Le gouvernement danois s'est engagé à conserver la majorité des parts de l'entreprise jusqu'en 2025. Une nouvelle réduction de cette participation est conditionnée à un accord entre partis politiques danois.
[142] http://www.dongenergy.com/en/our-business/wind-power

Au-delà du marché européen, le développeur est également présent en Asie (il détenait 4 parcs offshore à Taïwan en 2018[143]). À Taïwan - que les dirigeants d'Orsted voient comme un hub énergétique en devenir, à l'image du Danemark pour l'Europe - le développeur a par ailleurs noué un partenariat avec des entreprises locales, des centres de recherches pour concevoir un site d'essais de stockage (le premier sur l'île)[144]. Cette initiative s'inscrit dans la volonté du développeur d'étoffer ses activités non seulement dans l'éolien, mais aussi dans le photovoltaïque et dans le stockage[145].

4. Les principaux défis de l'écosystème danois

Une internationalisation plus nécessaire que jamais

Vu l'étroitesse du marché danois, la filière a dû depuis ses origines compter sur les marchés à l'export. L'association des producteurs d'éoliennes finança une étude de marche de la Californie au printemps 1982 (voir plus haut), laquelle souligna les opportunités offertes par le "1980 programme" visant à atteindre 10% d'électricité d'origine éolienne d'ici à 2000.

Le nombre d'éoliennes danoises exportées passa ainsi de 30 à 2000 par an entre 1982 et 1985. Le nombre de salariés de la filière passa de 300 à 2500, La part de marché des industriels danois sur le marché passa de 0% en 1981 à 65% en 1985, dans un contexte où la puissance installée sur le marché californien passa de 71 à 1250 MW.

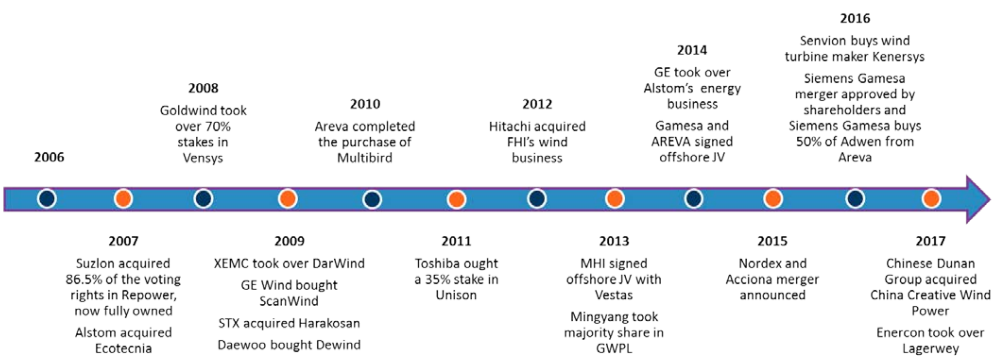


Figure 5
Principales étapes de la consolidation du secteur éolien dans le monde entre 2006 et 2017
Source : FTI Intelligence

L'éclosion du marché californien offrit, outre un débouché nouveau, une opportunité pour les industriels danois de repenser leur organisation interne, leurs réseaux logistiques, leurs capacités d'innovation ainsi que les relations entre donneurs d'ordre et sous-traitants. Compagnies d'assurance et autorités de certification acquirent également une précieuse expertise. L'ensemble des acteurs concernés acquit ainsi un savoir-faire précieux pour commercialiser des biens à la durée de vie de l'ordre de 15-20 ans, nécessitant non-seulement un savoir-faire industriel mais également des compétences dans le secteur de la maintenance et des services.

Le marché mondial de l'éolien devrait croître de l'ordre de 8% d'ici à 2035. Si le marché européen a été jusque-là dynamique, l'essentiel de la croissance est désormais attendu hors d'Europe. Or, Vestas conserve de fortes positions aux États-Unis mais profite peu de la dynamique en Asie, notamment en Chine, marché monopolisé par les producteurs locaux. Selon un responsable de la filière,

> « la Chine n'est pas un concurrent direct mais a contribué à tirer les prix vers le bas car certains donneurs d'ordre ont été tentés par la délocalisation d'une partie des activités de sous-traitance. Conséquence : les sous-traitants ont dû s'adapter en revoyant leurs coûts ou en automatisant leurs activités. Pour autant, les acteurs chinois ont du mal à avoir un rapport qualité/prix juste. En revanche, ils ne laissent entrer que peu de monde sur leur marché ! »

[143] The Taiwanese government has set the target of having 5.5GW offshore wind capacity installed by 2025https://www.windpoweroffshore.com/article/1485802/orsted-northland-win-further-taiwan-capacity
[144] Changhua County Government, the state-run energy company Taipower, the Industrial Technology Research Institute (ITRI) and the National Changhua University of Education (NCUE)
[145] The Taiwanese government has a target of at least 3GW of wind power offshore and 1.2GW onshore by 2025 to help meet its renewable energy target of 20%. The country currently has just 8MW of installed offshore capacity and 682MW onshore. It sourced just 6.5% of its electricity from renewables in 2016https://www.windpoweroffshore.com/article/1456617/orsted-develop-storage-pilot-taiwan

En outre, pour monter en gamme, les acteurs chinois commencent à s'implanter au Danemark. Le fabricant de turbines Shanghai Electric a ainsi installé son centre de R&D européen à Aarhus en 2019, avec un focus sur l'éolien marin. Xiaogang Meng, le responsable du centre a ainsi justifié son choix :

En recherchant une implantation en Europe, le Danemark s'est vite imposé à nous. Il s'agit d'un des principaux hubs technologiques dans notre secteur et son centre est Aarhus. Nous pourrons ici attirer des ingénieurs de qualité et nouer des collaborations avec des partenaires compétents. Dans sa démarche, l'entreprise s'inscrit dans les pas d'Envision Energy, de Goldwind(et de l'indien Suzlon) qui ont tous ouvert des centres de recherche au Danemark. Plus généralement, certains acteurs chinois prennent position

La crise financière de 2008 a conduit à la délocalisation de certaines activités de la filière mais comme l'explique un acteur industriel, « elle a aussi renforcé les liens entre les acteurs du secteur pour trouver des solutions aux problèmes rencontrés par certaines entreprises ». La géographie du secteur pourrait toutefois évoluer.

> « Dans plusieurs pays, une industrie s'est formée en raison d'appels d'offres exigeant un contenu local. Pour bénéficier des subventions, il fallait et il faut encore implanter des activités sur place. Mais que va-t-il se passer le jour où nous serons capables de produire sans aucune subvention ? Nos industriels auront probablement moins besoin de se rapprocher des marchés. Peut-être la géographie de la production est-elle désormais fixée. Tout va se décider désormais en fonction des coûts. Délocaliser permet de réduire les coûts mais cela vous coupe de vos partenaires »[146]

Autre tendance à l'œuvre : la consolidation du secteur. Si en 2015, 69% du marché mondial était détenu par 10 producteurs, d'autres processus de fusion sont envisageables comme l'a démontré la fusion Siemens-Gamesa. Enfin, les producteurs esquissent différentes stratégies sur la chaîne de valeur. GE a fait l'acquisition du principal fabricant danois de pales (LM Wind qui dispose d'une usine à Cherbourg, voir chapitre précédent). Vestas a renforcé son secteur des services en rachetant UpWind Solutions et Availon[147]. Pour l'ensemble de l'industrie, l'éolien marin constitue un précieux relais de croissance (sa part de 3% des installations devrait être multipliée par 24 d'ici à 2032) grâce à une meilleure acceptation sociale, aux vents puissants et réguliers en mer et à la proximité des centres de consommation (plusieurs grandes villes étant situées à proximité des côtes).

Selon un industriel du secteur, « la hiérarchie est désormais fixée. 3 acteurs majeurs devraient rester : Siemens-Gamesa, Vestas, GE. Les sous-traitants doivent mieux s'organiser mais ils sont d'autant mieux armés qu'ils ont accompagné les donneurs d'ordre sur les marchés étrangers. C'est toute la chaîne de valeur qui est globalisée.

L'éolien marin et l'éolien terrestre en sont en effet à 2 stades différents. Si l'éolien terrestre est une industrie mature, l'éolien marin en est encore au stade initial avec de nombreuses incertitudes quant aux normes. Le Danemark ayant – ne serait-ce que par sa géographie – développé d'importants savoir-faire en la matière, il dispose d'un avantage dans la nouvelle phase qui s'ouvre (il était le 3ème plus grand marché pour l'éolien marin en 2019). L'éolien marin qui fournit 1% of de l'électricité en 2014 devrait en produire 9% en 2030[148]. S'agissant des coûts, DONG implantait en 2014 une ferme éolienne en Allemagne sans solliciter de subventions. Les coûts ont été réduits de de 46% au cours des 5 années écoulées et devraient encore diminuer de 26% d'ici à 2035 d'autant que de nouveaux développeurs apparaissent (Statoil, Shell, ENI)[149].

Des PME trop peu innovantes

Dans l'écosystème danois, la structuration de la sous-traitance paraît encore fragile d'autant que les PME participent peu aux projets de recherche. De manière générale, 6% seulement des entreprises du secteur sont investis dans plus d'un projet de R&D. Il est vrai qu'avec la montée en puissance du marché

[146] Entretien avec l'auteur, mai 2019.
[147] REN21 (2016). Renewables 2016: Global Status Report. (Paris: REN21 Secretariat). Pp 79
[148] (Information (2015) Havvindmøller er for alvor på vej op i omdrejninger. At: https://www .information.dk/indland/2015/03/havmoellerne-alvor-paa-vej-omdrejninger
[149] Bloomberg Energy Finance (2017). Big Oil Replaces Rigs with Wind Turbines. At: https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-03-23/oil-majors-take-a-plunge-in-industry-that- may-hurt-fossil-fuel

de l'éolien terrestre et marin dans le monde, le contexte local joue un rôle de plus en plus modeste pour les entreprises danoises du secteur. L'enjeu est désormais de structurer des chaînes de valeur sur différents points du monde, d'autant plus activement que de nombreux pays intègrent dans leurs appels d'offre des exigences en matière de contenu local.

Le Danemark peine à constituer des licornes (start-ups de plus d'1 milliards USD. Aucune entreprise danoise fondée après 2000 n'a atteint la barre des 1 000 salariés (Gouvernement danois, 2017). Une forte dépendance s'est installée entre les donneurs d'ordre (au premier chef desquels Vestas et Siemens-Gamesa) et les sous-traitants dont tous ne sont pas parvenus à s'autonomiser. À l'heure où l'industrie de l'éolien connaît une mue similaire à celle que traversa l'industrie automobile, à savoir une modularisation qui implique la constitution de plateformes et de sous-ensembles venant composer chaque éolienne, la montée en gamme des sous-traitants s'impose.

Elle implique notamment une internationalisation de ces derniers afin qu'ils puissent être associés aux projets des donneurs d'ordre sur les marchés asiatiques (Houman Andersen Poul & Ina Drejer, 2012). Il est vrai néanmoins que chaque parc étant spécifique, la production en masse d'éoliennes ayant toutes les mêmes caractéristiques principales (à l'image des automobiles) n'est pas le scénario le plus probable à court-terme. Or, 16% seulement des PME participent à un projet de recherche et 6% seulement à plus d'un projet faisant d'elles « *la pièce manquante du puzzle* » (Megawind, 2015).

L'une des raisons serait le manque de soutien apporté par la puissance publique aux activités de maintenance qui sont un des domaines où les PME sont les plus présentes. Il reste que les pressions émanant des donneurs d'ordre devraient s'accroître. La généralisation des appels d'offres a en effet permis une forte réduction des coûts mais a aussi, par conséquent, rendu plus féroce la compétition entre les différents acteurs, l'innovation s'imposant désormais à tous les niveaux pour conserver des marges suffisantes sur chaque projet.

Innover s'impose néanmoins d'autant plus que la partie électronique gagne en importance pour accroître l'efficacité des parcs éoliens. De ce point de vue, GE est déjà très investi à travers ses autres activités dans le *machine learning*, la gestion de données, l'internet des objets, ce qui peut lui permettre de gagner en compétitivité en matière de maintenance et de valorisation des vents.

S'adapter à la baisse des coûts

Le coût actualisé de l'éolien (LCOE) ne cesse de diminuer à travers le monde (il a baissé de 80% au cours des 20 années écoulées) et est une des sources d'énergie les plus compétitives si l'on prend en compte le coût du carbone. Un responsable du Ministère danois de l'énergie esquisse le scénario probable pour l'éolien marin :

> « nous allons rapidement généraliser le zéro subvention puis nous allons nous préparer à un autre modèle économique, celui qui prévoit que l'investisseur paie pour installer des éoliennes. La mer fait partie du domaine public. En réserver une partie pour réaliser des profits implique que la collectivité soit rémunérée ».

Dans l'éolien marin, des gisements d'économie existent encore pour réduire les coûts : éoliennes plus grandes, meilleures connexions avec la terre ferme, fondations mieux adaptées aux particularités des éoliennes, réduction des coûts de production. Enfin, le marché intérieur offre moins d'opportunités que naguère. Un nouveau gouvernement mis en place en 2015 plaida ainsi en faveur d'un « réalisme vert » pour réduire les ambitions du pays en matière d'énergies renouvelables.

Après de vives protestations provenant des milieux académiques et industriels, le gouvernement revint à des objectifs plus ambitieux mais plus que jamais l'internationalisation et la réduction des coûts s'imposent en raison de l'étroitesse du marché intérieur et de la montée en puissance de concurrents asiatiques. Autant de défis qui exigeront de notables capacités d'adaptation. Les responsables de Wind Denmark identifient plusieurs autres défis pour l'ensemble de l'industrie :

> « - À terme, les acteurs ne pourront plus être mono-énergie. Ils devront être capables de proposer à la fois de l'éolien et du PV. Il s'agira de proposer des systèmes hybrides, associant éolien, solaire et stockage par exemple. Nous encourageons nos sous-traitants à apprendre à servir à la fois l'éolien et le solaire, ce qui n'est pas toujours facile

> - Un autre grand problème est celui du transport de l'électricité vers les côtes. À mesure que les éoliennes marines deviennent plus puissantes, ce problème devient plus pressant. Peut-on vraiment résoudre ce problème avec toujours plus de câbles ?
>
> - Enfin, en termes de market design, la grande incertitude concerne les prix du marché. À ce jour, les prix sont fixés par le charbon, le gaz. À l'avenir, pour quelle activité les producteurs seront-ils rémunérés ? Pour équilibrer le réseau ? »

Il reste que si le Danemark fut dans les années 70 confronté à un choix entre le nucléaire et l'éolien, il est aujourd'hui parvenu à s'imposer dans un secteur dynamique appelé à connaître une forte croissance et dont l'emploi, le milieu académique comme les exportations sont appelés à profiter durablement.

Conclusion

Une concentration de production d'électricité à base d'éolien marin s'est constituée en mer du Nord, incarnée à la fois par de nombreuses fermes éoliennes (90% des installations déployées dans le monde s'y trouvent) et par des capacités de production manufacturière. Le Danemark constitue un des piliers de cet espace centré sur la mer du Nord. En 2015, l'énergie éolienne y couvrait 42% des besoins du pays en électricité, voire 100% certains jours. Le turbinier Vestas, l'entreprise de services Orsted sont leaders mondiaux dans leur secteur et un écosystème s'est constitué à partir des années 70 qui abrite environ 30 000 emplois et assure 5% des exportations du pays. Peuplé de 5 millions d'habitants, le Danemark a pu en l'espace de 3 décennies non seulement transformer son mix énergétique au profit de l'éolien (même si le charbon y conserve encore un rôle important) mais surtout constituer une filière qui s'impose aujourd'hui sur les marchés européens comme aux États-Unis et en Asie.

Loin de découler d'une autorité centralisée, les innovations ont beaucoup dû au hasard ou du moins à des rencontres entre pionniers. Loin de répondre à un schéma structuré et pensé a priori, l'émergence de l'écosystème a suivi une trajectoire non-linéaire forgée par des rencontres, des opportunités (comme la forte demande momentanée sur le marché californien). L'écosystème danois ne doit son succès ni à une politique publique pensée sur le long terme, ni à des conditions favorables apparues à un moment donné sur le marché mais plutôt à une série d'initiatives non coordonnées.

Les innovations ont toutefois peu à peu fourni la chair d'un projet industriel qui grâce à des politiques publiques affirmées, s'exporte largement en Europe et hors d'Europe. Le Danemark diffère ici de celui de l'Allemagne. L'Allemagne a une tradition ancienne dans les renouvelables mais ses ambitions se sont affirmées dans le contexte de l'abandon du nucléaire. En revanche, dans le cas du Danemark, les renouvelables ont été considérées comme une ressource privilégiée dès le choc pétrolier et dans le contexte de fortes réticences de la part de la population à l'égard du développement d'une filière nucléaire. En somme, quand la France a répondu au choc pétrolier par la constitution d'un vaste parc nucléaire, le Danemark a, lui, envisagé la même option avant de préférer, sous la pression de l'opinion publique, les énergies renouvelables. Avec le succès industriel que l'on sait.

Références

Anker, H.T., Jørgensen, M.L., 2015. Mapping of the legal framework for siting of wind turbines – Denmark. Copenhagen.

Beise, M., 2004, « Lead markets: country-specific drivers of the global diffusion of innovations », *Res. Policy* 33 (6–7), pp. 997–1018.

Beuse, E. (2000) Grundtvig køber vindmølleanlæg, in: E. Beuse et al. (Eds) Vedvarende Energi i Danmark 1975 – 2000 [Renewable Energy in Denmark 1975 – 2000], pp. 83 – 88 (Aarhus :Organization for Renewable Energy). Available at: http://www.ove.org

Bidwell, D., 2013. The role of values in public beliefs and attitudes towards commercial wind energy. Energy Policy 58,

Brachert Matthias, Hornych Christoph, Franz Peter Franz, 2013, « Regions as Selection Environments? The Emergence of the Solar Industry in Germany from 1992 to 2008 », *European Planning Studies*, 21:11, pp. 1820-1837.

Brown, J. S. & Duguid, P. (2000) The Social Life of Information (Boston, MA: Harvard Business School Press). Callon, M. (1991) Techno-economic networks and irreversibility, in: J. Law (Ed.) A Sociology of Monsters:Essays on Power, Technology and Domination, pp. 132–161 (London: Routledge).

Callon, M. (1998) Introduction—the embeddedness of economic markets in economics, in: M. Callon (Ed.) The Laws of the Markets, pp. 1–57 (Oxford: Blackwell Publishers).

Callon, M., Lascumes, P. & Barthe, Y. (2009) Acting in an Uncertain World—An Essay on Technological Democracy (Cambridge MA: MIT Press).

Cohen, M., March, J. & Olsen, J. (1972) A garbage can model of organization choice, Administrative Science Quarterly, 17(1–25), p. 2.

Cowell, R., Bristow, G., Munday, M., 2011. Acceptance, acceptability and environmental justice: the role of community benefits in wind energy development. J. Environ. Plan. Manag. 54 (4),

Garud, R. & Karnoe, P. (2001) Path creation as a process of mindful deviation, in: R. Garud & P. Karnøe (Eds) Path Dependence and Creation, pp. 1–39 (Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates).

Garud, R. & Karnoe, P. (2003) Bricolage versus breakthrough: Distributed and embedded agency in technological entrepreneurship, Research Policy, 32, pp. 277–300.

Garud, R., Kumaraswamy, A. & Karnøe, P. (2010) Path dependence or path creation, Journal of Managemen tStudies, 47(4), pp. 760–774.

Gertler, M. S. (2010) Rules of the game: The place of institutions in regional economic change, Regional Studies, 44, pp. 1–15.

Gipe, P. (1995) Wind Energy omes of Age (New York: Wiley).

Gouvernement danois (2017), (The Danish Government (2017). Redegørelse om vækst og konkurrenceevne 2017. Pp 91.in : The Danish Wind Cluster The Microeconomics of Competiveness).

Hall, P. and Soskice, D., Editors (2001): Varieties of Capitalism: The Institutional Foundations of Comparative Adavantage. Oxford University Press, Oxford.

Hansen, J. L. (1985) Samarbejde med Folketinget på sidelinjen, Naturlig Energi, 9, p. 7.

Hargadon, A. B. & Douglas, Y. (2001) When innovations meet institutions: Edison and the design of the electric light, Administrative Science Quarterly, 46(3), pp. 476–501.

Hernes, T. (2007) Understanding Organization as Process—Theory for a Tangled World (London: Routledge). Iammarino, S. & McCann, P. (2006) The structure and evolution of industrial clusters: Transactions, technology and knowledge spillovers, Research Policy, 35, pp. 1018–1036.

Houman Andersen Poul & Ina Drejer (2012). *Denmark – the wind power hub: Transforming the supply chain* pp 67-69.

Isaksen, A. & Hauge, E. (2002) Regional Clusters in Europe. Observatory of European SMEs Report 2002, No. 3(Luxembourg: European Communities).

Jacobsson, S. & Bergek, A. (2003) Transforming the Energy Sector: The Evolution of Technological Systems in Renewable Energy Technology, in: J. Klaus, B. Manfred & W. Anna (Eds) Governance for

Industrial Transformation. Proceedings of the 2003 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environ- mental Change, pp. 208–236 (Berlin: Environmental Policy Research Centre).

Jänicke, M., Jacob, K., 2004, « Lead markets for environmental innovations: a new role for the nation state », *Glob. Environ. Polit.* 4(1), 29–47.

Jensen, I. K. (2003) Mænd i Modvind - et dansk industrieventyr (København: Børsens Forlag).

Karnøe, P. and Garud, R. (2012), 'Path Creation: Co-Creation of Heterogeneous Resources in the Emergence of the Danish Wind Turbine Cluster', European Planning Studies, 20, 733-752.

Kristensen & P.H. Andersen (Eds) Mobilizing Resources and Generating Competencies: The Remarkable Success of Small and Medium Sized Enterprises in the Danish Business System, pp. 7–66 (Copenhagen: Copenhagen Business School Press).

Kenworthy, L. (2006), 'Institutional Coherence and Macroeconomic Performance', Socio- Economic Review, 4, 69-91.

Kemp, R., Rip, A. & Schot, J. (2001) Constructing transition paths through the management of niches, in: R. Garud & P. Karnøe (Eds) Path Dependence and Creation, pp. 269–302 (Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates).

Krohn Soren, 2002, Danish Wind Turbines : An Industrial Success Story, www.windpower.org, Février. Langlois, R. (1992) External economies and economic progress: The case of the microcomputer industry. Business History Review, 66, pp. 1–50.

Grune Susann, Heilmann Sebastian, 2012, « Deutsch-Chinesische Technologiekooperation », *China Analysis*, 99, décembre.

Janser Markus, Lehmer Florian, Möller Joachim, 2015, « Beschäftigungswirkungen der Energiewende - ein Überblick », in: Lemb W (Dir.), *Welche Industrie wollen wir? Nachhaltig produzieren - zukunftsorientiert wachsen*, Frankfurt am Main: Campus Verlag, pp. 193-214.

Karnøe Peter & Garud Raghu (2012) Path Creation: Co-creation of Heterogeneous Resources in the Emergence of the Danish Wind Turbine Cluster, European Planning Studies, 20:5, 733-752,

Klepper, S. (1996), 'Entry, Exit, Growth, and Innovation over the Product Life Cycle', American Economic Review, 86, 562-583.

Krohn Soren, 2002, Danish Wind Turbines: An Industrial Success Story, Danish Wind Industry Association, February.

Menzel Max-Peter, Kammer Johannes, 2017, « Industry Evolution in Varieties of Capitalism: a Comparison of the Danish and US Wind Turbine Industries », *Papers in Evolutionary Economic Geography*, 17.16, Utrecht University, 8 juin.

Menzel Max-Peter, Markus Adrian, 2018, « Modularisation and spatial dynamics in the wind turbine industry: the example of firm relocations to Hamburg », *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 11, pp. 297–315.

Meyer, N. I., 2000, Politik og Vedvarende Energi, in: E. Beuse et al. (Eds) Vedvarende Energi i Danmark 1975 – 2000 (Renewable Energy in Denmark1975–2000), pp. 75–110 (Aarhus: Organization for Renewable Energy), Available at http://www.ove.org

Møller, T.,(1978, Vinden Vender Andelsforlaget Vistoft (Knebel: Cooperative publisher Vistoft).

Nelson, R. R., 2002, 'Bringing Institutions into Evolutionary Growth Theory', Journal of Evolutionary

Storper, M.; Walker, R., 1989, *The Capitalist Imperative – Territory, Technology, and Industrial Growth*, Basil Blackwell: New York.

Chapitre 4. Structuration des filières de la transition énergétique en Allemagne

Gilles Lepesant

Introduction

D'ici à 2020 les autorités allemandes se sont fixées pour objectif de réduire les émissions de GES de 40% par rapport à 1990, un objectif ambitieux (la France a affiché le même objectif mais à l'horizon 2030) et reconnu comme hors de portée en juin 2018 (pour être ramené à 32%)[150]. Tout progrès significatif en la matière implique une sortie du charbon en raison des difficultés à réduire la part des autres secteurs, notamment celle des transports et du bâtiment. En 2017, le charbon était responsable de 80% des émissions du secteur électrique, lequel contribue à hauteur du tiers des émissions de l'Allemagne (Ministère allemand de l'économie et de l'énergie, 2018).

Sans que le scénario de sortie du charbon ait été encore écrit, la part de ce dernier recule régulièrement. En 2017, 37% de l'électricité consommée était produite à partir de charbon, ce chiffre était de 57% en 1990, de 40% en 2016. À l'inverse, la part des EnR[151] dans la production d'électricité qui était de 4% en 1990 est passée à 33% en 2017. Le processus de décarbonisation leur confère un rôle d'autant plus important que la part de l'énergie nucléaire est appelée à se réduire pour disparaître en 2022. Elle générait 28% de l'électricité produite en 1990, 12% en 2017[152].

Le rôle des différentes EnR est cependant très varié et leur part dans le mix énergétique se reflète dans les emplois créés. Sur les 651 TWh produits en 2016, l'éolien terrestre en produisit 68, l'éolien marin 12, la biomasse 45, le photovoltaïque 38, l'hydro-électricité 21, les déchets ménagers 6[153]. S'agissant de l'emploi, sur les 338 500 emplois recensés dans le secteur des énergies renouvelables en 2016, 160 200 se trouvaient dans l'éolien (133 000 dans l'éolien terrestre, 27 200 dans l'éolien marin[154]), 105 600 dans les bioénergies, 45 200 dans le photovoltaïque (Ulrich, 2018).

Dans le contexte d'une réduction de la part du charbon et du nucléaire, l'un des enjeux de la montée en puissance des EnR est précisément celui de l'emploi. Les créations d'emplois induites par le développement des EnR peuvent-elles à terme compenser voire dépasser les pertes dues au déclin concomitant du nucléaire (8 000 emplois directs) et du charbon (30 000 emplois directs)[155] ? L'autre enjeu est celui de l'innovation. Les objectifs ambitieux portés par les autorités invitent-elles à envisager la constitution en Allemagne de filières innovantes et exportatrices, notamment dans l'éolien et le photovoltaïque ?

S'agissant de la filière photovoltaïque, l'Allemagne est l'exemple d'un pays ayant soutenu massivement le déploiement d'une technologie en escomptant des bénéfices à la fois environnementaux et industriels. Ces derniers furent manifestes dans un premier temps avant que la filière ne s'effondre face à la concurrence chinoise. Dans le contexte de mutations technologiques à venir, la question est de savoir si les industriels allemands pourront retrouver grâce aux efforts engagés en R&D un rôle sur le marché allemand et international.

S'agissant de la filière éolienne, l'Allemagne est parvenue à constituer une base industrielle sur la base de ses compétences dans des secteurs préexistants (mécanique par exemple). La remise en cause des tarifs d'achat généreux en Europe, aux États-Unis comme en Chine constitue néanmoins un défi pour l'industrie. Si la mise en œuvre d'appels d'offre en Europe a permis une baisse sensible des coûts pour le consommateur, il n'est pas exclu qu'elle fragilise à terme la filière. Une consolidation du secteur a déjà débuté sur fond d'innovations et de réduction des coûts de production.

---

[150] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), *Klimaschutzbericht 2017 zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung*, Berlin, juin 2018.
[151] Énergies renouvelables.
[152] Office allemand des statistiques, https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Energie.html. Consulté le 10 juin 2018.
[153] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, https://www.ag-energiebilanzen.de/, consulté le 21 juin 2018.
[154] Bundesvervand Windenergie, https://www.wind-energie.de/infocenter/statistiken/deutschland/beschaftigte-der-windindustrie. Consulté le 12 juin 2018.
[155] Ce chiffre inclut les personnels en poste dans les mines et dans les centrales thermiques. S'agissant du seul charbon, la répartition géographique des personnels était en 2018 la suivante : 9 916 en Rhénanie, 8 520 en Lusace, 2 345 en Allemagne centrale, 122 à Helmstedt.

1. Les défis industriels généraux de la transition énergétique allemande

La mutation à l'œuvre est d'autant plus profonde que le changement de mix énergétique n'est qu'une composante de la transformation à l'œuvre. Il convient d'y ajouter la numérisation du secteur, la libéralisation, la montée en puissance de l'énergie citoyenne, autant de facteurs invitant à assimiler la transition énergétique à une transformation plus globale de l'économie.

Après avoir durant plusieurs années critiqué la transition énergétique en raison de ses incidences supposées sur la compétitivité du pays, le secteur de l'industrie a en Allemagne peu à peu reconnu les opportunités qu'elle induit. L'industrie a il est vrai bénéficié d'une forte baisse des prix de gros de l'électricité rendue possible par la production issue des énergies renouvelables, lesquelles ont été financées pour l'essentiel par les particuliers. Une nuance s'impose pour les PME. Celles-ci n'ayant pas bénéficié des exonérations accordées aux grandes entreprises, elles ont probablement moins bénéficié de la baisse des prix de l'énergie au cours des années passées. En outre, les exonérations dont bénéficient les grandes entreprises furent revues à la baisse en 2014, notamment dans le secteur métallurgique. La compétitivité de l'industrie allemande, notamment de l'industrie allemande, s'en est ressentie[156]. Autre sujet de satisfaction pour l'industrie, les différents métiers relevant de la transition ont enregistré une forte croissance en emplois (voir ci-après). Ce constat ne doit cependant pas en occulter un autre : les perdants de la transition sont également nombreux.

Les « *utilities* » qui n'ont perçu que tardivement les enjeux de la transition en font partie. RWE comme E.ON ont ainsi perdu plusieurs milliers d'emplois, ont séparé leurs activités avant de les réorganiser en 2018 dans le cadre d'une architecture qui rompt avec le modèle d'intégration verticale adopté par la plupart des acteurs de l'industrie depuis l'après-guerre[157]. À l'instar de la plupart des autres entreprises énergétiques dans le monde, les *utilities* allemandes sont confrontées d'une part au rétrécissement de leurs marchés traditionnels dû à une stabilisation voire à une baisse de la consommation, d'autre part à la montée en puissance des énergies renouvelables. En conséquence, des réorganisations ont été initiées dont les conséquences en termes d'emplois ne sont pas encore toutes connues. Dans le contexte de son rachat d'Innogy, E.ON annonça ainsi en 2018 la disparition de 5 000 emplois soit une réduction de 7% de ses effectifs globaux[158].

Autre perdant : le nucléaire, dont la disparition en Allemagne est actée pour 2022. 17 réacteurs étaient en fonctionnement en 2011 et produisaient le quart de l'électricité du pays. En 2017, 7 réacteurs produisaient 12% de l'électricité. Environ 8 000 personnes travailleraient dans les centrales et 32 000 emplois indirects seraient en jeu (recherche, sous-traitance, services) (DIW Econ, 2015 ; DAtF 2011). En dépit de la sortie programmée du nucléaire, l'essentiel de ces emplois seraient préservés pour faire face aux défis du démantèlement (Blöcker, 2012) au moins pour 20 à 30 ans (GWEC et al. 2012,). Certaines *utilities* s'emploient par ailleurs à valoriser leur savoir-faire en matière de démantèlement de centrales nucléaires. La concurrence est néanmoins forte dans cette filière (avec par exemple Orano, Bechtel, Aecom, Fluor) mais selon l'AIE (Agence internationale de l'énergie), environ 150 GW, soit le tiers des capacités installées dans le monde, doivent être retirés du marché d'ici à 2040, dont 40% en Europe.

Le déclin du charbon devrait également se traduire par des pertes d'effectifs. Les centrales thermiques n'ont en effet pas repris au nucléaire les parts de marché abandonnées par ce dernier. Certes, dans un premier temps, la part du charbon a augmenté au cours des années qui ont suivi la sortie du marché de 8 des 16 réacteurs allemands (2011) mais depuis 2014, sa part décline. Au final, le charbon (lignite inclus) comptait en 1990 pour 56,7% de la production d'électricité, le nucléaire pour 27,7%, les renouvelables pour 3,6% ; en 2017, ces chiffres étaient respectivement de 36,6%, 11,7% et 33,3%[159]. En somme, la progression des renouvelables permet de compenser à la fois la réduction de la part du nucléaire et de celle du charbon même si des centrales thermiques nouvelles sont toujours mises sur le marché afin de remplacer une partie de celles démantelées. Mise en place en 2018, la Commission

[156] En 2015, Matthias Wissmann, président de l'Association allemande de l'automobile (VDA) déclarait ainsi : « en raison des prix élevés de l'électricité, certaines entreprises réorientent leurs investissements à l'étrangers. À long-terme, les conséquences sur l'emploi seront négatives ». In : Paul Hockenos, « Jobs won, jobs lost – how the Energiewende is transforming the labour market », 30 mars 2015, https://www.cleanenergywire.org/dossiers/energy-transitions-effect-jobs-and-business, Consulté le 1.06.2018.
[157] Arash Massoudi, Tobias Buck, « Eon to acquire Innogy in €43bn deal with RWE », *Financial Times*, 10 mars 2018.
[158] Tobias Buck, « Eon to cut 5,000 jobs after Innogy takeover », *Financial Times*, 13 mars 2018.
[159] Stromerzeugung nach Energieträgern 1990 – 2017, AG Energibilanz AG. https://www.ag-energiebilanzen.de/. Consulté le 20 juin 2018.

chargée de la sortie du charbon[160] rassemble des approches si diverses voire opposées qu'il serait prématuré de voir en elle l'annonce d'une fin rapide de cette énergie fossile. La difficulté d'aboutir à un consensus peut surprendre tant la transition paraît déjà largement engagée. Le nombre d'emplois désormais concernés par le déclin du charbon est en effet modeste au regard de ce qu'il était 20 ans plus tôt. Dans les faits, l'essentiel de la restructuration est passé.

Le charbon et le lignite emploient dans les mines et dans les centrales thermiques moins de 30 000 personnes (20 000 personnes dans le charbon dont 9 000 dans le bassin rhénan, 8 000 dans le lignite, notamment en Lusace). Même si ces chiffres ne sont pas à négliger (54 000 emplois indirects seraient à ajouter), la réduction des effectifs est déjà bien amorcée en 2018. Ces 2 secteurs abritaient en effet plus de 80 000 emplois directs en 2000. Leur part par rapport à l'emploi total est désormais faible (Wörlen et al., 2017), même si les salaires élevés, une forte identité socio-professionnelle et une concentration spatiale des effectifs ne sont pas étrangers à la mobilisation des organisations représentatives. Des crises locales dans les bassins miniers ne sont pas à exclure mais la pyramide des âges devrait faciliter la transition, 40% des mineurs ayant en 2011 plus de 50 ans. Selon l'Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), le scénario d'une sortie du charbon d'ici à 2030[161] implique que soient remplacés 3 900 emplois dans le bassin de la Lusace (Brandebourg et Saxe) et 4 500 emplois dans le bassin du Rhin. En effet, sur les 8 000 emplois recensés en Lusace, la moitié devrait disparaître d'ici à 2030 en raison des nombreux départs à la retraite et les 9 400 emplois actuels dans le bassin rhénan devrait être réduits à 4 500 (Heinbach et al., 2017). Sans oublier les créations d'emplois induites par la sortie du charbon, notamment pour la remise en état des terrains (l'agence compétente - LMBV GmbH - employait environ 700 personnes en 2017).

Plus globalement, les pertes enregistrées dans les *utilities* et dans le secteur du charbon ont été compensées par les créations d'emplois liées à la transition énergétique. Au cours de la décennie passée (2010 et 2016), les effectifs du secteur de l'énergie ont en effet légèrement augmenté (O'Sullivan, 2018), une tendance qui occulte une forte variation dans le secteur photovoltaïque, une décrue dans les énergies conventionnelles et une forte hausse dans les secteurs de la distribution. Au final, le secteur de l'énergie comptait 700 000 emplois en 2018 dont près de la moitié dans les EnR. Le secteur de l'éolien comptait ainsi en 2018 5 fois plus de salariés que le secteur minier alors qu'il en comptait 3 fois moins en 2000. L'Allemagne avait en 2018 autant d'emplois (160 000) dans ce secteur que les 10 autres pays européens les mieux pourvus en la matière (Ulrich et al., 2018). Loin d'être cantonnés aux régions du nord, les effectifs sont dispersés dans plusieurs régions (la Basse Saxe, la Rhénanie du Nord-Westphalie, la Saxe-Anhalt sont ici privilégiés) et leur nombre progresse dans quasiment tous les *Länder* grâce aux bénéfices d'une chaîne de valeur étendue à une large partie du pays (cf. supra).

S'agissant du photovoltaïque, la situation diffère sensiblement. L'année de référence fut 2011 lorsque le secteur employait 140 000 personnes mais les effectifs ont chuté depuis, pour se limiter à 45 000 en 2016. D'une part, les capacités installées chaque année ont diminué au gré des révisions à la baisse des tarifs d'achat (1.75 GW en 2017, 7,6 GW en 2012). D'autre part, le secteur manufacturier a périclité face à la concurrence asiatique, notamment chinoise (voir ci-après). Le chiffre d'affaires tripla entre 2007 (€4.4 milliards) et 2011 (€13.3 milliards) avant que les leaders du secteur se voient marginalisés (SolarWorld[162], Q-Cells par exemple) et que le secteur perde 40 000 emplois en une seule année (100 000 emplois en 2012, 60 000 en novembre 2013). Dans le même temps, l'industrie éolienne végétait, victime de lacunes technologiques, de la faiblesse de ses modèles économiques et de contraintes règlementaires. 100 MW seulement furent ainsi installés en 2011. Depuis, l'éolien terrestre comme l'éolien marin ont connu une croissance spectaculaire, à l'inverse du photovoltaïque.
Au final, le bilan en termes d'emplois de la transition énergétique allemande ne peut être que provisoire. En 2018, le constat qui s'impose est que les gains ont approximativement équilibré les pertes. Le secteur énergétique devant approximativement réduire de moitié ses émissions d'ici à 2030 (par rapport à 2014)

[160] Rassemblant des représentants des Ministères fédéraux, des *Länder*, d'ONG et de la communauté scientifique, cette Commission a le calendrier suivant : octobre 2018 : émission de recommandations socio-économiques préliminaires aux régions minières ; décembre 2018 : émission de recommandations pour atteindre autant que possible les objectifs 2020 avant la COP24 ; fin 2018 : remise d'un rapport final au gouvernement comportant la date de sortie du charbon.
[161] Pour atteindre les objectifs consignés dans l'Accord de Paris, l'Allemagne devrait abandonner le charbon d'ici à 2030 et laisser dans le sous-sol 60% de la ressource déjà autorisée à être prelevée.
[162] En 2017, Solarword avait déposé le bilan une première fois, avant de bénéficier d'un investissement du Qatar. Invoquant une chute des prix sur le marché, l'entreprise a de nouveau déclaré faillite en mars 2018 et son effectif est passé en un an de 3 300 employés à 600. http://www.dw.com/en/germanys-solarworld-files-for-bankruptcy-again/a-43166235. Consulté le 2 juin 2018.

et le coût des EnR diminuant, la création d'emplois dans les EnR devrait se poursuivre. Dans le contexte des progrès du numérique, de la décentralisation, le tissu industriel s'enrichit en outre de nouveaux acteurs, de start-ups comme Thermondo (installation de systèmes de chauffage chez les particuliers), créée en 2012 et abritant déjà 300 salariés en 2018. L'institut Borderstep et l'Université d'Oldenburg (Trautwein, 2018) estiment que 81% des 170 000 starts-up relevant de l'économie verte créées entre 2008 et 2013 développaient des activités dans le secteur des énergies renouvelables, l'efficacité énergétique ou la lutte contre le réchauffement climatique. Selon l'Institute for Economic Structures Research (GWS), l'industrie des énergies renouvelables devrait d'ici à 2020 contribuer à hauteur de 37 milliards € chaque année au PIB et 120 000 emplois supplémentaires auront été créés grâce à la transition énergétique. En outre, les postes créés exigent davantage de qualifications que le secteur des énergies conventionnelles et sont mieux rémunérés (Janser et al., 2015). L'industrie des énergies renouvelables pourrait compter entre 500 000 et 600 000 emplois d'ici à 2020, la plupart relevant de l'éolien terrestre auxquels il conviendrait d'ajouter 250 000 emplois dans le secteur de l'efficacité énergétique.

D'un autre côté, la crise d'adaptation des *utilities* n'est pas terminée (fig. 5) et la recomposition en cours devrait se traduire par d'autres pertes d'emplois.

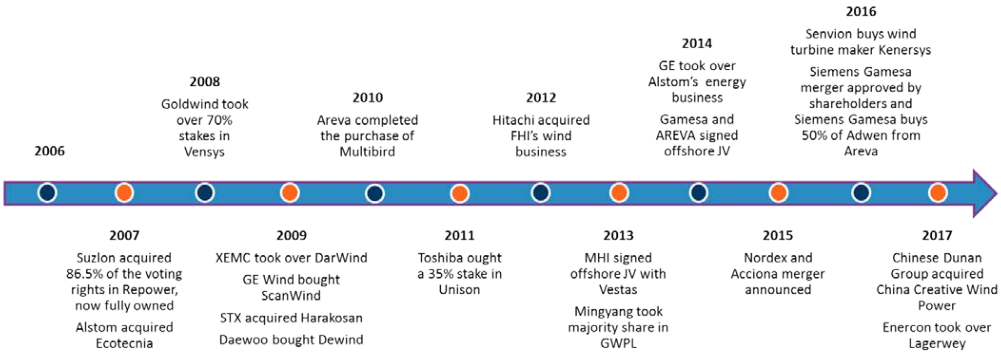


Figure 5
Principales étapes de la consolidation du secteur éolien dans le monde entre 2006 et 2017
Source : FTI Intelligence

De même, l'industrie manufacturière relevant des énergies fossiles subit les chutes enregistrées dans les commandes de centrales (notamment au gaz) et l'emploi risque, ici également, de subir les conséquences de la redéfinition des périmètres industriels[163]. Enfin, dans le secteur de la mobilité, 600 000 emplois dépendent de la technologie du moteur thermique[164] et la montée en puissance du moteur électrique, lequel requiert moins de pièces détachées et d'heures de travail, annonce une nouvelle phase d'adaptation. En 2018, dresser un bilan de la transition en termes d'emplois s'avère donc prématuré d'autant que même dans les filières du photovoltaïque et de l'éolien, les perspectives demeurent incertaines.

2. Une filière éolienne dynamique, en quête de relais de croissance

Une filière éolienne dynamique

La filière éolienne a connu une croissance mondiale forte depuis les années 90, notamment entre 2000 et 2017, la puissance installée chaque année passant entre ces 2 dates de 6,5 GW à 52,4 GW.

Dynamique, la croissance de la filière éolienne dans le monde connaît néanmoins des phases de ralentissement, voire de baisse (entre 2012 et 2013 par exemple, cf. fig. 2). Entre 2017 et 2016, le nombre d'installations a ainsi diminué de 5%, un coup d'arrêt imputable principalement à la Chine, l'Europe ayant pour sa part connu une année record (16 GW installés soit une croissance de 16% en une année). Le marché européen s'annonce porteur pour les années à venir, l'objectif d'une part de 20% des EnR dans le mix énergétique pour 2020 ayant été porté par l'UE à 32% pour 2030.

L'éolien marin confirme son rôle de relais de croissance (fig. 1). Les installations dans cette filière ont été multipliées par 2 entre 2016 et 2017, grâce notamment aux nombreux projets britanniques et

[163] Ed Crooks, Patrick McGee, « GE and Siemens: power pioneers flying too far from the sun », *Financial Times*, 12 novembre 2017.
[164] Institute for Economic Research (ifo)

allemands et la Chine investit également massivement dans cette filière. Globalement, la généralisation des appels d'offre a certes induit des incertitudes mais a provoqué une forte chute des coûts avec un nouveau record établi cette fois-ci au Mexique (18,68 USD/MWh pour un projet terrestre).

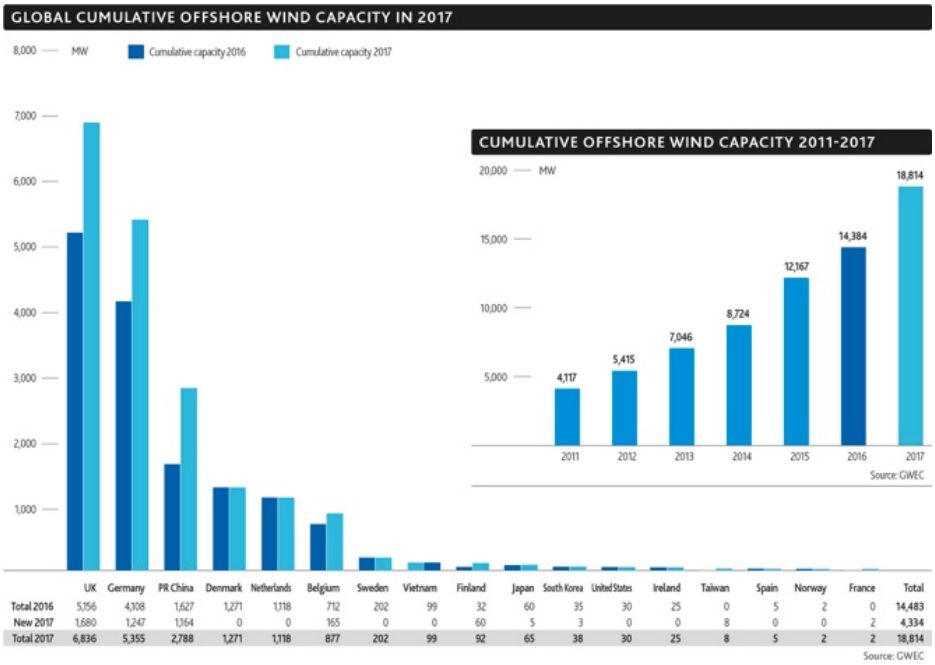


Figure 1
Capacités installées dans l'éolien marin.
Source : GWEC

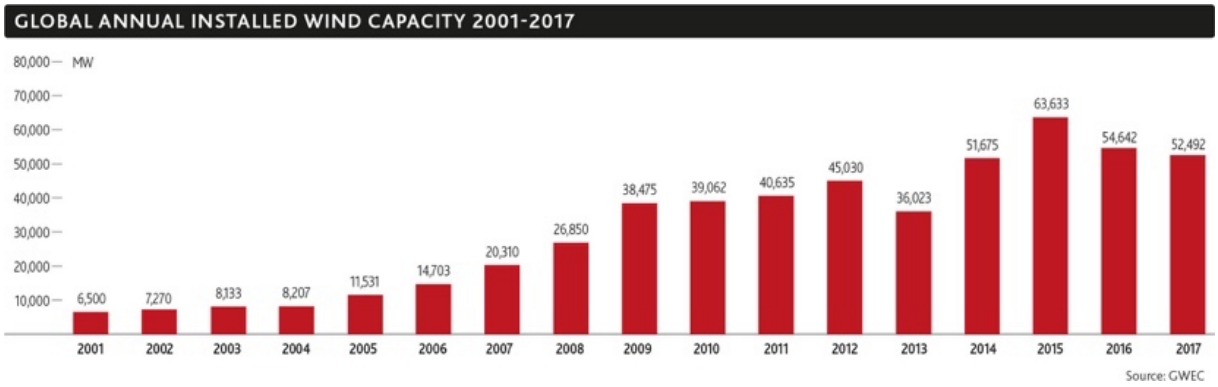


Figure 2
Capacités installées dans l'éolien entre 2001 et 2017
Source : GWEC.

Même dynamique en Europe dans l'éolien marin, notamment au Royaume-Uni où le second appel d'offres dans le cadre du Contracts for Difference ("CfD") a vu le prix tomber à 57.50 GBP/MWh, soit un prix deux fois inférieur à celui observé lors du premier appel d'offres CfD de 2015[165]. En Allemagne et aux Pays-Bas, 2 appels d'offre ont vu des candidats l'emporter sans solliciter la moindre subvention, il est vrai pour des projets disposant d'infrastructures de raccordement déjà prises en charge par la puissance publique.

Dans le seul cas de l'Allemagne, 2017 fut une nouvelle année record avec 1 792 éoliennes installées sur terre et 222 en mer. À la fin de l'année, 28 675 éoliennes terrestres et 1 169 éoliennes marines contribuaient ainsi à 16,2 % de la production allemande d'électricité. L'introduction d'appels d'offres permet à la puissance publique de contrôler les volumes déployés dans un contexte où la croissance des

[165] FTI Consulting, « Global Wind Market Update – Demand & Supply 2017 », https://www.fticonsulting.com/about/newsroom/press-releases/vestas-holds-the-top-spot-in-global-wind-turbine-supplier-ranking-in-2017, Consulté le 23 juin 2018.

capacités installées tend à dépasser les ambitions politiques (4,4 GW installés en 2014, 3,6 GW en 2015 contre un objectif gouvernemental pour ces 2 années de 2,5 GW). Conséquence : le réseau apparaît sous-dimensionné dans certaines régions du nord de l'Allemagne. Les modifications apportées à la loi sur la transition énergétique (EEG) en 2017 ont par conséquent fixé des seuils de développement pour les régions concernées. Pour l'ensemble du pays, un seuil de 2,8 GW a été fixé pour 3 ans, relevé à 2,9 GW pour la suite pour l'éolien terrestre. S'agissant de l'éolien marin, un seuil de 500 MW a été fixé pour 2021 et 2022, un seuil relevé à 700 MW/an entre 2023 et 2025 puis à 840 MW entre 2026 et 2030[166]. La thématique du remplacement des éoliennes (« *repowering* ») est par ailleurs appelée à prendre de l'importance, en raison de l'ancienneté des équipements installés 2 décennies plus tôt, de la raréfaction des terrains disponibles et des progrès technologiques[167].

Sur le plan industriel, 7 des 10 premiers turbiniers mondiaux proposent en effet désormais des éoliennes d'une puissance d'au moins 4 MW mais la baisse des prix contribue à la recomposition du secteur (fig. 5) avec au cours de la seule année 2017 le rachat d'acteurs de second plan (China Creative Wind Power) ou leur mise en faillite (FWT Energy and Seawind) ou leur retrait (Daewoo, Areva, JSW).

En Allemagne comme dans d'autres pays européens, la croissance du secteur éolien depuis les années 90 a non seulement poussé à la création d'entreprises dédiées à cette technologie, comme des sociétés de développement, des fabricants de mats ou des turbiniers, mais a également permis à des acteurs spécialisés dans des activités connexes d'élargir leur savoir-faire et de trouver des relais de croissance en se diversifiant (cabinets d'ingénierie généralistes, industries mécanique et électronique, forges, fonderies, chaudronnerie, etc.). S'agissant des seuls turbiniers, les acteurs européens ont largement bénéficié du dynamisme du marché mondial. En 2017, les 5 premiers turbiniers mondiaux rassemblaient 62% des installations réalisées et 3 d'entre eux étaient européens (cf. supra)[168].

Le ralentissement du marché chinois, le dynamisme du marché européen, la montée en gamme des industriels européens sur fond de recomposition ont contribué à renforcer le poids de ces derniers. Ils semblent bien positionnés dans la phase de maturation du marché qui requiert davantage que des économies d'échelle dans la partie manufacturière. L'adaptation aux caractéristiques des sites, l'analyse des marchés, l'intégration réussie du numérique, l'ajout de dispositifs de stockage dans des solutions faisant système deviennent peu à peu des facteurs de compétitivité essentiels. Sur ce point, les industriels danois et allemands ont acquis une avance sur la plupart des autres acteurs du marché. Le Danois Vestas dominait ainsi le marché mondial (avec une part de marché supérieure à 15%) en 2017, suivi par un acteur germano-espagnol (Siemens-Gamesa[169]), 3 autres acteurs allemands figurant parmi les 10 premiers manufacturiers (Enercon, Nordex Acciona, Senvion) (fig. 3)[170].

[166] Ministère allemand de l'économie et de l'énergie, *Fragen und Antworten zum EEG 2017*.
[167] Kurzanalyse des Marktes für
Windkraft in Deutschland 2018 (Auszug) https://www.oevermoehle-consult.de/studien/
[168] FTI Consulting, « Global Wind Market Update – Demand & Supply 2017 », https://www.fticonsulting.com/about/newsroom/press-releases/vestas-holds-the-top-spot-in-global-wind-turbine-supplier-ranking-in-2017, Consulté le 23 juin 2018.
[169] Siemens était 4ème en 2016, Gamesa 6ème.
[170] FTI Intelligence, *A new competitive landscape is taking shape: bigger, better and stronger*, 5 mars 2018.

	Entreprise	Siège	Remarques
1	Vestas	Danemark	60 000 éoliennes installées dans 25 pays. Part de marché de l'ordre de 16% (après avoir atteint 30%).
2	Siemens Gamesa	Espagne/RFA	Gamesa avait la quatrième place, Siemens la sixième dans les classements antérieurs.
3	Goldwind	Chine	Détient une part de marché importante en raison notamment de son expansion sur le marché protégé chinois. Machines conçues par sa filiale allemande Vensys. Présent dans une vingtaine de pays. A signé en 2017 un MoU avec le gouvernement saoudien ainsi qu'une lettre d'intention avec l'entreprise suédoise de stockage SaltX.
4	General Electric	USA	Présent sur le marché en raison de son acquisition d'Alstom.
5	Enercon	RFA	Présent dans 26 pays, y compris sur des marchés de petite taille (Vietnam, Taïwan, Bolivie, Estonie).
6	Nordex Acciona	RFA	Spécialisée sur les éoliennes de grande taille, Nordex a acquis l'entreprise espagnole Acciona en 2015.
7	Senvion	RFA	Senvion est réapparue sur la liste des 10 premiers turbiniers après en avoir été écartée en 2016.
8	United Power	Chine	
9	Envision Energy	Chine	Basée à Schanghai, l'entreprise a établi des bureaux à Hambourg, un Global Blade Innovation Center à Boulder (Colorado) et dispose d'une unité de R&D à Silkeborg (Danemark) ainsi qu'un centre de R&D pour le stockage à Osaka et un centre de R&D pour le numérique dans la Silicon Valley. 2400 machines installées en Asie, en Europe et en Amérique latine.
10	Suzlon	India	A installé 17 GW de capacités en Europe, en Australie, en Amérique latine et en Amérique du nord.

Figure 3
Classement des 10 premiers turbiniers dans le monde en 2017 (selon leur part de marché)
Source : FTI Intelligence

Ces acteurs ont su capitaliser sur un marché national dynamique, sur leurs capacités à l'export et sur des compétences industrielles déjà établies, la chaîne de valeur faisant en effet appel à un savoir-faire disponible dans un large éventail d'activités mécaniques et électroniques.

Les composantes de la chaîne de valeur

La partie initiale d'un parc éolien peut durer près de 10 années selon les particularités du projet ou du cadre administratif du pays concerné mais n'absorbe que 10% du coût total d'un projet. Les industriels manufacturiers sont généralement absents de cette phase, à l'exception de ceux qui ont souhaité se diversifier vers l'amont[171]. Les principaux acteurs sont les grands fournisseurs d'énergie, les développeurs/producteurs/exploitants positionnés le long de la chaine de valeur (PNE-Gruppe en Allemagne par exemple), les développeurs « pure players », le plus souvent de petite taille et présents en amont sans se porter pour autant propriétaires des fermes.

En matière d'emplois, l'éolien est la quatrième filière la plus pourvoyeuse d'emplois au niveau mondial. Selon une clé de répartition proposée par Rutovitz et Harris (2012), 62,2% de ces emplois sont liés à la fabrication, 35,6% à l'installation et à la construction, et 2,2% à l'exploitation et à la maintenance. La partie la plus capitalistique est celle des composants (entre 60 et 80% du coût d'une éolienne terrestre) pour lesquels 4 catégories peuvent être identifiées : les composants de structure (pales, mât et nacelle), les composants électriques (générateur, transformateur, convertisseur, électronique, transmission), les composants mécaniques et l'assemblage. Certains turbiniers ont internalisé la quasi-totalité de ces postes, notamment les plus critiques (le mât, les pales qui représentent respectivement entre 10 et 20% du coût d'une éolienne). Mais certains industriels se sont spécialisés sur des segments précis comme le mât (AMBAU entièrement dédié à l'éolien ou KGW focalisé à Schwerin sur le secteur naval avant de se diversifier), les pales[172] (Carbon Rotec du moins jusqu'en 2018[173]), ou la nacelle. Cette dernière abrite l'essentiel des dispositifs mécaniques et électriques permettant de transformer la puissance du vent en électricité. Les savoir-faire exigés ici sont divers (pièces en matériaux composites, pièces forgées, etc.) et l'Allemagne compte plusieurs acteurs dont la plupart ont ajouté l'éolien à un portefeuille de débouchés préexistant.

[171] Tel était en 2018 le cas de Gamesa, Nordex Acciona Windpower, Suzlon (Inde) ou encore Goldwind (Chine). In : ADEME (2018).
[172] Les autres acteurs mondiaux sont LM WindPower au Danemark (propriété de GE depuis 2015 et qui dispose d'un site de production à Cherbourg pour sa turbine Haliade-X de 12 MW), Tecsis au Brésil et Zhongfu Lianzhong en Chine.
[173] L'entreprise s'est déclarée en faillite au début de l'année 2018 : Barbara Wenke, « Zech prüft Optionen für Rotec-Gelände », *Die Norddeutsche*, 27.02.2018.

Les composants électriques qui représentent environ 10-20% du coût d'une éolienne (générateur, convertisseur, transformateur) sont eux le plus souvent internalisés même si plusieurs acteurs important du secteur électrique ont investi le champ de l'éolien. Enfin, les composants mécaniques représentent 15 à 20% du coût d'une éolienne. Ils constituent des pièces maîtresses et les concevoir nécessite des compétences en forge et en fonderie ainsi qu'une maitrise des contrôles de qualité non destructifs. Tel est le cas notamment des brides qui gèrent la rotation des pales, des couronnes d'orientation pour la rotation de la nacelle, des arbres et systèmes d'accouplement pour la transmission de l'énergie des pales jusqu'à la génératrice, des freins et du multiplicateur (responsable à lui seul d'environ 12% du coût d'une éolienne).

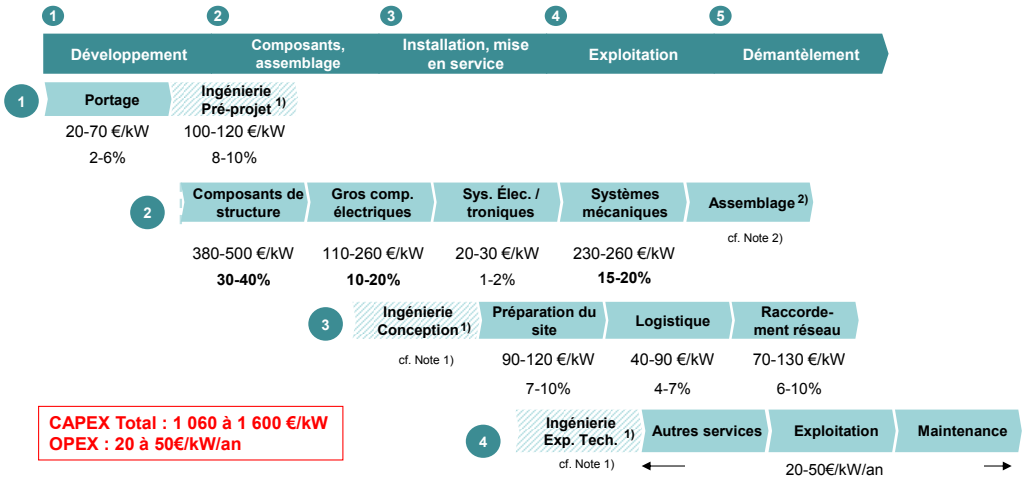


Figure 6
Chaîne de valeur dans le secteur éolien
Source : ADEME, 2018.

Examiner la filière de l'éolien implique en somme de prendre en considération ces composants que la plupart des turbiniers externalisent (fig. 6). Le tissu industriel allemand adossé à un nombre élevé d'ETI[174] apparaît ici comme un atout de taille. Plusieurs entreprises allemandes de taille moyenne disposent de positions fortes sur ces marchés (par exemple Winergy pour les multiplicateurs, GKN Stromag fondé en 1932 pour les freins).

Une industrie de l'éolien adossé à des compétences préexistantes

L'une des caractéristiques de la filière éolienne allemande est la forte présence d'entreprises de petite taille ou de taille intermédiaire, le plus souvent familiales, qui ont vu dans l'essor de l'éolien une opportunité de se diversifier sur la base de leurs compétences. En comparant les stratégies chinoises, américaines et allemandes, Nahm (2017) note ainsi que les entreprises allemandes ont peu recouru à l'innovation de rupture et que peu d'entreprises nouvelles se sont créées à la faveur de la transition énergétique. En revanche, « l'innovation secondaire » (« *ancilary innovation* ») pratiquée par des entreprises déjà existantes a permis à ces dernières de proposer à l'industrie éolienne les composants nécessaires sans pour autant rompre avec leur stratégie de niche.

Des firmes spécialisées dans la machine-outil, l'industrie navale, la métallurgie, la découpe ont ainsi pu trouver des relais de croissance. Dès 2011, la VDMA (Fédération allemande de la construction mécanique et de l'ingénierie[175]) recensait 170 entreprises investies dans la filière éolienne dont 10 seulement se présentaient comme turbiniers. L'écrasante majorité était constituée de sous-traitants (Arbeitsgemeinschaft Windenergie-Zulieferindustrie, 2012). Même cas de figure dans le photovoltaïque où les entreprises présentes dans le secteur comptaient 41 000 salariés en 2010 (les fabricants de panneaux solaires ne comptant, eux, que 12 000 salariés). En somme, l'existence d'un tissu industriel compétitif, notamment dans le secteur de la machine et de l'équipement (en 1995, ce dernier représentait 28% de l'activité manufacturière) explique en grande partie les dividendes perçus au titre de la transition énergétique par le pays en termes d'emplois.

[174] Établissement de taille intermédiaire.
[175] Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.

Sur la base d'entretiens avec des responsables de PME, Nahm (2017) souligne plus précisément 3 facteurs clefs. D'une part, la coopération entre firmes a permis de surmonter les défis en termes de process et d'innovation posés par l'entrée sur un marché nouveau. Inscrite dans la tradition, cette coopération a été encouragée par un programme fédéral de soutien à la R&D dont les origines remontent aux années 50 (IGF- Industrielle Gemeinschaftsforschung[176]). Les réseaux de coopération ainsi créés tout comme les programmes de R&D conduits avec les Fraunhofer Institute (par exemple le Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (ISE) à Freiburg dans le cas de la filière photovoltaïque) ont permis aux PME de surmonter le handicap de leur taille.

D'autre part, les institutions financières (notamment les *Sparkassen*[177]) ont proposé des prêts à des conditions avantageuses en raison des antécédents favorables des entreprises familiales concernées et de la visibilité offerte par les généreux tarifs d'achat. Enfin, les structures et les pratiques inhérentes à l'industrie allemande en matière de formation permanente ont permis de former les personnels nécessaires et de suppléer ainsi l'absence de cursus adapté dans le monde académique. Peu à peu, les fédérations industrielles, les centres de formation, les parcours proposés par les Universités en matière de formation permanente (*Berufsakademie*) ont permis de former les compétences nécessaires aux débuts de la transition énergétique.

Au final, le tissu industriel allemand a d'autant mieux bénéficié de l'essor de l'éolien qu'une turbine nécessite plusieurs milliers de pièces, à l'inverse du secteur photovoltaïque qui repose sur un éventail moins large de compétences et qui se prête mieux à une massification et à l'importation depuis des pays à bas coûts.

Pour les différents acteurs industriels de la filière éolienne allemande, les principaux enjeux sont désormais les suivants : accroître la taille des différentes parties des éoliennes pour améliorer les rendements, notamment dans les zones peu ventées, réduire les coûts (malgré la volatilité de certains cours, notamment celui de l'acier), industrialiser les procédés, développer des stratégies de plate-forme pour bénéficier d'économies d'échelle, s'adapter aux exigences d'un marché de plus en plus différencié (éolien marin, petit éolien terrestre, etc.). À cet égard, l'éolien marin constitue un précieux relais de croissance pour le tissu industriel allemand d'autant que plusieurs villes portuaires ont contribué à la structuration de la filière.

L'éolien en mer : un relais de croissance crucial

Si la première éolienne offshore dans le monde a été installée en 1991 au large des côtes danoises (à Vindeby), le marché a depuis connu une forte croissance qui devrait se prolonger, en raison notamment des oppositions à l'éolien terrestre. Pour les industriels, le marché est d'autant plus important que la filière *offshore* exige des compétences et des technologies plus avancées que l'éolien terrestre et que l'UE est en avance par rapport aux autres continents (elle concentrait en 2018 90% des machines installées dans le monde). Certes, l'éolien terrestre domine largement le marché (l'éolien marin n'avait une part de marché que de l'ordre de 2% en 2018) et les capitaux à mobiliser en amont sont significatifs. Néanmoins, l'introduction d'appels d'offre a accéléré le processus de réduction des coûts.

Selon WindEurope, les coûts devront diminuer de 26% pour atteindre 100 €/MW d'ici à 2020 et 90€ pour espérer rivaliser avec les énergies conventionnelles (EWEA, 2015). Si cette trajectoire paraissait peu réaliste dans les années 90, des montants de cet ordre ont été atteints dès 2016. Le développeur DONG a ainsi obtenu les projets Borssele 1 & 2 aux Pays-Bas en juin de cette année pour 72€/MWh ceux de Borssele 3 & 4 pour 54€ (hors coûts de connexion), au cours du mois suivant (GWEC, 2017, p. 59). Au vu de la dynamique à l'œuvre en Europe et sur certains marchés (notamment en Chine où les capacités devraient tripler d'ici à 2020 pour atteindre 7.5GW), une forte croissance du marché mondial est probable.

En Allemagne, le développement de l'éolien en mer se heurte à un domaine maritime exploitable limité (en comparaison avec le Royaume-Uni par exemple), notamment en raison de l'étendue des espaces protégés. En conséquence, les espaces disponibles pour les fermes sont confinées à des parties de la zone

[176] Ministère allemand de l'économie et de l'énergie : https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrielle-gemeinschaftsforschung-igf-2017.html. Consulté le 5 juillet 2018.
[177] Équivalent des caisses d'épargne françaises.

économique exclusive dont les eaux sont relativement profondes (40 mètres environ). La saturation des réseaux conduit également les autorités à limiter le développement de l'éolien dans certaines parties du nord de l'Allemagne, dans l'attente d'investissements supplémentaires dans les infrastructures. L'éolien en mer a néanmoins bénéficié très tôt d'un soutien significatif, avec des résultats sensiblement meilleurs que ceux obtenus dans le secteur photovoltaïque.

3. Politiques publiques mises en œuvre au niveau national

La filière a bénéficié de plusieurs avantages dont certains communs à l'éolien terrestre. Parmi ces derniers, rappelons les atouts industriels du pays (1ère industrie manufacturière d'Europe), un marché national soutenu par la puissance publique, des soutiens à l'export et une aide apportée à la filière depuis plusieurs décennies. Dès 1976, les autorités fédérales lançaient en effet le programme GROWIAN (Groß-Wind-Anlage) destiné à concevoir un prototype d'éolienne puissante (3MW) (Bruns et Ohlhorst, 2011). Comparable aux programmes lancés par la NASA (Garud and Karnøe, 2003), ils visait à articuler les compétences des secteurs de l'aéronautique et de l'ingénierie. Comme son alter ego américain, le programme fut un échec et fut arrêté en 1987 après 87 millions DM de dépenses (Jaeger, 2013).

Il fut néanmoins utile à la mise en place de la première étude de faisabilité lancée en 1981 et un programme nouveau fut élaboré (GROWIAN II) sur l'île de Helgoland en 1990 (Jaeger, 2013). En 2001, la BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie – Agence fédérale de la marine et de l'hydrographie) lança le programme Alpha Ventus. En 2002, la Stratégie fédérale de l'éolien marin contribua à la dynamique avant que ne soit constituée en 2005 la Fondation allemande de l'énergie éolienne, une entité public-privée destinée à piloter le programme et à favoriser le processus d'industrialisation (Bruns and Ohlhorst, 2011). Par ailleurs, le programme « Research at Alpha Ventus » (RAVE), financé par le Ministère de l'économie et de l'énergie (au Fraunhofer-Institut für Windenergiesysteme de Bremerhaven) fit le lien avec l'industrie. Résultat : dès 2014, 1 GW était installé sur le marché allemand adossé à 258 machines. En 2015, 2 GW supplémentaires avaient été installés. Par la suite, d'autres programmes ont soutenu l'offre (cf. supra).

La demande a, elle, été soutenue par les tarifs d'achat successifs. Les amendements apportés à la loi sur la transition énergétique (EEG) en 2000 prévoyait 2 tarifs fixes pour les 5 premières années puis variables au cours des 15 années suivantes selon les gisements de vents locaux. La tarif appliqué à l'éolien marin était de 9.1 cts/KWh contre 6.19 cents pour l'éolien terrestre. La nouvelle loi de 2014 qui réduisit les soutiens alloués distingua également entre éolien terrestre et éolien marin (avec des objectifs respectifs en matière de capacité installée de 2.5 GW et de 6.5 GW d'ici à 2020). Autre différence entre les 2 technologies : les développeurs de l'éolien marin eurent le choix entre 2 formules : soit un soutien élevé (19.4 cents per KW/h) pour 8 ans, soit un soutien moindre (15,4 cents) pour au moins 12 ans, la durée de la période dépendant de la distance des côtes et de la profondeur des eaux. En outre, la KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) proposa à partir de 2011 des prêts spécifiques pour l'éolien marin, notamment pour assurer que le marché ne bénéficie pas qu'à une poignée de développeurs ayant la surface financière requise mais soit également accessible à des entités plus petites.

La politique de planification spatiale s'est par ailleurs adaptée au développement de l'éolien, à travers par exemple la loi de 2004 (*Raumordnungsgesetz*) qui élargit la règlementation à la zone économique spéciale et traduisit la volonté d'adapter le droit en matière d'aménagement de l'espace à l'éolien marin. BSH, l'Agence chargée du suivi des projets éoliens en mer Baltique et en mer du nord,[178] mit sur pied un nouveau plan d'aménagement (Nolte, 2010) publié en 2009 avant de devenir l'agence en charge de l'examen des candidatures pour l'aménagement de parcs éoliens offshore. En 2016 et en 2017, l'introduction de systèmes d'enchères s'est inspirée des procédures en vigueur au Danemark et aux Pays-Bas (où l'État prend la responsabilité de choisir le site, de prévoir les aménagements à apporter aux infrastructures). En dégageant les développeurs de toute responsabilité en amont, les autorités des pays concernés peuvent ainsi capitaliser sur l'expérience acquise sur chaque projet et surtout créer les conditions d'une réalisation rapide des projets retenus au terme des appels d'offre. Ainsi, le *Plan de développement l'éolien marin à l'horizon 2025* comprend 4 connections au réseau en mer du Nord et 3 en mer Baltique reliés à des « clusters » au sein de chaque zone (Bundesnetzagentur, 2016).

[178] Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie.

Si les leviers d'action se sont avérés efficients au niveau national, l'une des particularités de la filière marine réside dans le rôle joué par les autorités locales et régionales, notamment dans les villes portuaires.

4. Une industrie de l'éolien concentrée au nord

Plusieurs *Länder* ont soutenu le développement de l'éolien, soit à travers des soutiens à l'investissement (notamment en cofinancement avec des projets européens), soit en soutenant le développement d'infrastructures notamment portuaires. En outre, certains instituts de recherche étant leur propriété (comme ForWind à Oldenburg ou le Deutsches Windenergie-Institut à Wilhelmshaven), ils ont pu jouer un rôle actif en matière de politique d'innovation. Plus généralement, les autorités locales et régionales ont largement contribué à structurer une filière sur les littoraux de la mer du Nord et de la mer Baltique. L'industrie de l'éolien fut en effet dans un premier temps dispersé, les principales firmes ayant leurs centre de décision dans des villes parfois moyennes (cas d'Enercon à Aurich) et surtout éloignées des littoraux. À partir de 2007, plusieurs industriels ont déplacé leurs centres de décision à Hambourg (Menzel, Adrian, 2018). En 2018, la géographie de la filière peut se résumer schématiquement à 3 ensembles : des pôles manufacturiers dans plusieurs villes portuaires, un pôle de services centré sur Hambourg et une myriades de sous-traitants présents dans plusieurs villes de l'intérieur du pays.

Sur le plan manufacturier, un cluster s'est constitué autour de la Basse-Saxe, du Schleswig-Holstein, de Brème et de Hambourg. Cet espace s'est constitué autour d'un réseau de plusieurs acteurs de taille diverse associant donneurs d'ordre, sous-traitants et centres de recherche. Des sites comme Bremerhaven ou Cuxhaven ont ainsi développé des activités en matière d'assemblage de turbines, de construction de rotors ou de conception de fondations. La chaîne de valeur s'étend à 14 autres ports en mer du Nord et à 6 ports en mer Baltique (BMWi, 2015). À titre d'exemple, l'île d'Helgoland est devenue un centre majeur pour les services à destination des fermes éoliennes de la mer du Nord. Cette filière industrielle a bénéficié de la volonté des villes portuaires de compenser le déclin des chantiers navals qui a notamment frappé Bremerhaven et Brême (le cas le plus symptomatique ici étant la fermeture des chantiers Bremer Vulkan en 1997). Peu de firmes déjà implantées parvinrent néanmoins à se reconvertir. Le tissu industriel se régénéra principalement grâce à la création ou à l'implantation de nouveaux acteurs attirés par les perspectives sur place. Dès le début des années 2000, la ville de Brême initia en ce sens une stratégie de développement (Fornahl et al., 2012) portée par l'Agence de développement locale (Bremerhavener Gesellschaft für Investitionsförderung und Stadtentwicklung (BIS).

Cette stratégie reposa notamment sur la reconversion des infrastructures devenues désuètes avec la crise des chantiers navals. Propriété de la ville de Brême depuis 1927 puis partie intégrante du *Land* de Brême depuis 1947, le port de Bremerhaven a pu bénéficier d'une stratégie territoriale dépassant son seul périmètre. Ainsi en 2010, le Sénat de la ville décida d'investir dans le Offshore Terminal Bremen (OTB) 160 million € (sans compter 20 millions au titre des mesures de compensation environnementales) (BIS, 2015). Le développement d'activités offshore y fut encouragé, notamment en permettant l'accès de l'entreprise Multibrid au port de Bremerhaven pour tester des prototypes de turbines au début des années 2000. Afin que ses activités de R &D et ses sites d'essais soient proches, Multibrid implanta par la suite ses activités à Bremerhaven (De Vries, 2009).

D'autres industriels s'installèrent dans la foulée : WeserWind (fondations et tours) en 2003: REpower (production de turbines) et Powerblades (rotors et pales) en 2008. Plusieurs centres de recherche contribuèrent à la dynamique régionale ainsi créée, notamment le Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung de Brême ou encore l'IWES institué en 2009. Des politiques de formation s'articulèrent à cet ensemble, la *Fachhochschule* de Bremerhaven étant ainsi la première à proposer un cursus dédié à l'énergie éolienne.

Si Bremerhaven s'est focalisée sur le volet manufacturier, Hambourg a surtout émergé comme un centre de services pour devenir « le cerveau de l'éolien marin en Allemagne du nord » (Fornahl et al. 2001, p. 849). En 2001, la ville bénéficia de l'implantation du quartier général de Repower puis de nombreuses autres firmes dans le domaine de la conception et du service (via par exemple l'implantation du quartier général de la division Éolien de Nordex et de Siemens en 2011). Si certaines villes portuaires comme Bremershaven ont bénéficié d'une stratégie de développement de la part des autorités locales et

régionales, le développement de Hambourg a, lui, résulté avant tout de stratégies de firmes. La ville a en effet attiré plusieurs entreprises de services percevant un intérêt à se regrouper dans la région. Elle a également capitalisé sur ses traditions en matière de certification, des entreprises comme GL et TÜV Nord développant des normes pour certifier les éoliennes terrestres dès 1977, en lien avec le programme GROWIAN.

Les activités de ces organismes se sont poursuivies dans l'éolien marin dès 2001 quand GL fut associé aux plate-formes de recherche FINO. D'autres organismes certificateurs comme TÜV-Süd, Det Norske Veritas (qui fusionna avec GL pour devenir DNV GL en 2013) ou Deutsches Institut für Normung (DIN) établirent de nouvelles activités à Hambourg. BSH, l'organisme en charge de l'approbation des parcs éoliens (cf. supra), est par ailleurs localisé à Hambourg. Au final, la ville et le secteur dans son ensemble bénéficient de la proximité géographique entre industrie manufacturière, développeurs, entreprises d'énergie, organismes certificateurs, développeurs et compagnies d'assurance. Sur la base cette dynamique, la ville a lancé plusieurs initiatives. Renewable Energies Hamburg est ainsi un cluster établi depuis 2010. "Energie-Campus" a été initié à l'Université de Hambourg en sciences appliquées (HAW) en 2015. En 2012, le Land de Hambourg et l'Université avaient déjà lancé l'aménagement d'un campus consacré à la recherche-développement pour éoliennes.

Recherche et services localisés à Hambourg ; ingénierie et assemblage centrés autour de Bremerhaven : la géographie de la filière éolienne est logiquement concentrée à proximité des littoraux. Néanmoins, compte-tenu du tissu industriel des autres régions, des acquis dans l'éolien terrestre et de localisation des sièges sociaux des *utilities*, la chaîne de valeur bénéficie à plusieurs autres régions, notamment à la Rhénanie du Nord-Westphalie. En conséquence, à l'inverse du Royaume-Uni ou de la Norvège, le secteur allemand de l'éolien marin profite à plusieurs régions de l'intérieur du pays, notamment grâce à l'activité des sous-traitants. La Rhénanie du Nord-Westphalie, la Bavière, le Bade-Wurtemberg comptent ainsi pour 50% du chiffre d'affaires et pour 40% de l'emploi du secteur et la Rhénanie du Nord est le *Land* qui compte le plus grand nombre d'entreprises relevant de cette filière (PWC, 2012; BMWi, 2015). La présence dans ce *Land* des centres de décisions de grandes entreprises énergétiques (RWE et E.ON) explique cette géographie, tout comme la tradition industrielle de la région. Plusieurs acteurs industriels y ont en effet diversifié leurs activités pour tirer profit de l'essor de l'éolien, à l'instar d'Eickhoff ou de Renk pour les boîtes de vitesse.

5. Une recomposition inachevée ?

Lema et al. (2014) évaluent à 200 le nombre d'entreprises impliquées dans le secteur de l'éolien en mer, dont le tiers opère dans le secteur manufacturier, les 2/3 en amont ou en aval. Dans l'éolien marin, l'ensemble de la chaîne de valeur est représentée et ce furent dans un premier temps des entreprises de taille moyenne qui ont tenté d'adapter des éoliennes terrestres au contexte de l'éolien marin. Plusieurs initiatives furent prises pour rapprocher les industriels entre eux avant qu'en 2001, Nordex et Jacobs ne fusionnent pour former Repower, devenu depuis un fabricant d'éoliennes de taille critique.

D'autres acteurs émergèrent, le plus souvent filiales de groupes préexistants et constitués à partir de participations croisées (BARD, Multibrid). En 2009, REpower et Multibrid installèrent leurs éoliennes dans le site d'essais Alpha Ventus et BARD dans le parc éolien BARD 1. Dans le même temps, Siemens privilégia dès le départ les marchés à l'export en faisant l'acquisition du danois Bonus en 2004. Pour ne pas perdre le savoir-faire de l'entreprise, Siemens a conservé ses principales activités marines au Danemark, a investi dans la R&D à Brande ainsi que dans la production de pales à Aalborg en 2015.

L'internationalisation de la filière a pris plusieurs formes. En 2007 REpower fut racheté par Suzlon pour prendre le nom de Senvion en 2014. Repower a ainsi pu prendre position sur des marchés non européens, 80% de la production étant exportée en 2014 (Lema et al., 2014). En 2007, Multibrid fut acquise par Areva pour devenir AREVA Wind tout en restant confiné pour l'essentiel à des marchés européens. BARD en revanche, fit faillite en 2013. D'autres entreprises comme EEW, Georgsmarienhütte (à travers sa filiale WeserWind), SIAG et Thyssen Krupp se sont diversifiées en dehors de leurs marchés traditionnels pour se lancer dans la construction de tours. Si EEW est parvenue à s'imposer dans le secteur des fondations, Cuxhaven Steel Construction et WeserWind sont sortis du marché dès 2015 (EWEA, 2015).

Les industriels allemands sont néanmoins parvenus à structurer une filière compétitive, notamment après la sortie du marché de leurs homologues français. En 2007, Areva avait pris 51 % de Multibrid. Sous le nom d'Areva Wind, l'entité s'était portée acquéreuse en 2009 du fabricants de pales PN Rotor et s'était établi à Bremerhaven. En 2015 fut créé Adwen, une coentreprise avec l'industriel espagnol Gamesa, qui constituait en 2015 le deuxième fournisseur éolien européen offshore, avec 18,2 % de parts de marché. En juin 2016, Gamesa et Siemens fusionnèrent. Faute de pouvoir racheter les parts de Gamesa, Areva céda les siennes, actant le retrait de la France du secteur après la cession en 2014 de la branche énergie d'Alstom à General Electric.

Les perspectives dans l'éolien sont néanmoins incertaines, comme en témoigne le rapprochement effectué en mai 2018 par le responsable de l'éolien marin de Siemens (« je ne voudrais pas que l'industrie de l'offshore connaisse le destin du Transrapid »[179]). En effet, les modifications récurrentes de la législation ajoutées à la concurrence croissante suggèrent que la structuration de la filière se poursuit. Des crises locales récurrentes ne sont pas à exclure. À Bremerhaven, le secteur est passé de 3 000 à 1 500 emplois en quelques années[180]. Entre 2012 and 2014, les 5 principaux industriels virent leurs effectifs passer de 2 540 à 1 982 tandis que le concepteur de fondations WeserWind déclarait faillite en 2015. Une enquête effectuée en 2017 auprès des industriels du secteur de l'éolien (terrestre et marin) indiqua qu'après 1800 éoliennes installées (pour une capacité de 5,3 GW) cette année-là, 1,1 GW seulement pourraient l'être en 2019. Des milliers d'emplois pourraient être menacés, principalement en raison de la baisse des soutiens apportés aux énergies renouvelables dans les appels d'offres lancés à travers le monde.

Plus globalement, la consolidation du secteur semble encore inachevée et le positionnement des acteurs industriels le long de la chaîne de valeur est appelé à évoluer. En 2018, Siemens Gamesa et Vestas annonçaient ainsi leur entrée sur le marché du stockage[181], au motif que résoudre la question de l'intermittence s'imposait pour espérer une croissance durable de l'énergie éolienne. En conséquence, des investissements ont été opérés dans le secteur de la batterie et dans d'autres options selon les opportunités disponibles localement (par exemple dans les roches pour une usine sidérurgique à Hambourg). Une batterie vanadium redox-flow était également à l'étude en Espagne la même année.

Cependant, depuis la fusion décidée en avril 2017, le cours de Siemens Gamesa a chuté d'un tiers en raison d'une baisse de l'activité, d'une gouvernance complexe (Siemens a la majorité mais ne contrôle pas le Conseil d'administration) qui s'est traduite par des contentieux avec Iberdrola, l'entreprise énergétique espagnole, plus gros actionnaire de Gamesa avant la fusion et qui détient 8% de la nouvelle entreprise. Au terme de la fusion, Siemens Gamesa a lancé une restructuration se traduisant par la perte de 6 000 emplois et par la délocalisation vers le Maroc d'une unité de production située au Danemark. La consolidation du secteur devrait donc se poursuivre tant les économies d'échelle s'imposent dans l'industrie de l'éolien pour financer les dépenses en amont, notamment dans la R&D. La filière allemande ayant rapidement privilégié les marchés à l'export, elle devrait néanmoins s'épargner les affres du photovoltaïque qui, lui, s'est effondré après un développement initial prometteur.

6. La filière photovoltaïque : un renouveau improbable ?

Une filière dynamique à l'échelle mondiale

À l'instar de l'éolien, le photovoltaïque a connu une forte croissance depuis les années 90 qui s'est poursuivie au cours des années 2000, sous l'effet notamment de la montée en puissance du marché chinois. Si 5 GW avait été installé dans le monde en 2008, 90 GW environ l'ont été en 2017, les deux-tiers en Chine[182].

[179] Kathrin Witsch, « Die internationale Windbranche schaut besorgt nach Deutschland », *Handelsblatt*, 25.05.2018.
[180] Peter Hanuschke, « Mächtig Gegenwind für Bremerhaven », *Weser Kurier*, 15.05.2018
[181] Leslie Hook, « Siemens Gamesa boosts focus on clean-energy storage », *Financial Times*, 27 mai 2018.
[182] Leslie Hook, Lucy Hornby, « China's solar desire dims », *Financial Times*, 8 juin 2018.

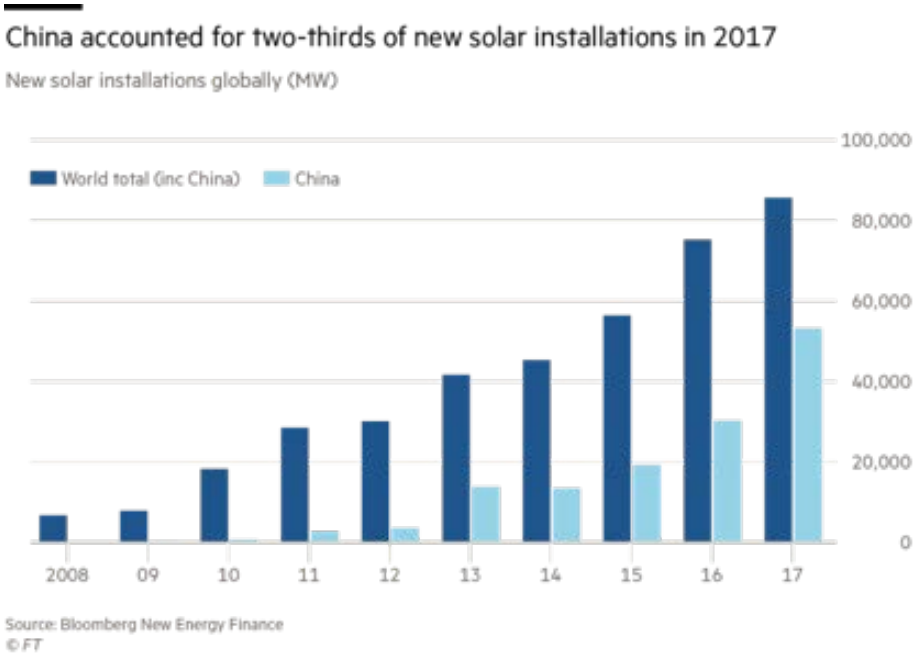


Figure 9
Part de la Chine dans les installations photovoltaïques
Source : Financial Times

La remise en cause du système de soutien décidé par les autorités chinoises au premier semestre 2018 devrait certes avoir un effet dépressif sur la demande au niveau mondial. La chute des prix est toutefois telle que la croissance de la demande sur d'autres marchés devrait la compenser partiellement. 105 GW devraient être installés en 2018 selon IHS Markit (et non 113 GW comme anticipé avant le changement de politique opéré en Chine), ce qui représente une hausse de 11% par rapport à l'année précédente (fig. 9 et 10)[183]. Le secteur semble par conséquent moins que jamais dépendant de la puissance publique, la parité réseau étant atteinte ou en passe de l'être sur plusieurs marchés.

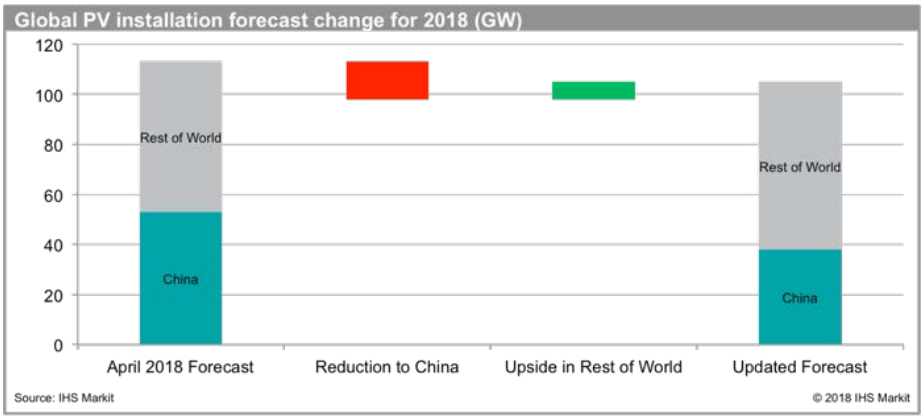


Figure 10
Prévisions d'installations de capacités photovoltaïques
Source : IHS Markit

Une ambition industrielle associée à un soutien à la demande

La première initiative marquante de constituer un marché du photovoltaïque en Allemagne remonte à 1989 et au « programme 1000-roof » qui permit d'installer 5.3 MWc en 1993 (date de fin du programme) (Lauber and Mez, 2004). Les premières lois actant les tarifs d'achat contribuèrent par leur générosité à lancer le marché, les entreprises énergétiques devant racheter l'électricité à des prix élevés et contribuer, le cas échéant, au financement de la modernisation des réseaux. Les initiatives locales jouèrent également un rôle clef, le « modèle » d'Aix la Chapelle se diffusant peu à peu dans le pays tout comme les soutiens apportés par certains *Länder* (Jacobbson et al., 2004; Lauber and Mez, 2004).

Du côté de l'offre, le paysage industriel se structura. À titre d'exemple, Siemens et ASE (Applied Solar Energy) acquirent la technologie nécessaire via l'achat d'entreprises américaines (Jacobbson et al., 2004). Le groupe Schott group, spécialisé dans le verre, entra dans l'industrie photovoltaïque en 2002. Siemens Solar fut racheté par Shell Solar la même année avant que Solar World n'absorbe l'ensemble

[183] IHS Markit, cuts 2018 global PV demand outlook but still sees y/y growth, https://renewablesnow.com/news/ihs-markit-cuts-2018-global-pv-demand-outlook-but-still-sees-yy-growth-615727/, consulté le 27 juin 2018.

en 2006. Bosch rejoignit le secteur à travers l'achat d'Ersol Solar en 2008. Les réticences des partis conservateurs n'affectèrent que marginalement la dynamique. En revanche, l'arrivée au pouvoir en 1998 d'une coalition rouge-verte changea la donne. En janvier 1999, le « programme 100 000-roof » fut lancé. Surtout, la loi sur les énergies renouvelables de mars 2000 (qui fit passer le tarif d'achat de 17 à 99 pfennig, soit environ 50 cents avec une visibilité de 20 ans) donna une nouvelle impulsion au marché d'autant que dans le même moment, la sortie du nucléaire était actée (en 2002). Grâce aux généreux tarifs d'achat, le marché allemand du PV explosa, passant de 42 MW en 2000 à 7,4 GW en 2010 entraînant la constitution d'une filière centrée sur la partie méridionale de l'ex-RDA.

L'implantation d'un cluster photovoltaïque dans les nouveaux Länder

Sur le plan territorial, la structuration de la filière se traduisit notamment par la constitution à partir de 2008 d'un cluster solaire, la *Solar valley*, organisé à cheval sur 3 *Länder* de l'ex-RDA (Saxe-Anhalt, Saxe, Thüringe). Dans un premier temps, entre 1992 et 2001, les premières implantations ont privilégié la Saxe (Solarwatt à Dresde, Solarworld à Freiberg), la Thuringe (Ersol à Erfurt) ainsi que la capitale, Berlin (Solon, SolarWerk). Plusieurs facteurs de localisation prévalurent. Freiberg comme siège du combinat VEB Spurenmetalle bénéficiait d'une spécialisation dans le silicium aisée à valoriser pour la production de panneaux solaires. Dresde et Erfurt purent, elles, capitaliser sur leurs traditions dans le secteur de la micro-électronique. La région bénéficia en outre des dispositifs fédéraux destinés à réindustrialiser l'ex-RDA frappée par les conséquences la réunification, lesquels ont facilité la reconversion des acteurs industriels présents et l'implantation de firmes à des conditions favorables (Brachert et al., 2013) (notamment dans le cas de Q-Cells à Thalheim[184]). Dès 2008, 14 000 emplois dépendaient de la filière photovoltaïque dans les nouveaux *Länder*, soit 60% de la main d'œuvre du secteur (Ruhl, 2008).

Carte : Clusters de pointe
Source : Ministère allemand de l'économie et de l'énergie

Labellisé Spitzencluster (« cluster de pointe ») lors de la première vague d'appels à projets de ce programme en 2008, le pôle *Solar Valley* étendu sur un large territoire du sud de l'ex-RDA a pu bénéficier de financements significatifs. Les objectifs affichés alors étaient ambitieux, à la fois en termes de formation, d'innovation et d'emplois (60 000 emplois envisagés d'ici à 2020 contre 8 500 salariés en 2008)[185].

Dans un premier temps, le marché resta limité. La situation changea dans les années 2000 grâce à une forte hausse des volumes induite par les tarifs d'achat. Certaines entreprises développèrent l'intégration verticale à travers l'acquisition ou la création de filiales, par exemple Solarworld dans la région de Freiberg avec Sunicon (producteur de silicium), Deutsche Cell (cellules photovoltaïques), Solar Factory (modules). De même, Ersol à Erfurt intégra certains de ses sous-traitants (ASi Industries ou encore Aimex Solar).

[184] Müller, J.: « Q-Cells in der internationalen Photovoltaikforschung », Intervention lors du colloque « Globalisierung von Forschung und Entwicklung der Technologie- standort Deutschland » à l'Institut für Wirtschaftsforschung Halle. Halle (Saale), 12.11.2008.
[185] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM), *Les clusters mondiaux dans le domaine des éco-technologies : enseignements, perspectives et opportunités ; 8) Solar Valley Mitteldeutschland (Allemagne)*, Paris, avril 2010.

Dans d'autres cas, des créations ex-nihilo (Solarwatt) ont contribué à structurer la filière, des entreprises existantes ont été rachetées (Elektronikwerkstoffe GmbH de Freiberg par Bayer Solar) (Brachert et al.). Les soutiens apportés à la filière, les aides fédérales allouées aux nouveaux *Länder*, les ambitions d'acteurs locaux et régionaux désireux de renouveler le tissu industriel et les tarifs d'achat ont ainsi concouru à la constitution d'une base industrielle à l'Est de l'Allemagne. La croissance du marché, la mise en place d'innovations technologiques (par exemple les couches minces) ont contribué par la suite à structurer la filière.

Si la concentration géographique de ces acteurs dans la « *Solar valley* » est avérée, un écosystème fondé sur des relations de coopération a-t-il pu pour autant être forgé ? La proximité ne suffit en effet pas (Boschma, 2005; Torre & Rallet, 2005). Brachert et al. (2013) constatent une forte densité d'accords de coopération, probablement induits par les conditionnalités inscrites dans les programmes de soutien à l'industrie photovoltaïque. De même, les acteurs industriels de la région tissèrent entre eux des liens capitalistiques du fait de l'intégration verticale choisie par certains. Enfin, des partenariats se sont noués dans le domaine de la recherche entre secteur privé et institutions académiques (SiThin Solar, Innocis). Peu à peu, des centres de formation sont apparus avec des filières spécifiques dans les Universités techniques (à Freiberg, Ilmenau, Berlin, Iéna), des initiatives des *Länder* (« Fachkräftesicherung Photovoltaik » en Thüringe) sans oublier le Centre de recherche de Halle (Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP)[186].

Au final, une concentration des effectifs est apparue autour d'un nombre de sites limités, 2/3 des 14 000 effectifs de la branche étant en 2008 rassemblés autour de Bitterfeld-Wolfen (Thalheim comprise), Freiberg, Dresde et Erfurt/Arnstadt. En somme, un espace cohérent, intégré s'est forgé en quelques années et a structuré une filière photovoltaïque naissante. Celle-ci s'est pourtant effondrée en raison de la concurrence asiatique et notamment chinoise.

L'échec d'un projet industriel

Sur les 16 sociétés autrefois cotées en bourse, 3 s'y trouvaient encore en 2018 (SMA Solar, Solarwatt) et l'ensemble du secteur a dû redéfinir son positionnement. La part de marché du pays est passé de 7% en 2000 à 15% 2008 avant de retomber à son niveau de 2000[187]. Entre 2010 et 2012, les exportations ont été réduites de moitié, dans le contexte de la mise en faillite de plusieurs acteurs (Solon, Q-Cells racheté par le Coréen Hanwha, Odersun[188]). En 2010, le secteur employait encore 133 000 salariés contre 45 000 en 2018 et la mise en faillite de Solar World en 2017 a marqué la disparition du dernier fabricant intégré de panneaux solaires.

La dynamique connue par l'industrie photovoltaïque s'apparente à l'échec, non seulement d'une ambition industrielle mais également d'une conception surannée de l'innovation. Au moment d'initier une politique de soutien aux énergies renouvelables, les autorités allemandes comptaient en effet susciter une demande interne qui favoriserait les industriels nationaux et leur ouvriraient par la suite des perspectives à l'export (Bundesregierung, 2002). Dans la loi de transition énergétique de 2008, les autorités firent explicitement référence au « *first mover advantages* » des entreprises allemandes (Bundesregierung, 2008a). Dans sa stratégie (Bundesregierung, 2008b), le Ministère de l'environnement se référa à la notion de « *lead markets* » au nom de laquelle les entreprises d'un pays qui initie un marché nouveau se voient conférer un avantage comparatif (Jänicke and Jacob, 2004). Quelques années plus tard, cette approche s'apparente à un vœu pieu. Certes, la demande n'a cessé de progresser (à l'inverse de certains autres pays européens où une bulle s'est constituée et a éclaté). Entre 2004 et 2007, l'Allemagne représentait à elle seule la moitié des capacités installées dans le monde mais la montée en puissance du marché allemand a au final coïncidé avec l'essor de l'industrie photovoltaïque chinoise.

[186] Bagdahn J.. « Solarvalley Mitteldeutschland », Intervention lors de la Conférence « Zwischen Fachkräftemangel und Solarboom », Wolfen, 13.09.2008.
[187] Kathrin Witsch, « Während der einstige Branchenführer Solarworld zum wiederholten Mal pleitegeht, steht die deutsche Photovoltaikindustrie am Scheideweg », *Handelsblatt*,02.04.2018.
[188] Kathrin Witsch, « Warum sich die deutsche Solarbranche neu erfinden muss », *Handelsblatt*, 02.04.2018.

Précisément, le soutien à la demande décidé en Allemagne aurait-il au final permis la montée en puissance de l'industrie chinoise ? Le lien entre la politique allemande et la croissance de l'industrie chinoise du photovoltaïque est probablement plus complexe mais l'idée que le soutien public apporté à un marché nouveau puisse tirer l'industrie nationale du pays concerné repose assurément sur une conception dépassée de l'économie à l'heure de la mondialisation (Beise, 2004). Dans son discours de 2000, l'un des pères des tarifs d'achat, Herman Scheer déclarait : « nous devons avoir les capacités industrielles ici, chez nous » mais en l'absence de règles instituant une préférence pour les équipements locaux (interdite par l'OMC), ces derniers ont été concurrencés par les produits chinois.

Les particularités de chacune des filières expliquent également leur trajectoire différente. Une éolienne fait appel à la fois à des matériaux innovants et à des composants traditionnels mais conçus selon des process avancés dans lesquels l'industrie allemande excellent. Un véritable écosystème constitue un atout dans la mesure où environ 8 000 composants provenant d'un millier de fournisseurs sont nécessaires (Nahm, 2017). La fiabilité requise peut expliquer que les turbiniers allemands (en position de force sur le marché mondial) tiennent aux partenariats établis avec leurs nombreux sous-traitants. En comparaison, la chaîne de valeur des panneaux solaires est plus restreinte, les sous-traitants moins nombreux et les acteurs chinois sont parvenus à force d'innovations incrémentales, de conditions de financement enviables et d'économies d'échelle à évincer leurs principaux concurrents.

À l'inverse de la filière éolienne, les ETI allemandes n'ont pas eu les capacités technologiques et les soutiens financiers leur permettant d'obtenir des économies d'échelle. Ils ont pour cette raison eu tendance à coopérer avec des partenaires chinois avant que ceux-ci ne s'arrogent l'essentiel des moyens de production. Dès 2000, Centrotherm initiait une coopération avec la Chine et y vendait une partie de sa production (Nussbaumer et al., 2007, p. 109). Entre 2000 and 2007, la part de la production allemande exportée passa de 10 à 51% (Fischedick et Bechberger, 2009, cité par Nahm, 2017). Peu à peu, les concurrents chinois s'appuyèrent néanmoins sur un accès aisé au crédit et sur un marché national en forte croissance pour réaliser des économies d'échelles et réduire leurs coûts.

Les coopérations entre acteurs allemands détenant la technologie et producteurs chinois disposant des capacités de production à grande échelle se poursuivirent. Une analyse de 178 coopérations technologiques entre l'Allemagne et la Chine entre 2010 et 2012 fit ainsi apparaître une douzaine de partenariats de ce type (Grune et al., 2012). Les partenaires chinois parvinrent à convaincre certains industriels allemands de leur concéder l'industrialisation de leurs équipements. Schmid et Centrotherm ne purent ainsi en 2009 trouver qu'en Chine des acteurs susceptible d'industrialiser leurs innovations technologiques (*selective emitter cells*). Roth & Rau Ag conclut en 2010 un partenariat similaire avec un industriel chinois autour de la technologie des couches minces (Neuhoff, 2012).

Au final, les productions chinoises envahirent le marché et nombre de producteurs allemands de panneaux solaires s'est réduit d'année en année. En 2018, 9 des 10 premiers producteurs de panneaux solaires (qui avaient à eux seuls une part de marché de 57% en 2017) au monde étaient chinois (fig. 4)[189].

Rang	Entreprise	Nationalité
1	Jinko Solar	Chine
2	Trina Solar	Chine
3	Canadian Solar	Chine
4	JA Solar	Chine
5	Hanwha Q-CELLS	Corée du Sud
6	GCL-SI	Chine
7	LONGi Solar	Chine
8	Risen Energy	Chine
9	Shunfeng (incl. Suntech)	Chine
10	Yingli Green	Chine

[189] Finlay Colville, *Top 10 module suppliers in 2017*, PV Tech, 15 janvier 2018. https://www.pv-tech.org/editors-blog/top-10-module-suppliers-in-2017.

Figure 4
Classement des 10 premiers fabricants de panneaux solaires le monde en 2017 (selon leur part de marché)
Source : PV Tech

L'exception est Hanwha, entreprise sud-coréenne, qui racheta notamment l'allemand Q-Cells et qui a des unités de production en Chine, en Malaisie et en Corée du Sud. À terme, la domination des acteurs chinois devrait se poursuivre, ne serait-ce qu'en raison de la taille du marché chinois (cf. infra) où les producteurs locaux détiennent une situation de monopole, sans qu'il faille pour autant écarter l'hypothèse d'un renouveau de la filière allemande sur de nouvelles bases.

Les termes d'un renouveau

Si le projet de constitution d'une filière industrielle dans le photovoltaïque a échoué, des nuances s'imposent. Même dans le contexte d'une large domination des acteurs asiatiques sur le marché, la valeur ajoutée qui bénéficie à l'Allemagne demeure significative. La chaîne de valeur est en effet étendue. Elle comprend un volet manufacturier (silicium, plaquettes, composants métalliques, films plastiques, verre), la production de biens intermédiaires (cellules, modules, onduleurs, câbles), la construction de sites de production et l'installation. À supposer que 80% des panneaux proviennent d'Asie, que ces panneaux représentent 60% du coût d'une installation solaire (40% résultant des onduleurs et de l'installation) et que les coûts ainsi induits constituent 60% du LCOE, 30% seulement du soutien public bénéficie aux producteurs asiatiques (Wirth, 2018).

En outre, si l'industrie du photovoltaïque s'est peu à peu déplacée vers l'Asie, certains acteurs industriels tentent de s'adapter, différentes options étant mises en œuvre une fois l'ambition de conquérir le marché de masse abandonnée. Dans la « *Solar Valley* », certains acteurs se focalisent sur des niches à forte valeur ajoutée (machines-outils, salles de production, composant spécifiques tels que onduleurs, câblage etc.). D'autres proposent désormais des systèmes intégrés ou se focalisent sur l'innovation. La technologie Perc (utilisée notamment par Hanwha) a ainsi été mise au point dans la région et, en février 2018, Solibro, filiale d'un groupe chinois depuis 2012 annonçait un rendement inédit pour des panneaux CIGS[190].

Les infrastructures de recherche publiques ou semi-publiques demeurent (par exemple le Fraunhofer Center für Silizium Photovoltaik de Halle). Si Q-Cells a été racheté par le Coréen Hanwha, lequel a délocalisé la production, le département de R&D est resté sur place. Les ventes en Europe du groupe ont été multipliées par 4 entre 2016 et 2018 et les innovations conçues en Allemagne sont industrialisées et commercialisées depuis les usines asiatiques du groupe. Avec 400 salariés, l'entreprise demeure l'un des principaux employeurs de la région de Bitterfeld[191]. SMA a également délaissé la production de masse de panneaux solaires et associe désormais ses compétences dans le solaire et dans le numérique pour proposer des solutions complètes associant équipements solaires, accumulateurs et systèmes de gestion intelligents destinés aux au marché de l'habitat collectif ou à celui des hôpitaux[192].

Solarwatt tente de se redresser en associant également équipements, accumulateurs et systèmes intelligents et profite de la croissance du marché allemand et européen[193]. Autre exemple de même nature, Sonnen propose des panneaux solaires intégrés à des systèmes de stockage et de gestion, se développe aux États-Unis et dans plusieurs pays européens, notamment avec la France dans le cadre d'un partenariat avec une entreprise énergétique française pour proposer ses solutions aux ménages français[194]. Calyxo, l'un des derniers fabricants de modules encore existants, fondée en 2005 à Thalheim et qui et compta jusqu'à 3 500 emplois poursuit sa production de panneaux à couche mince, à destination notamment de l'Asie et de l'Afrique[195].

[190] Becky Beetz, « Hanergy's Solibro achieves 18.72% CIGS module efficiency record », *PV Magazine*, 2 février 2018.
[191] Stefan Schröte, « Die Wolken sind weg Hanwha Q-Cells in Thalheim blickt positiv auf 2017 zurück », *Mitteldeutsche Zeitung*, 28.12.2017.
[192] Kathrin Witsch, « Solarfirma SMA startet mit Zuwächsen ins Jahr », *Handelsblatt*, 28.03.2018.
[193] Franz Hubik, « Deutsche Solarindustrie Und langsam geht die Sonne auf », *Handelsblatt*, 27.12.2017.
[194] Kathrin Witsch, Thomas Hanke, « Batteriehersteller Sonnen schließt Kooperation mit französischer Engie », *Handelsblatt*, 26.04.2018.
[195] Ralf Geißler, « Bitterfeld-Wolfen Im Solar Valley wird wieder eingestellt », *MDR Nachrichten*, https://www.mdr.de/nachrichten/wirtschaft/regional/solar-valley-das-bleibt-100.html. Consulté le 10 juin 2018.

Sur le plan territorial, des pôles de compétence se forment à l'écart de la « *Solar Valley* ». Dans le Bade-Wurtemberg, un groupement d'une quarantaine d'entreprises et d'instituts de recherche s'est constitué (Centre de recherche pour l'énergie solaire et l'hydrogène du Bade-Wurtemberg (ZSW). Sur les 30 000 salariés que la filière compte en 2016, la plus forte concentration s'observe désormais en Bavière. Ce *Land* et 2 autres (Rhénanie du Nord-Westphalie et Bade-Wurtemberg) concentraient à eux seuls quasiment la moitié des emplois du secteur cette année-là. Toutefois, en pourcentage de la population active locale, l'héritage de la « *Solar Valley* » demeure prégnant puisque le secteur reste important dans certains nouveaux *Länder* (Brandebourg, Thüringe, Saxe-Anhalt). Au fond, la géographie du secteur repose désormais sur 2 pôles majeurs, l'un dans la « *Solar Valley* » où subsistent quelques acteurs spécialisés dans la production de modules, l'autre dans le sud-ouest de l'Allemagne où se concentrent différentes firmes spécialisées sur des composants particuliers de la chaîne de valeur.

Quelles sont les perspectives à terme ? Sur le marché mondial, les prix des panneaux devrait poursuivre leur baisse en raison, notamment du ralentissement brutal attendu sur le marché chinois à compter de 2018. Les autorités chinoises ont en effet décidé de limiter les tarifs d'achat à un quota si bas qu'au cours des 5 premiers mois de 2018, il était déjà atteint[196]. Les capacités de production hors-quotas ne peuvent, elles, bénéficier d'aucun soutien. Ce revirement ne peut qu'encourager une guerre des prix et accélérer la recomposition du secteur. Les tentations protectionnistes en Inde ainsi que le relèvement des barrières douanières aux États-Unis, responsable de l'arrêt de nombreux projets, vont également contribuer à déprimer la demande.

La baisse des prix induite rendra encore plus aléatoire le redressement de l'industrie européenne, sauf à considérer que les avancées en matière d'innovation puissent se traduire en processus de commercialisation réussis. Ce scénario pessimiste est accrédité par les dynamiques observables ces dernières années. La part du photovoltaïque dans la production d'électricité progresse (en 2017, elle atteignait 6,7 %, les renouvelables ayant dans leur ensemble une part de 39% et durant les week-ends ou les vacances, la part du solaire peut atteindre 50% de la consommation d'électricité) (Wirth, 2018). Les taux de croissance sont néanmoins nettement plus modestes qu'au début des années 2000.

À contrario, la baisse des coûts contribue à la compétitivité du photovoltaïque, notamment par rapport à l'éolien terrestre. Dans sa concurrence avec l'éolien, le photovoltaïque progresse et les capacités installées dans le monde dépassent depuis 2016 sensiblement les capacités installées dans l'éolien. En avril 2018, le premier appel d'offres neutre qui permit de mettre en concurrence l'éolien et le photovoltaïque en Allemagne s'est soldé par une nette « victoire » de ce dernier[197] pour un coût oscillant entre €39,6/MWh et €57,6/MWh. Ainsi, la concurrence entre l'éolien et le solaire pourrait devenir un enjeu majeur pour les années à venir, le risque étant que l'éolien, la filière la plus riche en emplois pour l'Allemagne (et l'Europe) devienne de moins en moins compétitive (et de moins en moins acceptée par la population) par rapport à la filière photovoltaïque pour laquelle l'offre industrielle allemande est la moins riche.

7. Instruments, institutions, acteurs de la structuration des filières des EnR

Le soutien public apporté aux énergies renouvelables ne se dément pas depuis plusieurs décennies et a pris plusieurs formes. Selon l'OCDE, les dépenses de l'Allemagne en R&D ont suivi une courbe de croissance, le pays se classant en 2014 3ème dans le secteur des énergies renouvelables, filière la plus soutenue depuis 2010 (la recherche dans le nucléaire se stabilisant à un niveau élevé). En termes de brevets déposés, l'Allemagne avait déposé plus de 17 000 brevets dans le solaire et plus de 7 000 dans l'éolien en 2016 contre respectivement plus de 4 000 et plus de 1 000 dans le cas de la France[198].

Le nombre des brevets déposés dans le secteur des énergies renouvelables a plus que triplé entre 2007 et 2013[199]. 900 brevets ont été déposés dans la filière PV, 800 dans la filière éolienne, une dynamique qui témoigne de l'impact positif des tarifs d'achat, non seulement sur la demande, mais également sur

[196] Leslie Hook, Lucy Hornby, « China's solar desire dims », *Financial Times*, 8 juin 2018.
[197] https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/EN/2018/20180412_GEMA.html. Consulté le 2 juin 2018.
[198] IRENA. http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/?topic=1019&subTopic=1058. Consulté le 1.06.2018
[199] Craig Morris, *Renewable energy patents boom in Germany*, 21 août 2014. https://energytransition.org/2014/08/renewable-energy-patents-boom-in-germany/. Consulté le 15 juin 2018.

l'innovation. En revanche, le délitement de la filière a conduit à une chute du nombre de brevets déposés (-17,3% entre 2015 et 2016, fig. 11[200]) et près de 70% émanaient d'acteurs industriels étrangers.

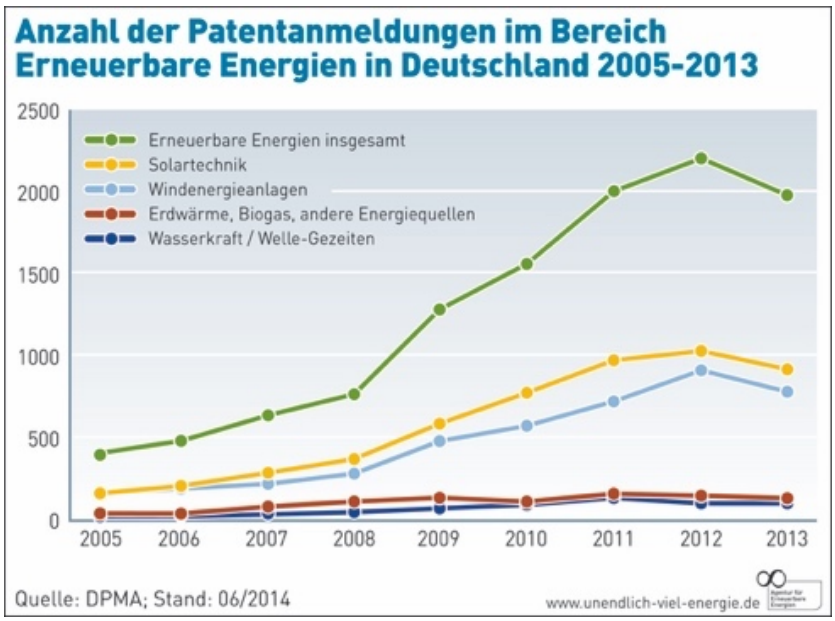


Figure 11
Brevets enregistrés dans les énergies renouvelables par l'Allemagne entre 2005 et 2013
Source : DPMA

En 2018, les principaux appuis à l'innovation étaient les suivants :

Principaux dispositifs généraux

- Spitzencluster (clusters de pointe)
Le programme « Spitzencluster » a été lancé en 2007 et a organisé 3 appels à candidature (2008, 2010 et 2011). Pour départager les candidats, le gouvernement distingue 2 étapes. Composé d'experts internationaux indépendants, un jury sélectionne 15 candidats sur la base de pré-projets. Les candidats retenus disposent ensuite de 3 mois pour préparer une stratégie sur cinq ans. Les clusters doivent apporter un financement privé d'un montant au moins égal au financement public, justifier de fortes coopérations scientifiques et avoir une stratégie internationale avérée. Les projets finalement sélectionnés disposent pour 5 années maximum d'un soutien pouvant atteindre 8 M€ par an par pôle. Parmi les 15 clusters retenus jusqu'à ce jour (fig. 7), figurent notamment la « Solar Valley ».

- Go-Cluster (87 pôles dont 11 sur l'énergie)
L'initiative Go-Cluster, moins sélective compte 87 pôles dont 11 consacrés à la thématique de l'énergie[201]. Les candidats retenus bénéficient essentiellement d'un label qui justifie qu'ils s'inscrivent dans les pratiques de l'European Cluster Excellence Initiative (ECEI). Ce label doit faciliter leur visibilité à l'international et leur faciliter l'obtention de fonds.

- Réseau des *Kompetenznetze* (centres de compétences)
Initiée en 1998, ce dispositif vise à favoriser la mise en réseau des acteurs de la recherche et de l'industrie, en lien avec les autorités régionales et sur une thématique précise. Le Ministère fédéral de l'économie et des technologies (BMWI) pilote la mise en œuvre mais la gestion des réseaux est confiée après appel d'offre à une agence et les réseaux labellisés ne perçoivent pas de financement spécifique. L'Allemagne compte une centaine de réseaux dont plusieurs relevaient en 2018 de la transition énergétique (« Batteries Lithium-Ion – KliB » par exemple).

Dispositifs dédiés spécifiquement à l'énergie

- Le Programme de recherche énergétique (Energieforschungsprogramm) se propose de soutenir l'innovation dans plusieurs volets de la politique énergétique.

Figure 8
Allocation des crédits au titre du programme « Recherche énergétique ».
Source : Ministère allemand de l'économie et de l'énergie

[200] Deutsche Patent- und Markenamt (DPMA), *Jahresbericht 2016*, Munich.
[201] Carte interactive consultée le 4 juillet 2018 et accessible sur le site Internet suivant : https://www.clusterplattform.de/CLUSTER/Navigation/Karte/SiteGlobals/Forms/Formulare/EN/karte-formular.html..

Lancé en 2011, le sixième Programme de recherche énergétique actuellement en vigueur met l'accent sur la transition énergétique. En 2016, 876 millions € ont été consacrés à ce programme, les ¾ étant investis dans les énergies renouvelables et surtout l'efficacité énergétique (fig. 8).

Au-delà de la progression constante du budget alloué depuis 2006 (400 millions € avaient alors été dépensés), on peut constater la stagnation des moyens consacrés à l'énergie nucléaire et la forte croissance des crédits alloués aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique (Ministère de l'économie et de l'énergie, 2017). En 40 années d'existence, ce programme a consacré 12 milliards € à 17 300 projets liés aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique (Ministère de l'économie et de l'énergie, 2018, p.12).Dans le seul secteur photovoltaïque, le programme a financé à hauteur de 89 millions € un ensemble de projets consacrés aux couches minces (panneaux CIGS), à l'établissement de lignes de production plus efficientes

- Le Plan d'action pour l'efficacité énergétique (NEEAP[202]) doit permettre à travers ses différentes étapes de mettre en œuvre la politique fédérale en la matière ainsi que la Directive européenne (2012/27/EU).
- La plateforme de recherche et d'innovation pour la transition énergétique (FuI- Plattform) est l'une des cinq plateformes dédiées à la mise en œuvre de la politique énergétique du gouvernement. Créée en 2015, elle a pour fonction de conseiller le gouvernement sur les différents thèmes de la recherche et de l'innovation dans le domaine de l'énergie ainsi que de rassembler les différents acteurs du secteur.

Exemples de coopération franco-allemande

- Start-up Héliatek, basée à Dresde, développe des films solaires organiques. Dirigée par un Français, elle est cofinancée par des énergéticiens français et allemands (Engie et Innogy), ainsi que par BNP Paribas (Reiche et Joya, 2018).
- Partenariat entre IPVF (Institut photovoltaïque d'Île de France) et ZSW (Centre for Solar Energy and Hydrogen Research : Bade-Württemberg).
- Plate-forme énergétique franco-allemande.

Conclusion

Pour le photovoltaïque comme pour l'éolien, l'Allemagne a conduit une politique associant soutien à la demande (à travers notamment les tarifs d'achat) et financement de l'innovation. La filière de l'éolien a bénéficié des atouts traditionnels du tissu industriel allemand, des particularités de cette industrie, du dynamisme du marché national et des initiatives lancées par les acteurs locaux et régionaux des régions littorales pour surmonter les défis de la reconversion des chantiers navals. Le développement de la filière photovoltaïque aurait pu, lui aussi, contribuer à la reconversion de régions en crise, cette fois-ci au sud de l'ex-RDA. La forte croissance que le secteur connut dans les années 90 et au cours des années 2000 s'est néanmoins heurtée aux moyens mis en œuvre par la concurrence chinoise pour industrialiser à grande échelle la production de panneaux solaires et réduire ainsi les coûts.

Si le nombre de brevets a diminué avec le rétrécissement de la base industrielle, des capacités d'innovation demeurent, non seulement dans la « Solar Valley » mais également dans le Bade-Wurtemberg ou en Bavière. Celles-ci pourraient contribuer à orienter l'industrie vers d'autres technologies que celles basées sur le silicium et accroître ainsi le rendement des panneaux solaires sans s'éloigner exagérément des équipements actuels en termes de coûts et de robustesse. La Chine détiendra toujours néanmoins un atout majeur pour les processus d'industrialisation à grande échelle avec son marché intérieur à la fois considérable et protégé. La mise sur le marché de dispositifs complexes associant énergies renouvelables, gestion intelligente de systèmes et solutions de stockage semble en revanche une voie prometteuse permettant à l'Allemagne et à l'Europe de conserver une part significative de la valeur ajoutée.

En dépit de leurs différences et de leur croissance, les filières du photovoltaïque et de l'éolien sont caractérisées entre autres par les phases de ralentissement voire les crises induites par la constitution de bulles. Le fait que les sous-traitants allemands soient pour la plupart issus d'autres filières suggère

[202] Nationale Energieeffizienz-Aktionsplan

qu'ils pourraient résister à tout ralentissement du marché et préserver leurs compétences tandis que les acteurs chinois n'ont le plus souvent qu'un marché dont ils sont par conséquent très dépendants. Cette dynamique saccadée du marché tient entre autres au rôle encore significatif joué par la puissance publique pour définir le rythme de progression des énergies renouvelables. En Allemagne comme en Chine, la demande intérieure promet de rester dynamique sur le long-terme mais la puissance publique demeure un facteur d'incertitude. En témoignent le revirement chinois opéré en 2018 sur les dispositifs de soutien ou les seuils imposés en 2017 par le gouvernement allemand sur le développement du solaire et de l'éolien.

Enfin, l'un des enjeux pour les filières allemandes est de s'inscrire dans les réseaux de firmes mondiaux (*global firm networks*). En effet, au-delà de la concurrence entre acteurs industriels asiatiques, américains, européens, les logiques de partenariat entre ces derniers ne sont pas à négliger. À l'instar des coopérations nouées entre industriels allemands et chinois dans le photovoltaïque depuis les années 2000, ces logiques – complexes à déchiffrer en raison des réticences des industriels à préciser l'origine de leurs approvisionnements – invitent à ne pas exagérer l'importance des classements hiérarchisant les turbiniers ou les fabricants de panneaux solaires. Comme le décrivent Herrigel et al. (2012) pour les secteurs allemands et chinois de l'automobile et de la machine-outil, les interactions en matière d'innovation, d'approvisionnements croisés d'un pays à l'autre invitent à appréhender l'ensemble de la chaîne de valeur dans sa complexité et à ne pas se focaliser uniquement sur la nationalité des assembliers.

Références

ADEME, 2018, *Etude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie*, Rapport final, Paris.

Arbeitsgemeinschaft Windenergie-Zulieferindustrie, 2012, Komponenten, Systeme Und Fertigungtechnik Für Die Windindustrie. Frankfurt: VDMA.

Beise, M., 2004, « Lead markets: country-specific drivers of the global diffusion of innovations », *Res. Policy* 33 (6–7), pp. 997–1018.

Brachert Matthias, Hornych Christoph, Franz Peter Franz, 2013, « Regions as Selection Environments? The Emergence of the Solar Industry in Germany from 1992 to 2008 », *European Planning Studies*, 21:11, pp. 1820-1837.

Bundesregierung, 2002, *Bericht über den Stand der Markteinführung und der Kostenentwicklung von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien* (Erfahrungsbericht zum EEG, Drucksache 14/9807), Berlin.

Bundesregierung, 2008a, *Entwurf eines Gesetzes zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich und zur Änderung damit zusammenhängender Vorschriften* (Drucksache 16/8148).

DIW Econ, 2015, *Die Beschäftigungseffekte der Energiewende*. Eine Expertise für den BWE und die Deutsche Messe AG. Berlin, avril.

Fischedick, Manfred, Bechberger Mischa, 2009, « Die Ökologische Industriepolitik Deutschlands Am Beispiel Der Solar- Und Windindustrie. Musterschüler Oder Problemkind? » Moderne Industriepolitik. Berlin: Friedrich-Ebert-Stiftung.

Grune Susann, Heilmann Sebastian, 2012, « Deutsch-Chinesische Technologiekooperation », *China Analysis*, 99, décembre.

Herrigel Gary, Wittke Volker, Voskamp Ulrich, 2013, « The Process of Chinese Manufacturing *Upgrading: Transitioning from Unilateral to Recursive Mutual Learning Relations », Global* Strategy Journal 3 (1).

Jänicke, M., Jacob, K., 2004, « Lead markets for environmental innovations: a new role for the nation state », *Glob. Environ. Polit.* 4(1), 29–47.

Janser Markus, Lehmer Florian, Möller Joachim, 2015, « Beschäftigungswirkungen der Energiewende - ein Überblick », in: Lemb W (Dir.), *Welche Industrie wollen wir? Nachhaltig produzieren - zukunftsorientiert wachsen*, Frankfurt am Main: Campus Verlag, pp. 193-214.

Heinbach Katharina, Rupp Johannes, Hirschl Bernd, Knoefel Jan, 2017, *Mehrwert einer regionalen energiewende im lausitzer und im rheinischen revier, Wertschöpfungs- und Beschäftigungspotenziale durch den Ausbau von Photovoltaik und Windenergie*, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW), Berlin, avril.

Jaeger A., 2013. « Overview of German Wind Industry Roots », in Maegaard P., Krenz A. and Palz W. (Dir.), *Wind Power for the World: The Rise of Modern Wind Energy*, pp. 407-41. Taylor & Francis, Boca Raton/Fl.

Klepper, S., 2017, « The Evolution of Geographic Structure in New Industries », in: Frenken K. (Dir.), *Applied Evolutionary Economics and Economic Geography*, Edward Elgar: Cheltenham 2007, pp. 69-92.

Menzel Max-Peter, Markus Adrian, 2018, « Modularisation and spatial dynamics in the wind turbine industry: the example of firm relocations to Hamburg », *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, 11, pp. 297–315.

Ministère allemand de l'économie et de l'énergie, 2017, *Bundesbericht Energieforschung 2017, Forschungsförderung für die Energiewende*, Berlin, mars.

Ministère allemand de l'économie et de l'énergie, 2018, *Energiedaten : Gesamtausgabe*, Berlin, janvier.

Ministère allemand de l'économie et de l'énergie, 2018, *Innovation durch Forschung. Erneuerbare Energien und Energieeffizienz:Projekte und Ergebnisse der Forschungsförderung 2017*, Berlin, février.

Nahm Jonas, 2017, « Renewable futures and industrial legacies: Wind and solar sectors in China, Germany, and the United States », *Business and Politics*, 19(1): pp. 68–106.

Neuhoff, Karsten, 2012, « The German Solar Industry », in : *Meeting Global Challenges: German-U.S. Innovation Policy*, edited by National Research Council. Washington, DC: National Academies Press.

Nussbaumer, Hartmut, Daniel Biro, Helge Haverkamp, and Karsten Bothe, 2007, « Forschung für Neue Technologien Und Ihre Wechselwirkung Mit Der Industrie », *Jahrestagung des Forschungsverbunds Sonnenenergie*, Hannover.

O'Sullivan Marlene, Edler Dietmar, Lehr Ulrike, 2018, *Ökonomische Indikatoren des Energiesystems ; Methode, Abgrenzung und Ergebnisse für den Zeitraum 2000 – 2016*, GWS research report, 2018/01.

Reiche Stéphane, Joya Laure, 2018, « La feuille de route de la décarbonation du secteur énergétique allemand », *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 2018/1 (N° 89), pp. 47-52.

Ruhl, V.; Lütter, F.; Schmidt, C.; Wacker-Bauer, J.; Triebswetter, U., 2008, *Standortgutachten Photovoltaik in Deutschland*. Kurzfassung. EuPD Research. ifo: Bonn, München 2008, p. 14.

Rutovitz Jay, Harris Steve, 2012, *Calculating global energy sector jobs: 2012 methodology*, Institute for Sustainable Futures, juin 2012.

Scott, A.; Storper, M., 1987, « High Technology Industry and Regional Development: A Theoretical Critique and Reconstruction », *International Social Science Journal*, 1 (12), 1987, pp. 215-232.

Storper, M.; Walker, R., 1989, *The Capitalist Imperative – Territory, Technology, and Industrial Growth*, Basil Blackwell: New York.

Trautwein, C., Fichter, K. & Bergset, L., 2018, *Green Economy Start-up Monitor 2017*, Borderstep Institute and University of Oldenburg.

Ulrich Philip, Lehr Ulrike, 2018, *Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern ; Bericht zur aktualisierten Abschätzung der Bruttobeschäftigung 2016 in den Bundesländern*, GWS research report 2018 / 02, März.

Wirth Harry, 2018, *Recent Facts about Photovoltaics in Germany*, Fraunhofer ISE, 21 février.

Wörlen Christine, Keppler Lisa, Holzhausen Gisa, 2017, *Arbeitsplätze in Braunkohleregionen – Entwicklungen in der Lausitz, dem Mitteldeutschen und Rheinischen Revier*, Kurzstudie für die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen, Berlin, juillet.

Chapitre 5. Structuration des filières de la transition en Bavière

Rachel Guyet

Introduction

Selon l'agence nationale allemande de l'énergie (dena)[203], « *le passage à un avenir bas carbone transforme l'économie. Les politiques publiques ont un rôle central à jouer mais en fin de compte ce sont les entreprises qui réaliseront la transition énergétique.* » La dena ajoute que si l'Allemagne a été pionnière dans la première phase de la transition énergétique avec le déploiement rapide des énergies renouvelables, elle doit dorénavant affronter une nouvelle phase, celle de l'intégration de l'ensemble des secteurs afin de répondre au triple défi de la décarbonisation, de la décentralisation et de la digitalisation de l'énergie[204]. Ces deux citations soulignent l'importance des politiques énergétiques pour encadrer la transition énergétique, l'investissement des entreprises dans les nouvelles technologies et les nouveaux services et l'élaboration d'une vision globale de la transition énergétique pour dépasser la seule approche sectorielle qui domine à ce jour.

Confrontée à la fermeture des centrales nucléaires sur son territoire, la Bavière a pour objectif principal d'assurer sa sécurité énergétique qu'elle traduit par les choix stratégiques suivants : plutôt que développer des filières industrielles dans les énergies renouvelables, le ministre de l'économie, de l'énergie et de la technologie a orienté sa politique énergétique vers la sécurisation de son approvisionnement à travers les innovations technologiques qui permettent d'harmoniser et d'équilibrer l'offre et la demande. Ce choix se décline dans la mise en œuvre d'un cluster dédié à l'énergie et d'une politique d'investissement dans la R&D dans les technologies de pointe pour développer l'intégration sectorielle, consolider les réseaux et réduire la consommation énergétique. La politique de soutien à l'innovation sur le segment des technologies se développe notamment sur l'aval du secteur énergétique : gestion de la demande par la digitalisation, stockage, réseaux intelligents et mobilité électrique.

Depuis le milieu des années quatre-vingt-dix, la politique énergétique bavaroise repose ainsi sur trois piliers : un concept énergétique qui soutient l'offre quantitative et qualitative de technologies propres, un cluster Energie qui vise à faciliter le transfert de technologies entre recherche et industrie et une politique de R&D pour développer l'innovation énergétique. Ce faisant le gouvernement bavarois cherche à positionner le « *Standort Bavière* » comme un acteur incontournable de l'avenir de la transition énergétique.

La première partie de ce rapport se concentre sur les enjeux énergétiques de la Bavière pour expliquer la stratégie que ce *Land* a choisi de déployer. La deuxième partie est consacrée à la politique de l'innovation soutenue par le gouvernement. La troisième analyse le rôle de quelques acteurs clés dans la mise en œuvre de cette politique. La dernière partie met en avant quelques-uns des impacts de cette politique tout en en soulignant quelques limites.

1. Les enjeux énergétiques de la Bavière

La stratégie énergétique de la Bavière constitue une réponse à plusieurs enjeux clés. La sécurité énergétique menacée par la fermeture des réacteurs nucléaires doit être compensée par le déploiement des énergies renouvelables, elles-mêmes confrontées à un manque d'acceptation sociale.

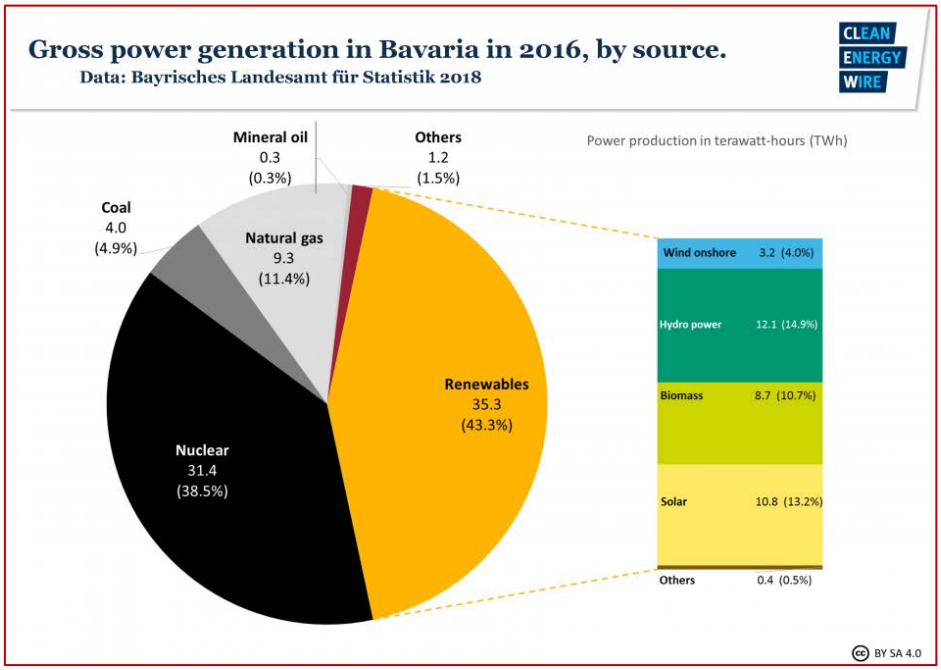
La fermeture des réacteurs nucléaires

L'enjeu énergétique central de la Bavière tient à la fermeture des réacteurs nucléaires et, dans une moindre mesure, à la fin programmée du charbon. La fermeture des réacteurs nucléaires qui couvraient près de 50% des besoins du *Land* pose un défi énergétique conséquent à la Bavière, 2ème *Land* allemand en matière de population avec 12,9 millions d'habitants et parmi les régions allemandes les plus dynamiques économiquement (Langer et al. 2016). Elle affiche un PIB en hausse de 18,3% entre 2010 et 2017 pour atteindre 594 milliards d'euros. Or, la Bavière ne veut pas dépendre de l'importation de l'électricité nucléaire des pays voisins ni des importations de charbon. Ce risque de dépendance est

[203] https://www.cleanenergywire.org/news/energy-transition-start-ups-shake-business-world
[204] Entretien mars 2019

d'autant plus important que l'énergie nucléaire représentait près d'un quart de la consommation primaire d'énergie (25,0% en 1996 et 23,4% en 2012). Elle était produite par 4 centrales, à Isar, Grafenrheinfeld, Grundemmingen, qui doivent être fermées d'ici 2022, la première celle de Grafenrheinfeld ayant arrêté son activité en 2015 (Leipziger Institut 2015). La fermeture des centrales nucléaires d'ici à 2022 risque de créer un déficit de 25 milliards de KWh par an pour la Bavière, soit un déficit d'approvisionnement de 30% pour couvrir les besoins d'électricité de la population et de la puissante industrie bavaroise. Il doit être compensé par les centrales à gaz combinées aux ENR, à l'amélioration de l'efficacité de la production et des réseaux, au développement des capacités de stockage et à la réduction de la consommation.

Les ambitions bas-carbone



Pour répondre à l'enjeu de substitution de l'énergie nucléaire et de sécurité énergétique, le gouvernement bavarois a élaboré en 2011 son concept énergétique (*Energie Innovativ*) qu'il a construit autour de trois piliers :

- L'utilisation efficace de l'énergie, y compris les économies d'énergie, le stockage et l'amélioration de l'efficacité énergétique de la production à la consommation,
- La production durable d'électricité, fondée sur les renouvelables (hydroélectricité, solaire, biomasse, éolien), le gaz et la digitalisation de l'énergie,
- Et l'amélioration des réseaux, notamment dans l'investissement des « autoroutes électriques » entre le nord et le sud et dans les réseaux de distribution intelligents. Les grands projets de construction de réseau sont toutefois freinés notamment en raison de l'opposition de la population bavaroise.

Aucune stratégie industrielle n'accompagne ce concept. Il s'agit plutôt d'assurer la sécurité de l'approvisionnement en réduisant la demande d'énergie, en rendant la production des énergies plus efficace afin de diminuer le besoin de déploiement massif et les risques de conflits d'acceptation sociale et en promouvant les nouvelles technologies pour optimiser leur usage. Aussi le concept énergétique bavarois affiche-t-il les ambitions suivantes :

- Une réduction des émissions de CO_2 pour atteindre 5,5 tonnes par habitant maximum d'ici 2025 par rapport aux 6,2 t CO_2 par habitant en 2010 (stmwi 2016). Les entreprises bavaroises doivent contribuer à développer les technologies adaptées à cet objectif et les commercialiser sur les marchés mondiaux.

- Pour réaliser la transition énergétique, la Bavière souhaite que la consommation d'électricité en 2021 se maintienne au même niveau qu'en 2011 c'est-à-dire autour de 85 milliards kWh par an (Bayerische Staatsregierung 2011). L'équation s'avère difficile pour la Bavière puisque sa capacité de production domestique diminue avec la fermeture des centrales nucléaires alors que la demande

tend à augmenter en raison de l'électrification de différents secteurs (transport, chauffage notamment).

- La part des énergies renouvelables doit atteindre 70% dans la production brute d'électricité d'ici 2025 et 50% d'énergies renouvelables dans la consommation d'électricité d'ici 2021. D'importants efforts ont été consentis. La part des énergies renouvelables dans la production brute d'électricité est passée de 25,9% en 2010 à 36,2% en 2014 (stmwi 2016).

Au-delà de l'objectif général d'accroissement de la part des renouvelables, la pression citoyenne contre l'énergie éolienne et le faible potentiel éolien de la région ont conduit le ministère à privilégier le recours au solaire. Certes, l'éolien n'est pas exclu du mix énergétique bavarois mais les difficultés d'implantation des turbines rendent l'objectif incertain. Seul 0,6% de la surface du *Land* pourrait être utilisée pour l'éolien, une fois retirées les zones protégées (naturelles, habitations, infrastructures). Ainsi, la part de l'éolien dans la production d'électricité brute est passée de 0,7% en 2010 à 2% en 2014 et à 5,4% en 2017[205]. Cependant son rythme de développement est ralenti depuis l'introduction d'une distance minimale entre les installations et les habitations qui doit correspondre à dix fois la taille des turbines, répondant en cela aux protestations des citoyens (stmwi 2016). Il semble alors difficile d'atteindre l'objectif de 6 à 10% d'énergie éolienne dans la production d'électricité fixé à 2021 dans le concept énergétique bavarois. En effet, cet objectif correspond à environ 1000-1500 nouvelles turbines. En 2016 seulement 937 turbines avaient été installées. La règle de « 10H » équivalant à la distance minimale entre habitations et éoliennes ne pouvait que ralentir le déploiement de l'éolien, ce qui a amené le gouvernement bavarois à réduire son ambition dans ce secteur (Langer et al. 2016).

En revanche, la Bavière affiche un niveau d'ensoleillement parmi les meilleurs en Allemagne. La part du PV dans la production brute d'électricité a plus que doublé en passant de 4,8% à 11,8% entre 2010 et 2014. Les panneaux sont essentiellement installés sur les toitures et le long des autoroutes et des chemins de fer pour les fermes solaires au sol. De plus, cette énergie permet aux citoyens-investisseurs de bénéficier économiquement du déploiement du solaire et facilite l'acceptation de cette technologie. Ce faisant, la qualité de l'ensoleillement et l'acceptation de cette technologie et de son mode de déploiement par la population expliquent pourquoi le concept énergétique bavarois prévoit que 16% de la production d'électricité doit provenir du solaire PV tandis que le solaire thermique doit pouvoir couvrir 4% de la consommation d'énergie d'ici 2021 (Energieinnovativ 2013, Stmwi 2016).

Il est également intéressant de noter que la bioénergie a toute sa place dans le concept bas carbone du *Land*. Elle est perçue comme un moyen de compenser l'intermittence des énergies renouvelables et de contribuer à la sécurité énergétique. Elle vise également à renforcer l'économie locale, notamment dans le milieu rural, et à créer de la valeur dans les zones rurales. D'ici 2021, elle pourrait représenter entre 9% et 10% de la consommation d'électricité en Bavière. Pour y parvenir 15% de la surface agricole, soit 3,2 millions d'ha, devrait être destinée à l'usage énergétique. Cet objectif dépend de la résolution des conflits d'usage et de la discussion environnementale sur l'affectation des sols. Ce land vise également à mobiliser toutes les ressources végétales possibles (déchets organiques, paille, bois) associées à des technologies efficaces tels que la gazéification (*Bayerische Staatsregierung* 2011).

L'hydroélectricité, déjà bien déployée en Bavière, continue de jouer un rôle important dans le mix bavarois à l'horizon 2021. Le développement et la modernisation des installations hydroélectriques et le déploiement de la petite hydroélectricité doit permettre de couvrir 17% de la consommation régionale d'ici 2021. Mais la grande hydro-électricité est exclue à défaut de ressources.

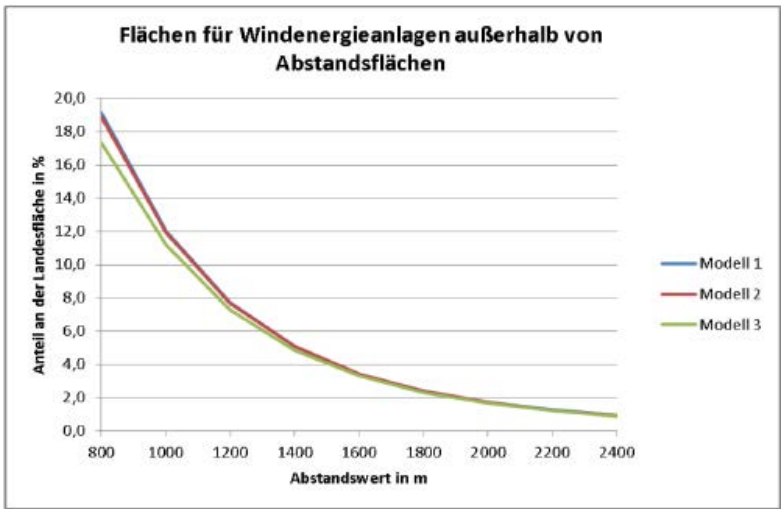
L'acceptation sociale

Comme dans de nombreux autres *Länder*, la Bavière est confrontée à d'importantes résistances contre l'éolien. Ces conflits opposent deux camps : les tenants de l'éolien, que sont la fédération de l'éolien (BWE), les coopératives citoyennes, les grandes organisations environnementales telles que BUND ou NABU qui soutiennent le modèle de transition énergétique allemande ; les opposants qui regroupent des profils très variés qui vont des organisations de défense du paysage, de la faune, de la flore, des urbains mécontents de payer les taxes qui profitent aux agriculteurs qui louent leurs terrains aux

[205] https://www.energieatlas.bayern.de/thema_wind/daten.html

entreprises énergétiques et des habitants qui défendent tradition et paysages régionaux. De plus en plus souvent les conflits sont violents au sein même des villages concernés et renvoient face à face les tenants du climat et les tenants de la nature. Le manque d'acceptation sociale des turbines se traduit par une perte de confiance dans le modèle de la transition énergétique et des pertes financières conséquentes pour de nombreux projets. Certains conflits peuvent même aller très loin à l'instar de la commune de Starnberger See où le conseil municipal avait voté en faveur de l'installation de turbines sur la commune mais où le maire a reçu des menaces de mort de l'opposition anti-éolien[206].

Pour répondre aux conflits liés à l'acceptation sociale des turbines éoliennes, la Bavière a imposé des régulations drastiques concernant les distances de protection à respecter. L'article 82 du code de construction bavarois (Art. 82 Abs. 1 Bayerische Bauordnung – BayBO) introduit en 2014 la règle du « 10H », c'est-à-dire que la distance entre une éolienne et une habitation doit être de dix fois la hauteur de l'éolienne. Autrement dit, une éolienne de 100 mètres de hauteur doit respecter une distance d'un kilomètre par rapport aux habitations. Dans la mesure où la taille des éoliennes ne cesse d'augmenter, il devient de plus en plus difficile de construire des turbines. Le graphique[207] ci-contre montre la réduction drastique des surfaces disponibles pour l'éolien qui représentent moins de 1% du territoire bavarois, selon certains auteurs (Langer et al. 2016).



Cette situation a conduit à une baisse du nombre de demande de permis de construire : de 336 demandes en 2014 à 25 après la décision de mettre en place la règle des « 10H » (Langer et al. 2016). Certes, cette règle évite les conflits avec les habitants vivant à proximité, mais elle réduit également le potentiel éolien en le limitant au petit éolien. Alors que l'acceptation sociale pour l'éolien en général est assez élevée en Allemagne, l'opposition contre les projets locaux est réelle. En 2016, 39% de la population allemande refuse les turbines à proximité et proteste contre les projets qui affectent leur environnement direct (Langer et al. 2016). La nouvelle règle « 10H » décidée par le gouvernement bavarois cherche certes à rassurer les citoyens mais peut à l'inverse renforcer les doutes des citoyens face à cette technologie et consolider la position des anti-éoliennes. En outre, les parcs éoliens sont concentrés dans les régions de Haute Franconie et du Haut Palatinat au nord et à l'est du territoire bavarois. Cette concentration alimente le sentiment d'inégalités et d'injustice entre les habitants des régions qui subissent l'éolien et les autres qui en profitent. Les difficultés liées à l'acceptation sociale de cette ressource ont contribué à motiver le gouvernement à opter pour le soutien à l'innovation et à une approche holistique de la transition énergétique.

2. La politique de l'innovation du ministère de l'énergie bavarois

Le trait marquant de la politique énergétique bavaroise tient à la volonté du gouvernement de penser la transition énergétique dans sa globalité. Cette approche renvoie à trois grands domaines d'intervention du ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie complétée par celle du ministère des sciences et des arts :

- L'amélioration de l'efficacité énergétique tant dans la production que dans la consommation d'énergie dans le secteur industriel et résidentiel. Un soutien est ainsi apporté à des projets qui

[206] https://www.br.de/nachrichten/wissen/herrscht-bei-der-windenergie-in-bayern-flaute,RP7fTwn
[207] http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Home/Topthemen/Hintergrundpapier_windenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=6

visent l'amélioration de l'efficacité des installations éoliennes, la réduction des coûts pour le solaire PV, la production par la biomasse et les nouvelles technologies tels que l'élastomère.

- Le développement des technologies de stockage. Plusieurs technologies existent déjà mais ne sont pas intégrées dans la gestion quotidienne de l'énergie renouvelable. C'est la raison pour laquelle, le gouvernement bavarois a choisi de soutenir les activités de R&D dans les systèmes de stockage chimiques, thermiques et électriques et de poursuivre la R&D sur l'hydrogène qui est utilisé depuis 1995 en Bavière.

- Le développement des réseaux, notamment grâce aux réseaux intelligents. Cette stratégie doit permettre d'intégrer le volet digitalisation de l'énergie mais également de répondre aux problématiques de fiabilité de l'approvisionnement et de stabilité des réseaux. Des projets de recherche sur l'intégration des réseaux à l'échelle régionale, fédérale et européenne sont ainsi portés par le ministère de l'énergie bavarois par l'intermédiaire du cluster Energietechnik.

Les raisons du choix du gouvernement bavarois

Au-delà de l'enjeu crucial de compenser la fin du nucléaire et du charbon par les renouvelables et les technologies qui permettent d'intégrer offre et demande, plusieurs autres raisons expliquent la stratégie de la Bavière de miser sur l'innovation plutôt que sur le volet industriel.

La première tient à l'échec de la politique industrielle liée à l'énergie solaire. La Bavière en a tiré des leçons. Selon le ministère « *on a fait beaucoup d'efforts d'investissements dans le solaire mais la production est vite partie en Chine, on cherche à apprendre de cette expérience et on veut empêcher que cela recommence, c'est la raison pour laquelle nous avons choisi de miser sur l'innovation* »[208]. L'expérience de l'entreprise solaire Schott Solar illustre cette problématique. Schott Solar, entreprise emblématique du secteur solaire bavarois, n'a pu résister à la concurrence des panneaux chinois et a décidé de fermer son entreprise de production à Alzenau dès 2011. En revanche, l'entreprise a décidé de poursuivre la recherche afin d'améliorer les produits fondés sur la technologie PERC (*passive emitter and rear contact*).

L'amélioration de l'efficacité de cette technologie fait l'objet des recherches de l'entreprise. Leur aboutissement permettrait de développer des panneaux solaires sans recourir au métal argent dans le processus de production. Des tests sont effectués en coopération avec l'institut Fraunhofer-ISE sur cette technologie. Dans cette entreprise, l'emploi dans les unités de production s'est réduit alors que l'emploi dans le segment de la R&D s'est maintenu (perte de 230 emplois dans le secteur manufacturier sur 420). Une dizaine de grandes entreprises du secteur solaire employaient 1976 salariés en 2016 (stmwi, 2017). Trois sont particulièrement connues telles que Flabeg GmbH, spécialiste des réflecteurs solaires, Sunselex Solar Energy Systems GmbH, construction et assemblage de systèmes solaires, conseil et maintenance, IBC Solar, fabrication de modules solaires, onduleur, stockage et autres composants et B2B. Mais il s'agit moins d'entreprises de production de panneaux solaires que d'entreprise offrant d'autres services ou des produits intégrés (panneaux et stockage par exemple).

L'avantage concurrentiel de ces entreprises porte sur les produits innovants, dans la mécanique, l'électrotechnique, dans le traitement de données et le service. 800 entreprises, de taille très variable, restent actives en Bavière dans le secteur solaire et du stockage, de la production et comptent des fournisseurs de matières premières, des artisans, des opérateurs, des financeurs, des développeurs et des bureaux d'études. Le gouvernement bavarois peut ainsi compter sur ce réseau d'entreprises pour mettre en œuvre son plan solaire mais n'envisage pas de consolider la filière de production compte tenu de l'histoire de cette dernière. En revanche, il soutient la R&D du secteur.

Contrairement à des *Länder* comme le Brandebourg, champion de l'éolien, la Bavière ne peut compter sur cette ressource pour contribuer à sa sécurité énergétique. La topographie de la région (montagnes et forêts), la faiblesse des surfaces disponibles et des couloirs de vent réduisent le potentiel éolien du *Land*. Le renforcement du code de construction et les zones de protection autour des habitations en réponse aux conflits avec les citoyens et les organisations environnementalistes contribuent à rendre

[208] Entretien avec l'auteur, mai 2019.

l'éolien peu attractif. Outre les conflits anti-éolien, la Bavière est également confrontée au manque d'acceptation sociale concernant la construction des lignes à haute tension, « les autoroutes » électriques qui relient les installations de production au nord (éolien offshore notamment) vers les centres de consommation en Bavière. Elle a fait le choix d'enterrer ces lignes pour limiter la résistance mais au détriment du coût de la construction.

Le manque d'acceptation sociale d'installations qui perturbent les paysages représente l'autre raison qui pousse le gouvernement bavarois à envisager la transition énergétique sous l'angle de l'innovation et de l'harmonisation entre offre et demande. Ainsi les technologies, telles que la digitalisation ou le stockage sont censées optimiser les infrastructures existantes et réduire le besoin de construction de nouvelles et contourner ainsi les risques de conflits associés à la construction de nouvelles installations qui dénaturent l'environnement des citoyens.

En outre, la Bavière est confrontée à une situation économique particulière. Elle connaît une croissance continue depuis 2014 même si le taux de croissance s'est ralenti depuis 2018 pour atteindre 0,9% au printemps 2019. Parallèlement en juin 2019 le taux de chômage en Bavière atteignait 2,6%, autant dire que la Bavière connaît le plein emploi[209]. Face à cette situation, le gouvernement ne cherche pas à développer de nouveaux secteurs industriels fondés sur les renouvelables car les entreprises sont confrontées à un manque de main d'œuvre. Le développement industriel, économique et la création d'emploi ne se trouvent donc pas au cœur des choix énergétiques du *Land*. C'est la troisième raison qui conduit le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie à privilégier une approche par l'innovation. Enfin, de tradition innovante, le Land souhaite maintenir son identité technologique et place l'innovation au cœur de la politique énergétique dans le but d'augmenter la compétitivité du « *Standort Bavière* » sur le marché mondial et de promouvoir la création de valeur en Bavière. Cette compétitivité passe moins par la présence d'un fort secteur industriel énergétique que par des activités de R&D. Devenir pionnière des nouvelles technologies nécessaires à la réussite de la transition énergétique devient alors la priorité sans réel souci de l'impact sur l'emploi.

Une politique de l'innovation de longue date

L'exemple de la Bavière illustre la manière dont la politique régionale de cluster développée depuis 1994 par le gouvernement bavarois a conduit à concentrer un savoir-faire hautement spécialisé au sein des entreprises et des institutions de recherche régionales dans le secteur énergétique, pour apporter ce que Porter nomme « *un avantage concurrentiel dans l'économie globale ancré localement* » (Falck et al. 2010 : 574). Le soutien à l'innovation, à la compétitivité, à l'énergie et aux clusters s'est adapté aux évènements extérieurs (la décision d'accélérer la fermeture des centrales nucléaires par le gouvernement fédéral en 2011), aux besoins régionaux (déploiement des énergies renouvelables et amélioration de l'efficacité énergétique) et à la volonté régionale de maintenir son atout compétitif majeur de *Land* innovant, traduction d'une longue tradition en Bavière. Le gouvernement bavarois cherche ainsi à utiliser le secteur énergétique pour contribuer au développement et à la compétitivité du « *Standort Bavière* ».

Le soutien à l'innovation en Bavière fait partie de l'identité de cet État allemand et reflète une politique « top down » décidée par le gouvernement bavarois. Dès le milieu des années quatre-vingt-dix, l'autorité publique régionale décide de soutenir la mise en réseau entre recherche et industrie afin de stimuler la compétitivité régionale. Bien qu'à l'époque la politique du gouvernement bavarois ne porte pas encore le nom de « politique de cluster » au sens de M. Porter, les objectifs de mise en réseau entre recherche, industrie et finances et d'amélioration des facteurs de compétitivité des entreprises bavaroises se rapprochent d'une politique de cluster.

Si une politique publique ne peut pas contraindre les acteurs à la coopération, elle peut en revanche établir les infrastructures, l'environnement et les incitations qui peuvent inviter au rapprochement et créer les effets « d'économies d'agglomération » à l'échelle régionale (Falck et al. 2018). Initialement, le gouvernement bavarois a cherché à renforcer les compétences spécialisées dans certaines technologies énergétiques de pointe, à augmenter la dynamique d'innovation et à renforcer l'identité régionale

[209] https://www.statistik.bayern.de/produkte/biz/index.html

orientée vers l'innovation. Elle a misé davantage sur la mise en réseau pour augmenter le potentiel d'innovation qu'à couvrir l'ensemble de la chaîne de création de valeur (Kulicke 2008).

Dès 1994, le gouvernement investit 2,9 milliards d'euros dans un programme pour l'avenir « *Offensive Zukunft* ». Les fonds investis proviennent de la vente des parts et actifs régionaux que le gouvernement détient dans les entreprises publiques (tels que l'entreprise publique de l'énergie Bayernwerk). Les recettes sont alors saupoudrées sur l'ensemble des secteurs économiques, dont 356 millions d'euros sont dédiés à la protection de l'environnement et au déploiement des énergies renouvelables. La nature généraliste du programme cherche à améliorer les facteurs de compétitivité « soft » et « hard » et à attirer investisseurs et entreprises (Falck et Kipart 2010).

A l'issue de ce programme quinquennal, le gouvernement décide de concentrer les fonds publics sur l'innovation dans la haute technologie. Dès 1999, cinq secteurs deviennent prioritaires : les sciences de la vie, la technologie de l'information et de la communication, les nouveaux matériaux, les technologies de l'environnement (qui comprennent également l'énergie) et la mécatronique. Cette politique représente un investissement de 1,35 milliard d'euros et vise à organiser des regroupements régionaux d'entreprises et d'instituts de recherche afin d'améliorer la capacité d'innovation de ces secteurs (Falck, Kipar 2010).

Il s'agit de la première politique régionale de ce type en Allemagne qui se fonde sur 4 piliers : l'amélioration des institutions de recherche universitaires et hors universités, le développement d'innovations technologiques, la mise en réseau des entreprises avec la recherche, les universités et les réseaux de pépinières d'entreprises pour disposer d'une main d'œuvre qualifiée et enfin le soutien à l'internationalisation des entreprises régionales. S'y ajoute un soutien à la qualité de vie et aux infrastructures de transport en Bavière afin de rendre la région attractive pour tout investisseur et tout salarié qualifié dans les secteurs prioritaires (Falck, Kipar 2010).

En 2004, un nouveau programme *Allianz Bayern Innovativ* remplace la politique précédente et identifie 19 champs technologiques. Puis, en 2006, le gouvernement transforme cette initiative en un soutien à des clusters « *Cluster Offensive Bayern* » concentrés sur l'innovation dans 17 champs de compétences organisés autour de cinq grands secteurs que sont la digitalisation, l'énergie, la santé, les matériaux et la mobilité (Bayerisches Stmwi 2017). Bien avant la définition de son concept énergétique en 2011, le gouvernement bavarois a investi le champ énergétique pour promouvoir l'innovation. En 2006, un budget de 45 millions d'euros a été accordé sur cinq ans à cette initiative. Sur la période 2012-2015, un budget complémentaire de 22 millions d'euros a été adopté par le parlement régional (Jungwirth, Müller 2014). Cette structure prévaut encore aujourd'hui et vise à générer les effets d'agglomération positifs, tels que le transfert technologique, la mise à disposition de salariés qualifiés ou l'accès aux marchés internationaux. Depuis le lancement de la première initiative, le soutien à cette politique de cluster ne s'est pas démenti.

La nouvelle coalition au pouvoir depuis novembre 2018 (la 2ème seulement au cours des 50 années de l'histoire politique bavaroise) entre la CSU et le parti des électeurs libres (FW, Freie Wähler) s'inscrit dans la continuité de cette politique. Le premier ministre bavarois réélu, Markus Söder (CSU), a confirmé que la production régionale d'électricité propre constituait une priorité de son gouvernement. Il entend que son Land joue un rôle majeur dans le secteur solaire, géothermique, hydraulique et dans la bioénergie, comme c'était le cas dans la législature précédente. Le parti de coalition, le FW, hérite du portefeuille de l'économie, de l'énergie et de l'agriculture d'une part et de l'environnement et de l'éducation d'autre part. Ce changement de leader ne devrait pas modifier fondamentalement la ligne bavaroise en matière énergétique dans la mesure où le FW, parti conservateur, est très engagé en faveur de la protection de l'environnement et de la décentralisation de l'énergie. Les deux partis appellent à une sortie du charbon. A noter que le parti des Verts a atteint un score record en Bavière. Avec 17,5% des voix, il représente le 1er parti d'opposition loin devant le SPD (9,7%).

Des investissements conséquents

Le seul budget du ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie atteint 40 millions d'euros. S'y ajoute le budget R&D du Land bavarois, également conséquent. En 2015, il représente 3,26% de son PIB. Pour la période de 2005 à 2012, le gouvernement bavarois a accordé 163,7 millions d'euros d'aides

sous formes de crédit et 31,8 millions d'euros de subventions. Sur la même période des programmes spécifiques ont contribué à financer la R&D dans des domaines tels que les matériaux avancés (43 millions€), les technologies des microsystèmes (27,9 millions€), les technologies de l'information et de la communication (60,2 millions€), l'électromobilité (5,6 millions€ depuis 2010), l'utilisation et la production efficace de l'énergie (64,8 millions€) (Falck et al. 2010). L'aide à la R&D dans les technologies de l'énergie propre ne s'est pas démentie au fil du temps comme le montre le tableau ci-dessous. Il montre également que l'ensemble des ministères sont mobilisés pour soutenir la R&D dans les domaines énergétiques qui leur sont propres (bioénergie pour le ministère de l'agriculture, stockage, smart grid, efficacité énergétique pour le ministère de l'énergie).

Mesures	Durée / date	Budget (millions €)	Exemples
Soutien à la R&D			
Programme de soutien à la recherche appliquée dans les établissements d'enseignement supérieur	2014-2017	10.8	
Soutien à la construction d'installations de recherche	2011-2013	241.4	Dont le centre de nanotechnologie
Soutien à l'acquisition d'appareils de recherche	2011-2013	100.9	
Cluster offensive	2012-2015	22	
Aide à l'innovation des PME	2012-2015	20	
Soutien aux 16 centres de transfert de technologie	Depuis 2011	42.5	
Soutien aux clean tech			
Fabrique solaire du futur	2014	2.8	Campus Energie de Nuremberg
Institut Helmholtz Erlangen-Nuremberg pour les ENR	2013-2018	37	Notamment pour la coopération à long terme avec le centre de recherche Jülich, le centre Helmholtz de Berlin et la FAU
Développement pour les procédés énergétiques, de l'environnement	2014	8.35	Fraunhofer, Sulzbach Rosenberg
Développement d'un centre pour le stockage de l'énergie	2014	20	Fraunhofer, Sulzbach Rosenberg
Développement de techniques de stockage électrochimique	2014	20	Fraunhofer, Garching
Centre Fraunhofer d'application « efficacité des ressources »	2014	2.5	Fraunhofer, Alzenau
Centre bavarois pour la recherche énergétique appliquée	2014	Financement annuel : 4 millions€	ZAE Fraunhofer Würzburg, Erlangen, Garching
11 projets dans le cadre du programme Aufbruch-Bayern-Energie Innovativ pour la transition énergétique : 8 projets	2012-2016	147.43	Solar Technologies Go Hybrid (50.55) TUM Energy Valley (technologies des centrales) (10) Centre de compétence sur la cogénération (5.23) E/home centre (7.5)

de recherche et 3 projets structurels financés par le ministère bavarois de la formation, la culture et la science			Centre bavarois de l'hydrogène (15) Concept stratégique pour les systèmes énergétiques du futur (3.65) Green Factory Bavaria (Münich, Nuremberg) (12) Centre TUM pour l'énergie et l'information (16.5) Alliance technologique Oberfranken (secteur énergétique) (12.5) Campus technologique de Nuremberg (secteur énergétique) (9.5) Centre scientifique de Straubing (5)
13 mesures financées par le ministère bavarois de l'économie, de l'énergie et de la technologie	2012-2017	293.85	Fraunhofer pour le stockage de l'énergie (20) DEGREEN (générateurs élastomères) (Fraunhofer ISC Würzburg, IISB Erlangen) (8) Bavière autarcique en énergie (Fraunhofer IISB, IIS Erlangen, ISC Würzburg) (23) Green Factory Bavaria (Bayreuth, Augsburg) (15) Centre pour une gestion de l'énergie plus sûre (Garching) (8) Centre pour les techniques appliquées de stockage de l'énergie (ZAE-ST, Garching) (8) Fédération technologique Smart Grids (36) BayINVENT – efficacité énergétique et technologies de l'énergie (81.6) Projet sur la stratégie des ressources et les matériaux (IWKS, Alzenau) (28.75) Bioéthanol 2ème génération (20) Stockage de l'énergie stationnaire décentralisé (Garching) (30) Modélisation « smart grid solar » (Hof, Arzberg) (7) Utilisation efficace de la chaleur dans les procédés industriels (Enertherm, Fraunhofer HTL, Bayreuth) (9.5)
7 mesures financées par le ministère de l'environnement	2012-2015	15	Techniques de recyclage pour l'énergie
4 mesures financées par le ministère de l'agriculture et de la forêt	2012-2015	33.10	Valorisation de la biomasse

Tableau : Diversité et montant des sources de financement à l'innovation
Source : Energie Innovativ, 2013, *Energieforschung und –technologie in Bayern*

3. Les acteurs clés

La politique de l'innovation bavaroise dans le secteur énergétique est rendue possible grâce à un système d'acteurs qui combine sphère publique et privée, industrie et recherche, niveau régional et local. Elle est portée, encadrée, financée et orientée par le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie qui a créé un instrument dédié, le cluster Energietechnik. Ce dernier sert de plateforme pour les grandes et petites entreprises ayant un lien direct ou indirect avec l'énergie, les régies municipales et les institutions de recherche. Ce faisant, la politique de l'innovation bavaroise reflète la structure industrielle régionale, les institutions impliquées de longue date dans la politique économique et énergétique, le soutien politique traditionnelle du parti bavarois ainsi que la culture de l'innovation, marque de fabrique de la Bavière (Alic & Sarewitz 2016).

Le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie (StMWI)

Le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie est l'acteur à l'origine de la construction de la politique de cluster spécialisé sur l'énergie. Il est responsable de la stratégie de recherche appliquée au secteur énergétique. D'autres ministères, tels que le ministère de l'environnement ou le ministère des sciences et des arts, peuvent être amenés à financer d'autres initiatives, le premier dans les technologies de protection de l'environnement, le second dans la recherche fondamentale. Des interfaces existent entre les différents projets soutenus par les uns et les autres notamment dans le secteur énergétique. Si le soutien à l'innovation et à la politique des clusters est trans-sectoriel en Bavière, c'est au ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie que revient la compétence de la politique de l'énergie. Le ministère dispose d'un budget de 40 millions d'euros pour la recherche appliquée, libre à lui de déterminer comment l'utiliser.

Le ministère a fait le choix de penser l'intégration de l'offre et de la demande d'énergie dans son ensemble. C'est la raison pour laquelle, il a choisi de soutenir des projets liés à l'intégration sectorielle et à l'efficacité énergétique en misant sur trois secteurs : électricité, chaleur et mobilité afin d'équilibrer la gestion de la production et de la consommation à travers plusieurs secteurs. Le cluster et les projets pilotes financés par le ministère deviennent alors les outils de sa politique énergétique. Il finance par exemple un projet pilote sur le lien entre production d'électricité éolienne et chaleur dans les bâtiments modernes afin de favoriser l'équilibre des réseaux. Ce projet est par exemple conduit en coopération avec l'institut de recherche Frauenhofer.

Ces projets s'ajoutent aux projets conduits directement par le cluster spécialisé dans l'énergie. Le ministère soutient tant les initiatives de recherche des institutions de recherche (Frauenhofer, universités), que des projets d'entreprises (Sonnen, spécialiste de la blockchain), des communes (Wieldpoldsried, village bavarois approvisionné à 100% par les énergies renouvelables) ou de start-ups (concours organisé par le ministère)[210]. L'investissement du gouvernement bavarois dans les start-ups tend à souligner l'importance qu'il accorde à l'innovation technologique dans son ensemble puisqu'il a investi 802 millions d'euros pour le soutien aux start-ups en 2018 (EY 2019). 12,3% des start-ups allemandes ont la Bavière pour siège social (KPMG 2019).

Près de la moitié d'entre elles (5,9%) se concentre autour de Munich grâce à la présence d'institutions de recherche, de grandes entreprises et des investisseurs. 20% des start-ups bavaroises sont impliquées dans les technologies vertes (Borderstep 2019). Le ministère accorde son soutien dès lors que le dispositif permet de répondre à l'enjeu de sécurité énergétique de la Bavière et de favoriser la stabilité des systèmes énergétiques décentralisés.

Bayern Innovativ et Cluster Energietechnik

La Bavière compte 17 clusters dont l'un est dédié à l'énergie. Le cluster Energietechnik a été créé en 2006 par le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie et est géré par l'entreprise Bayern Innovativ GmbH située à Nuremberg. L'objectif qui lui est clairement assigné par le gouvernement

[210] Entretiens, mai 2019

bavarois vise à mettre rapidement à disposition de l'industrie les résultats de projets de recherche. Il n'est pas orienté vers des projets par filière. Au cœur de son activité on trouve la question qui concentre toute l'attention du ministère à savoir comment synchroniser production et consommation d'énergie. L'un de ses projets phare consiste à créer des modélisations pour l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux et à évaluer les besoins et effets en matière de stockage, de réseaux intelligents, de réduction de coûts et d'harmonisation de l'offre et de la demande. Ce projet porte sur l'intégration des systèmes électriques à l'échelle régionale, fédérale et européenne. L'autre projet central du cluster consiste en l'organisation et l'animation de réseaux d'entreprises pour l'efficacité énergétique.

De son côté, Bayern Innovativ, gère également un second cluster dédié aux nouveaux matériaux dont une partie de l'activité est également orientée sur la recherche de nouveaux matériaux dans le secteur énergétique, notamment avec l'usage de l'élastomère dans le solaire PV. D'autres clusters abordent l'une ou l'autre des technologies énergétiques innovantes, qu'il s'agisse de la valorisation de la biomasse (par le Cluster Technologies de l'environnement), de l'amélioration des réseaux, de la digitalisation de l'énergie etc. Comme le précise le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie, il y a des recoupements entre les différents clusters mais le lien recherche-industrie dans le secteur énergétique est concentré entre les mains du Cluster Energietechnik (entretien mai 2019).

Ce cluster compte de nombreux membres : des entreprises, grandes et petites et des institutions de recherche de tous secteurs de l'énergie. Il s'agit d'entreprises de montage d'installations énergétique, de fournisseurs industriels, d'installateurs, de fournisseurs d'énergie, d'entreprise d'ingénierie, de services et des technologies d'information et de communication, d'universités et de centres de recherche, de fédérations et d'autorités locales, d'organisme de certification, d'instituts de financement par exemple. Grâce à de nombreux évènements – réunions, ateliers, foires etc., il permet à ses membres d'accéder à une plateforme de « réseautage », de participer à des projets, de bénéficier des contacts et réseaux régionaux, nationaux et internationaux que le cluster met à leur disposition, de bénéficier d'aide au montage de projet pour obtenir des financements européens, nationaux et régionaux.

La formation de réseaux au sein de ces organisations s'appuie sur des liens de coopération générés par des réunions régulières organisées entre les membres, des contacts informels entre ces acteurs et la participation à des projets communs (Wessels 2008). La mise en relation entre ces différents acteurs aux demandes et compétences variables permet l'apprentissage et facilite la diffusion de l'innovation et structure les relations entre parties prenantes (Alic & Sarewitz 2016). En outre, la proximité géographique et les interactions interpersonnelles entre les différents acteurs de la recherche et de l'industrie renforcent l'interconnaissance, la confiance et les échanges et contribuent à améliorer la capacité d'innovation, la chaîne de création de valeur ainsi que les facteurs de compétitivité régionaux bénéfiques à l'ensemble de l'économie (Falck et al. 2010).

Ce faisant les parties prenantes réduisent les risques que chaque institution individuelle court lorsqu'elle se lance dans les projets innovants. Individuellement, elles risquent d'être confrontées à un manque d'accès à l'expertise, à un manque d'assise financière pour couvrir les coûts du développement à la commercialisation, et à un manque de ressources, notamment de personnel et de matériel (Bührer 2008). Collectivement, elles consolident leur potentiel et la mise en commun de moyens, dès lors qu'elles sont complémentaires et non en concurrence entre elles.

Le cluster permet ainsi l'ouverture de nouveaux marchés au niveau national et international dans les technologies de pointe qui servent la transition énergétique. Les trois thèmes centraux du cluster sont l'efficacité énergétique, le stockage de l'énergie et l'approche holistique de l'énergie qui contribue à l'intégration offre-demande. Le cluster Energietechnik agit au cœur de la mise en réseau et du transfert de technologie entre sciences et industrie. Mais il travaille également en coopération avec les autres clusters bavarois et les réseaux de recherche dont les activités peuvent recouper et abonder les connaissances en matière énergétique, notamment lorsqu'ils travaillent sur les nouveaux matériaux pour l'énergie solaire ou la digitalisation de l'énergie

A titre d'exemple, le cluster Energietechnik à Nuremberg anime des projets, tels que le projet « KOSiNeK » portant sur l'analyse des systèmes énergétiques, qui permettent la mise en réseau et la coopération entre les entreprises et les institutions de recherche bavaroises avec des partenaires européens et de rendre lisibles la recherche et l'industrie locales. Il s'agit d'un projet d'accompagnement

de la politique de transition énergétique qui produit de la connaissance sur les réseaux bavarois, allemands et européens afin de simuler des scénarii de transition énergétique à ces trois échelles. Il s'appuie sur des simulations, des modélisations et des scénarii de l'intégration des réseaux électriques bavarois et allemands dans le contexte européen. Conduit par Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, ce projet connaît trois phases :

- une 1ère phase consacrée à la transition énergétique bavaroise et l'intégration des ENR dans les réseaux à cette échelle. Cette phase a été conduite entre 2013 et 2015 avec 16 partenaires, de la recherche et de l'économie : l'agence de l'énergie bavaroise ENERGIE INNOVATIV, les entreprises Allgäuer Überlandwerk GmbH, Areva NP GmbH, BayWa (RENERCO AG), E.ON AG, infra-Fürth Gmbh, OSTWIND Verwaltungsgesellschaft mbH, Siemens AG, SWU Energie GmbH, TenneT TSO GmbH, Thüga AG, der Verbund AG, les centrales de München GmbH, de OMV Power International ainsi que Energie&Management (presse) et la société de fourniture et de transport de Würzburg. Les modélisations et simulations sont conduites dans les centres de recherche de la Friedrich Alexander Université Erlangen-Nürnberg (FAU).

- une phase d'intégration des réseaux à l'échelle allemande (2015-2017) avec 9 des 16 partenaires initiaux (Allgäuer Überlandwerk GmbH, Areva, E.ON, infra-Fürth, OMV Power International, Siemens, SWU Energie, Thüga, société de fourniture et de transport de Würzburg) auxquels s'est ajouté le ministère fédéral de l'énergie.

- Et une phase européenne, en cours qui est financée par le niveau fédéral. L'accompagnement de la recherche est réalisé par le ministère de l'énergie bavarois. L'objectif de la troisième phase est d'envisager l'optimisation de l'intégration des réseaux à l'échelle européenne.

De grandes entreprises comme Siemens, E.ON, Tennet (opérateur de réseau de transmission) sont parties prenantes de ce projet.

L'importance de l'activité de l'ensemble des clusters bavarois, tout secteur confondu, se résument en quelques chiffres à l'aune des activités qui ont été organisées jusqu'en décembre 2017 :

- 11 000 évènements organisés ont accueilli 606 000 visiteurs,
- 1 600 projets avec 10 700 participants,
- 253 millions€ de fonds nationaux obtenus,
- 41 millions€ de financement européen acquis (stmwi 2018)

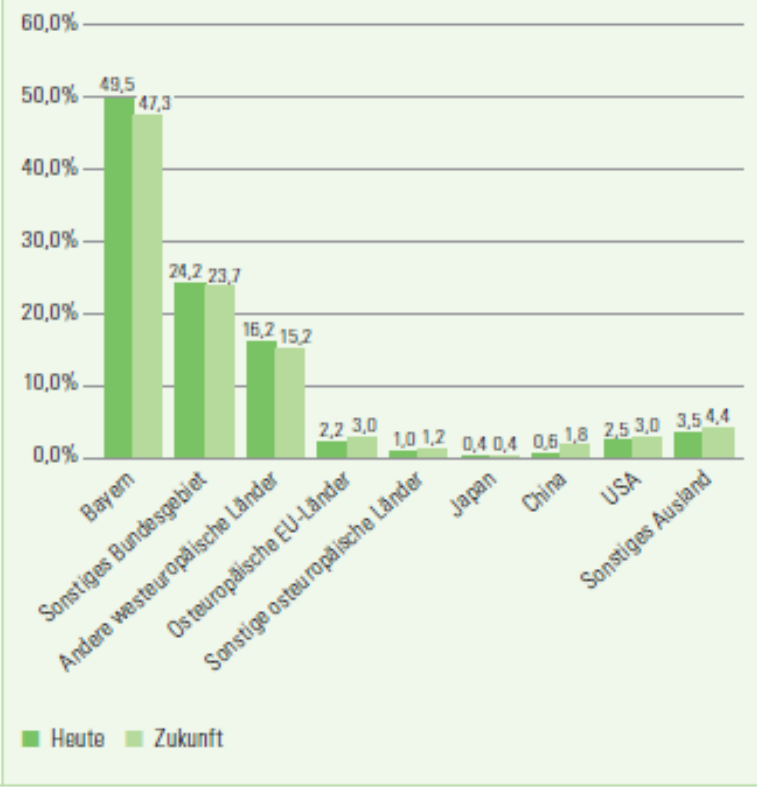
La part du cluster Energietechnik n'est pas connue.

Les *Stadtwerke* et les communes

La Bavière a une longue tradition de régies municipales (*Stadtwerke*) que le gouvernement mobilise pour le déploiement de son concept énergétique. Le Land compte 248 entreprises distributrices d'énergie constituées notamment des régies municipales, dont SWM à Munich, STWN à Nuremberg (Bundesnetzagentur 2018). Elles disposent d'un fort ancrage territorial, 75% des consommateurs bavarois leur font confiance. Elles sont également très dépendantes des commandes publiques. Ne disposant pas de moyens importants en matière de R&D, elles cherchent à bénéficier des résultats de R&D et des clusters et sont partenaires de nombreux projets, telles que la régie municipale du village de Hof qui en coopération avec le centre bavarois pour la recherche énergétique appliquée (ZAE Bayern à Würzburg) teste un concept d'intégration de l'énergie solaire dans le réseau de distribution avec stockage et gestion intelligente afin de viser l'autonomie énergétique.

Les régies municipales jouent un rôle important dans la transition énergétique bavaroise. Selon la fédération des entreprises communales VKU, les régies municipales sont chargées de la gestion de l'énergie et de l'eau, des réseaux de distribution, et partant, disposent de savoir-faire qui peut leur être utile pour stimuler la transition énergétique, et notamment la mobilité électrique. Selon la VKU, les *Stadtwerke* ont un rôle à jouer dans le déploiement des stations de recharge pour les véhicules électriques. Comme le montrent les exemples de projets présentés plus bas, les *Stadtwerke* représentent des terrains d'expérimentation importants également pour le stockage de l'énergie, le lien électricité-chauffage et la gestion des réseaux intelligents.

Selon l'étude de l'institut de recherche économique de l'Université de Munich, le marché bavarois est la première source des chiffres d'affaires des entreprises bavaroises à près de 50%. La proximité des clients et des fournisseurs représente ainsi un atout pour les entreprises basées en Bavière. Les PME, les régies municipales et les prestataires de services sont particulièrement dépendant du marché bavarois (à 60%) et notamment des commandes publiques émanant des communes.



A ce titre le rôle des maires est crucial pour l'avancée de la transition énergétique. En effet, si un consensus émerge au niveau local, la règle des « 10H » pour les turbines éoliennes peut être levée (BLU 2018). Les autorités locales étant actionnaires des régies municipales peuvent influencer la politique énergétique et l'ouverture aux innovations.

C'est le cas par exemple du village emblématique de Wildpoldsried, situé dans l'Oberallgäu où le conseil municipal et le maire se sont positionnés comme les pionniers d'une initiative lancée en 1996 visant à couvrir les besoins locaux d'énergie avec 100% d'énergie renouvelable. Le maire a impliqué les citoyens dans le projet, ces derniers par exemple détiennent des parts dans le parc éolien de 11 turbines éoliennes, ce qui a permis d'éviter les résistances. Aujourd'hui ce village de 2600 habitants est devenu un laboratoire pour tester les nouvelles technologies de la transition énergétique[211]. Il est le siège, de sonnen, l'une des start-ups bavaroises les plus connues. Notamment active sur les plateformes de blockchain, elle a établi des coopérations financières avec de grandes entreprises de l'énergie, telles GE ou Shell[212].

Une alliance pour la recherche sur l'énergie et la technologie

Le concept bavarois pour la recherche et le développement technologique dans le secteur énergétique (*Bayerische Konzept für Forschung und Technologieentwicklungen im Energiebereich*) établi pour la période 2012-2021 représente un paquet de mesures pour renforcer la recherche et ses liens avec l'industrie énergétique. Il représente la concrétisation de l'Alliance bavaroise pour la recherche et la technologie énergétiques (*Bayerische Allianz für Energieforschung und –Technologie*) qui rassemble l'ensemble des ministères[213] ayant un lien avec l'énergie. Cette politique est animée par la fondation pour la recherche bavaroise (BFS), acteur bavarois chargé de soutenir la recherche et la collaboration de la recherche publique avec le secteur privé. 27 champs de recherche ont été identifiés en priorité dont les technologies des ENR, l'efficacité énergétique, les nouvelles technologies pour le stockage et la digitalisation de l'énergie.

[211] https://www.handelsblatt.com/unternehmen/energie/wildpoldsried-wie-ein-kleines-dorf-im-allgaeu-zum-vorzeigemodell-fuer-die-energiewende-wurde/24169570.html
[212] https://sonnen-batterie.com/en-us/sonnen-closes-new-eu60-million-financing-round-and-adds-shell-ventures-new-investor
[213] Ministère de l'économie, de l'infrastructure, du transport et de la technologie, du ministère de la science, de la recherche et des arts, du ministère de l'environnement et de la santé et le ministère de l'alimentation, de l'agriculture et de la forêt

Cette politique s'est concrétisée par la constitution de plateformes de recherche qui rassemblent plusieurs institutions de recherche autour d'une thématique. Elles se concentrent notamment autour du Campus Energie Nuremberg et de l'Université Technique de Munich mais sont présentes sur l'ensemble du territoire bavarois. Ces deux structures représentent deux centres d'excellence dans le secteur de l'énergie et travaillent en coopération avec d'autres universités et instituts de recherche bavarois pour consolider les réseaux de compétences, dans le cadre de programmes de R&D communs ou encore dans le cadre des clusters (Energie Innovativ, 2013). La commission d'experts de l'Alliance bavaroise pour la recherche et la technologie énergétiques (*Bayerische Allianz für Energieforschung und – Technologie*) composée de représentants d'entreprises, d'universités, d'instituts de recherche et du Cluster Energietechnik décide de l'organisation de la recherche et des priorités :

La recherche du Campus Energie Nuremberg, en coopération avec de nombreux partenaires locaux[214], porte essentiellement sur la troisième génération de solaire PV, le solaire thermique, l'efficacité énergétique, le stockage chimique et les réseaux intelligents. Dans le secteur photovoltaïque, la recherche s'intéresse surtout au photovoltaïque organique et aux technologies hybrides tels que les matériaux organiques et anorganiques ou les cellules solaires nanocristallines. L'objectif vise à augmenter l'efficacité de la production solaire, à réduire les coûts de la technologie, à augmenter l'efficacité énergétique de la capture de la lumière, du processus de transport et d'injection afin d'améliorer la stabilité du système.

Quant au centre Energie et Information de l'Université Technique de Munich (TUM), composé d'une dizaine de facultés, il se concentre sur les technologies des centrales électriques, la planification et la construction durable, la mobilité électrique, les énergies renouvelables.

S'y ajoutent l'université Ludwig-Maximilian (LMU) de Munich ainsi que les universités de Würzburg et Bayreuth, qui toutes trois se consacrent à la recherche sur les matériaux organiques et hybrides, notamment les nanotechnologies, appliqués au secteur énergétique.

Les centres de recherche appliquée à Augsburg, Sulzbach-Rosenberg, Amberg-Weiden, Straubing travaillent en coopération avec les PME et les régies municipales pour améliorer l'approvisionnement en énergie des communes.

Enfin, le centre bavarois de la recherche énergétique appliquée (ZAE Bayern) avec ses centres à Würzburg, Erlangen et Garching vise à organiser la mise en réseau entre sciences et entreprises locales dans les technologies de l'énergie. Il est par ailleurs membre fondateur du Campus Energie de Nuremberg et partenaire de l'Université Technique de Munich (Bayerische Allizanz für Energieforschung – und Technologie 2011).

[214] L'université Friedrich Alexander Université Erlangen-Nürnberg, l'université Georg-Simon-Ohm Nuremberg, deux instituts Fraunhofer pour les circuits intégrés (IIS) et pour les systèmes intégrés et la technologie des composants et enfin le centre bavarois de la recherche énergétique appliquée (ZAE Bayern).

Parmi le grand nombre d'institutions de recherche bavaroises, de nombreux instituts sont engagés dans des projets de recherche dans et en-dehors du clusters Energietechnik. Pour autant, cette politique de R&D distincte de celle des clusters va également contribuer à financer des projets en réseau dans le domaine de l'énergie. Une telle approche révèle la part importante du soutien public à l'innovation dans les technologies énergétiques et à la dynamique de R&D de l'ensemble du secteur au niveau régional. Toutefois la question de la synergie, du partage et de la consolidation des résultats des différents travaux est aussi posée.

Plusieurs projets phares peuvent être mis en valeur. Ils illustrent l'importance des technologies innovantes de l'énergie dans la recherche bavaroise et les consortia régionaux qui s'organisent autour de ces travaux collaboratifs. Certains projets reposent également sur des partenariats publics-privés.

Un projet de recherche sur le bioéthanol à partir de la paille est conduit par le Clariant Biotech & Renewables Center. Ce projet cherche à valoriser la technologie Sunliquid Technologie de l'entreprise Clariant pour produire de l'éthanol de cellulose de 2ème génération avec une production de 50% de carburant en plus. Cette recherche s'est traduite par un démonstrateur lancé à Straubing en 2012 d'une capacité de 1000 tonnes par an. La commercialisation a suivi. Le coût total de ce projet s'élève à 28 millions€ (16 millions€ pour la construction de l'installation, 12 millions€ pour l'accompagnement par la recherche). Le soutien bavarois à ce projet s'est élevé à 20 millions€ sur la période 2013-2015 (Energie Innovativ, 2013).

Le projet **Green Factory Bavaria** est conduit par une plateforme de recherche sur les technologies de production énergétique efficaces à Augsburg et Bayreuth. Il s'appuie sur une coopération entre deux instituts Fraunhofer et huit universités bavaroises et vise à améliorer l'efficacité de la production d'énergie, la technique de fabrication, l'électronique, et l'informatique. Quatre sites se penchent sur l'élaboration de solutions de long terme pour envisager l'autonomie énergétique des entreprises. Ce projet a bénéficié entre 2012 et 2016 d'un soutien de la Bavière à hauteur de 12 millions€ (Energie Innovativ 2013). Chaque « Green Factory » est spécialisée sur un thème qui reflète les compétences de l'université d'accueil mais des projets conjoints et des sujets transversaux permettent des échanges d'expérience. Ces projets sont destinés à servir de démonstrateurs, à destination des PME. Ces plateformes servent de lieux d'information et d'éducation pour les entreprises mais également pour les étudiants. Les « Green Factories » coopèrent et sont également amenées à coopérer avec le cluster ECPE (électronique de pointe), le centre de recherche énergétique appliquée de Bavière et avec le Campus Energie de Nuremberg (Kreitlein et al. 2015).

Le projet « **Solar technologies Go Hybrid** » est mis en place par les chimistes et les physiciens des universités de Würzburg, de Bayreuth, de la Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg et de la Ludwig-Maximilians-Universität de Munich. Il vise à développer de nouveaux concepts pour améliorer la transformation de l'énergie solaire en électricité et en carburants non fossiles. Les cinq universités valorisent leurs complémentarités. : Bayreuth s'occupe des polymères, Erlangen des nano-conduits et les matériaux en carbone, Würzburg des micromolécules, les deux universités munichoises des matériaux inorganiques et les nanosystèmes hybrides inorganiques-organiques. Ce projet en réseau renforce l'infrastructure de recherche de la Bavière car chaque laboratoire peut solliciter des fonds. Entre 2012 et 2016, ce projet a bénéficié d'un soutien de 50,55 millions€ (Energie Innovativ, 2013)

Le **Centre bavarois pour l'hydrogène (BHC)** fait des recherches sur l'utilisation de l'hydrogène comme moyen de stockage de l'énergie. Ce projet est porté par la Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg en coopération avec l'université technique de Munich, l'université de Bayreuth, de Amberg-Weiden et l'institut Fraunhofer Umsicht et l'institut Max Planck pour la conversion chimique de l'énergie. 15 millions€ ont été accordés à ce projet entre 2012 et 2016.

Le projet pilote « **Smart grid Solar in Hof und Arzberg »** teste la mise en place de stockage intermédiaire par l'utilisation de smart grid, le développement et l'adaptation de composants innovants pour la production et la stabilisation des réseaux à moyenne et basse fréquence. Il développe également des modélisations et des simulations d'un mix totalement renouvelable d'ici à 2050. Les technologies sont testées à Hof et Arzberg. Le centre bavarois pour la recherche énergétique appliquée (ZAE Bayern à Würzburg) est le porteur du projet en coopération avec les deux villes, l'école de Hof, l'université FAU Erlangen-Nuremberg, deux instituts Fraunhofer, l'entreprise E.ON, la régie municipale de Hof (HEW), deux entreprises du secteur solaire (Rauschert Solar, IBC Solar AG) et un bureau d'étude (BEC Engineering). Ce projet a bénéficié d'un soutien du Land à hauteur de 7 millions€ entre 2012 et 2016.

4. Impacts et limites

Malgré le soutien constant du gouvernement en faveur de l'innovation technologique, les entreprises interrogées par l'institut de recherche économique de l'université de Munich (ifo) soulignent également les obstacles à l'innovation qui n'ont pas été levés par la politique bavaroise. En outre, les impacts de cette politique restent malaisés à évaluer car le déploiement des technologies dépend de multiples variables qui dépasse la seule politique de l'innovation. Et comment le précise le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie « *il est trop tôt pour dire si nous avons fait le bon choix* » (entretien, mai 2019).

Des limites liées au « Standort Bayern »

Les principaux obstacles liés à la compétitivité des entreprises concernent les points suivants mis en avant par les entreprises interrogées par l'ifo :

Ils concernent notamment les difficultés auxquelles elles sont confrontées pour renforcer leurs capitaux propres et accéder à des financements extérieurs.

Ils tiennent aux freins à la compétitivité des entreprises du secteur énergétique, tels que l'accès aux marchés publics. Comme une grande partie des firmes du secteur sont des PME et des régies municipales, elles dépendent des commandes publiques notamment des municipalités. Pour elles, l'accès et la réglementation des marchés publics représentent un facteur de réussite essentiel.

En outre, si la plupart d'entre elles souligne la disponibilité du foncier, 22% d'entre elles en critiquent le coût. Les entreprises de construction de centrales solaires sont notamment négativement impactées par cette problématique.

A ce titre elles dénoncent également la durée des processus d'obtention de permis qui peuvent prendre de plusieurs à mois à plusieurs années et menacent ainsi les montages financiers des projets et donc l'équilibre financier des entreprises.

L'ensemble des entreprises bavaroises engagées dans l'un ou l'autre des segments énergétiques dénoncent le poids des taxes et le poids des coûts de l'énergie. Si le gouvernement bavarois peut influencer un certain nombre de taxes, une grande partie d'entre elles dépend cependant de la politique fédérale.

Une dépendance à l'égard du financement public

La dépendance au financement public est une véritable problématique des clusters bavarois et le cluster Energietechnik n'y échappe pas. Non seulement la survie du cluster dépend des allocations publiques structurelles programmées sur 5 ans, mais de nombreux projets dépendent également, au moins en partie, des financements publics bavarois. Les financements structurels sont conçus de manière dégressive et doivent être compensés par une part croissante de capitaux propres et de financement privé, orientation qui est source de tensions entre les intérêts en présence. Certains projets émergent grâce à la complémentarité de financements régionaux, nationaux et européens

				Financements régionaux		
	Prestations de services payantes	Sponsoring	Fédéral et UE	Financement structurel	Financement supplémentaire	
2012	43.10%	0%	2.50%	35.30%	19.10%	
2013	37.40%	2.60%	0%	37.80%	22.20%	
2014	57.00%	0%	0%	43.00%	0	
2015	55.00%	0%	0%	45.00%	0	

Tableau : Evolution du soutien public au cluster Energietechnik
Source : Bayerischer Landtag, 2016, Schriftliche Anfrage des Abgeordneten Alexander Muthmann, Freie Wähler vom 16.11.2015, 17/10

Les clusters dans leur ensemble font face à la difficulté de pérenniser leur financement à moyen-long terme qui tient aux critères utilisés par le gouvernement, rarement en adéquation avec les intérêts des membres (nombre de membres, part de financement privé, nombre d'évènement etc.). Pour sortir de cette incertitude liée aux décisions publiques, une solution tient au développement de services pour les entreprises privées, mais ces dernières sont souvent réticentes à prendre la responsabilité du financement du cluster (Jungwirth, Müller 2014).

Si de nombreux clusters sont confrontés à la réduction du financement régional au profit d'autres sources, le Cluster Energietechnik fait exception. Il bénéficie d'une hausse des fonds publics. Ceci peut s'expliquer notamment par le programme phare du cluster qui vise à accompagner par des simulations, des modélisations et des optimisations de scénario le concept de transition énergétique bavarois. La cotisation pour les membres s'élève à 5000€ par an pour disposer d'un accès privilégié aux activités du cluster, ce qui contribue également au financement du cluster mais oblige ce dernier à répondre aux besoins variés de ses membres.

Les limites de la capacité d'innovations des entreprises bavaroises

Dès son origine en 1994, La politique de cluster du gouvernement bavarois a cherché à stimuler la mise en réseau entre les institutions de recherche, les services et l'industrie. Pour autant la Bavière se distingue des autres Länder en termes d'innovation à partir de l'offensive de cluster High Tech du gouvernement bavarois lancé en 1999. La différence tient au choix de politique publique qui a concentré les aides à l'innovation sur cinq secteurs stratégiques, dont celui des renouvelables, du stockage, de la digitalisation de l'énergie. Il en résulte une appréciation positive de la part des entreprises bavaroises de l'énergie en matière d'accès à l'information, au savoir-faire et à la coopération avec les institutions de recherche. L'accès à un personnel qualifié en matière de R&D est un obstacle qui avait longtemps été signalé par les entreprises bavaroises et qui semble être nettement moins problématique depuis l'offensive High Tech lancée en 1999 (Ministère de l'économie 2017, Falck et al. 2010).

Toutefois, il est difficile de mesurer et de chiffrer les effets de l'effort financier public consenti. Outre les investissements dans la R&D dont 60 millions d'euros investis uniquement dans la R&D énergétique en 2012, le nombre d'entreprises innovantes et le nombre de brevets déposés peuvent être des indicateurs de l'effet de la politique de soutien à l'innovation du Land. Les chercheurs Falck et Kipar ont évalué le taux d'innovation des entreprises bavaroises avant et après l'offensive High Tech du gouvernement bavarois. Il semblerait que depuis 1999, la capacité d'innovation des entreprises régionales ait augmenté comme le montre le graphique ci-dessous. La capacité d'innovation renvoie dans le graphique autant à l'introduction dans l'entreprise d'un produit innovant qui existe sur le marché qu'à l'introduction d'un produit non encore expérimenté.

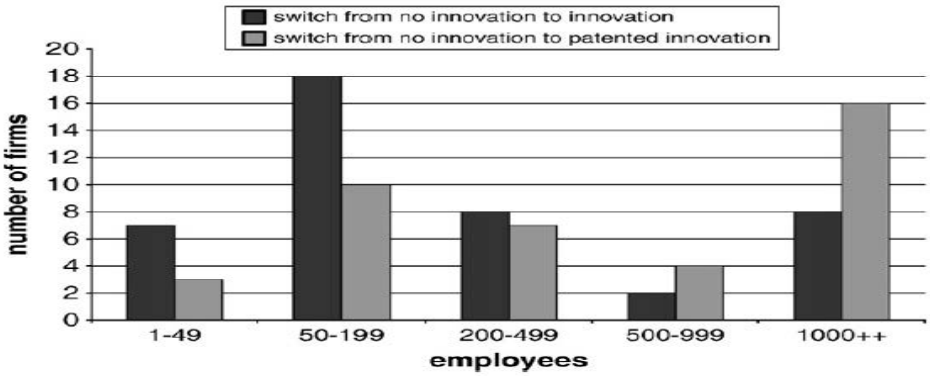
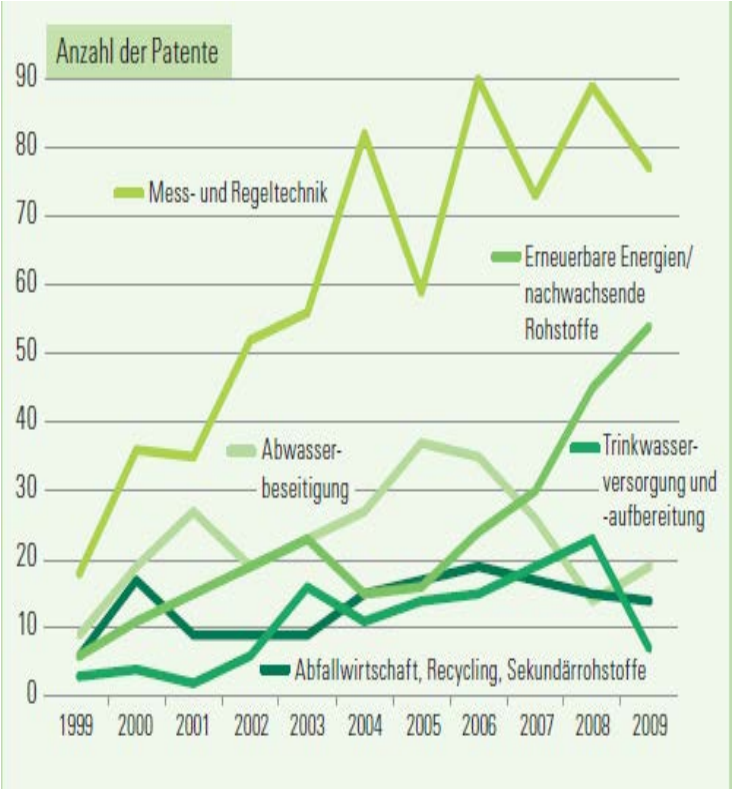


Fig. 2. Number of firms in target industries in Bavaria that switch from no innovation in period 1994–1998 to innovation in period 1999–2001. Notes: Our sample consists of 185 firms in target industries in Bavaria. Firm size classes are in terms of employees.

Tableau : Entreprises ayant introduit une innovation (en noir) / ayant introduit une innovation brevetée (en gris) au cours de la période 1999-2001 suite à l'offensive High Tech de la Bavière
Source : Falck et al. 2010, p. 577

Tous secteurs confondus la Bavière représente 29% des brevets allemands déposés en 2015. Le nombre de brevets déposés est en hausse depuis la fin des années quatre-vingt-dix : de 11 769 en 1998 à 13 744 en 2015. 1621 ont été déposés par Siemens, 204 par les instituts Fraunhofer, 55 par la Friedrich Alexander Université Erlangen-Nürnberg (FAU), 47 par l'université technique de Munich (TUM) ou encore 26 par les instituts Max Planck.



Toutes ces structures font également partie de divers clusters, dont le cluster Energietechnik. Parmi les 2098 brevets déposés dans les technologies de l'environnement, les brevets dans le secteur des énergies et ressources renouvelables représentent 30% de l'ensemble ; ceux déposés dans le secteur des économies d'énergie 17,4% en 2009. Il s'agit de la majorité des brevets bavarois déposés. Selon l'étude conduite par l'institut de recherche économique de l'université de Munich (ifo) et publiée en 2014, le nombre de brevets déposés dans le secteur des énergies et ressources renouvelables est en forte hausse depuis 2006, ce qui correspond au lancement de la politique des clusters du gouvernement bavarois[215]. Toutefois en 2009, le nombre de brevets déposés par les entreprises bavaroises ayant participé au sondage s'élèvent en tout à 170 brevets dans les technologies de l'environnement. Parmi ces 170, un peu plus de 50 brevets (contre moins de 10 en 1999) concernent les énergies et ressources renouvelables. Ils concernent notamment le secteur solaire photovoltaïque (composants, réflecteurs, onduleurs), l'usage de l'hydrogène et de la biomasse. Les brevets dans le secteur du stockage et de la digitalisation se développent rapidement. A l'échelle allemande, les brevets déposés pour le stockage de l'énergie représentent 31,4% de l'ensemble des brevets allemands déposés. En Bavière, la région de Munich, Nuremberg et Regensburg sont les plus dynamiques (Stmwi 2014, IHK 2016).

[215] Source du graphique : Ministère de l'économie bavarois, 2014, Umweltwirtschaft in Bayern, p. 50

A l'échelle des clusters bavarois, Falck, Heblich et Kipar (2010) montrent par ailleurs que l'investissement des entreprises dans la R&D a baissé de 19,4%. Toutefois elle ne se traduit pas par une baisse du nombre de brevets. Selon les auteurs, ces résultats illustrent selon eux « l'effet cluster » qui permet aux entreprises membres de bénéficier de l'effet cumulé des investissements dans la R&D du cluster grâce à la coopération entre les membres. Ce faisant, les entreprises profitent d'une capacité d'innovation plus importante à un coût moindre grâce aux effets cumulatifs et collaboratifs au sein du cluster, et ce d'autant plus que l'investissement public dans la R&D peut se substituer à l'investissement privé.

La vision de la capacité d'innovation bavaroise ne serait pas complète sans redire ici le soutien que le ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie accorde aux start-ups dont le nombre s'accroît au fil du temps, notamment grâce à l'écosystème munichois. Un concours pour les start-ups impliquées dans le secteur énergétique est organisé par le ministère afin de les rendre visibles et de promouvoir les nouvelles idées. Le concours 2019 a recueilli environ 40 candidatures (entretien mai 2019).

Les divergences d'intérêt au sein des clusters

Rappelons ici que la politique de cluster, notamment dans le secteur énergétique, est animée par le gouvernement bavarois. Il s'agit notamment du ministère de l'économie, de l'énergie et de la technologie pour le Cluster Energietechnik. D'autres ministères se sont également impliqués dans la politique de cluster dans leur secteur de spécialisation, tels que le ministère de l'environnement ou celui de l'agriculture. Certaines activités de ces clusters peuvent également toucher à l'énergie sur d'autres volets (technologies de recyclage par l'énergie, valorisation de la biomasse pour l'énergie par exemple). Les missions assignées aux clusters en général, à ceux de l'énergie en particulier, sont multiples.

Ils doivent « augmenter la capacité d'innovation du site, stimuler la productivité du site, améliorer l'attractivité du site et accroître les fonds privés du cluster » (Jungwirth, Müller, 2014 : 369). Ils doivent en outre contribuer à l'élaboration de solutions technologiques et économiques pour soutenir la politique de transition énergétique.

A travers ces différentes tâches, les clusters émanant de la politique publique régionale se trouvent souvent confrontés à des intérêts et des rationalités contradictoires entre les décisions politiques, les intérêts privés des entreprises membres et les intérêts scientifiques des instituts de recherche. Les équipes de gestion mises en place servent de médiateur et d'animateur de l'activité du cluster mais elles se trouvent souvent écartelées entre les missions publiques visant à améliorer les avantages compétitifs du site et les services privés que demandent les entreprises (Jungwirth, Müller 2014). Compte tenu de la diversité des missions, l'équipe de gestion du cluster doit faire des choix. Le gouvernement bavarois leur laisse cette liberté stratégique mais les contraint par ailleurs à prioriser les prestations pour optimiser l'allocation des financements publics. A ce risque de contradiction dans les missions assignées s'ajoutent le fait qu'une partie du financement provient des contributions des entreprises membres qui, de leur côté, exigent une valeur ajoutée de la part du cluster. Si le gouvernement exige un travail sur le « *Standort* », les entreprises, quant à elles, recherchent des prestations qui les aident à développer leur technologie, à trouver des niches sur les marchés, à rechercher des partenaires commerciaux et dans le milieu de la recherche, à monter des projets et trouver les financements etc.

Le manque de main d'œuvre

La Bavière, au même titre que l'Allemagne, a un niveau de chômage très faible. Si économiquement et socialement, cette performance est à saluer, elle pose toutefois des problèmes en matière de recrutement. Les entreprises bavaroises manquent de main d'œuvre et « *cherchent du personnel partout* » (CCI, mars 2019). Cette situation explique également pourquoi la politique énergétique ne repose pas sur le développement de filières énergétiques dont l'une des motivations vise notamment à développer l'emploi localement. On constate par ailleurs une baisse de l'emploi dans le secteur énergétique.

La Bavière fait partie des *Länder* ouest-allemands où l'emploi dans le secteur des énergies renouvelables s'est le plus développé. Pourtant, malgré une politique volontariste, le nombre d'actifs dans le secteur de l'énergie renouvelable en Bavière n'a fait que diminuer depuis 2008. L'emploi brut dans les

renouvelables est passé de 57 450 salariés en 2013 à 50 650 en 2016, soit 9,2 salariés pour 1000 en 2013 et 7,7 salariés pour 1000 en 2016, en dessous de la moyenne allemande (8,6).

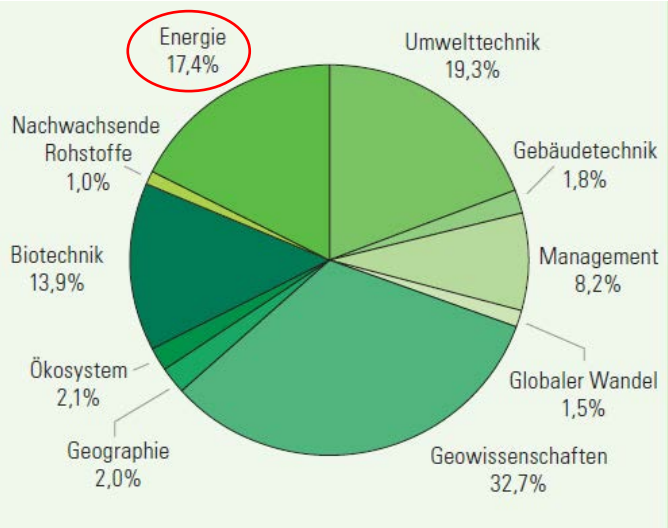
Emploi brut (nombre d'actifs)	2013	2016	Ecart (%)
Eolien	11750	12920	+10,1
Solaire	13 820	8 740	-36,7
Bioénergie	23 780	21 270	-10,8

Ulrich P., Lehr U., 2018, *Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern. Bericht zur aktualisierten Abschätzung der Bruttobeschäftigung 2016 in den Bundesländern*, GWS, mars, p. 26

> La chute dans le solaire a été drastique dès la dénonciation de la concurrence déloyale des panneaux solaires chinois en 2012. Entre 2013 et 2016, le nombre d'actifs dans le secteur solaire en Bavière a chuté de 36,7%. Face à la surcapacité sur le marché des panneaux solaires et au ralentissement de la demande, de nombreuses entreprises ont dû mettre la clé sous la porte, à l'instar du fabricant de panneaux photovoltaïques, Schott Solar, qui a décidé de fermer son entreprise de production à Alzenau dès 2011.
>
> A l'inverse le secteur de l'éolien a connu une progression conséquente de 10,1% entre 2013-2016 notamment dans les emplois liés au développement, au montage et à la maintenance des turbines alors que ce secteur s'avère le moins porteur de potentiel.
>
> Si le secteur de la bioénergie s'est développé à un rythme supérieur par rapport au reste de l'Allemagne et a permis d'augmenter la création de valeur dans les régions rurales, ce dynamisme ne se traduit pas en matière d'emplois. L'emploi du secteur a reculé de 10,8% entre 2013 et 2016 (GWS 2018)

En termes de qualité de la main d'œuvre, on constate que La filière énergie s'est développée depuis quelques années à tous les niveaux grâce aux multiples universités et écoles techniques de la Bavière. Le système d'apprentissage qui lie théorie et pratique est reconnu par *Invest Bavaria* comme « *un avantage concurrentiel de la Bavière* ». L'accueil dans l'entreprise permet d'appliquer la théorie à la pratique, de développer des compétences grâce à l'apprentissage sur le terrain et de mieux répondre aux besoins en compétences des entreprises. Il permet aussi l'accès à des formations de haute qualité dans les écoles techniques mais également dans les universités à bac +3 ou +5 et en doctorat.

La structure du système éducatif allemand permet aux entreprises de disposer de techniciens, d'ingénieurs et de managers bien formés avec une connaissance de la réalité de l'entreprise. Le Campus Energie de Nuremberg accueille par ailleurs des doctorants qui travaillent sur des projets de recherche dans les nouvelles technologies et leur permet d'accéder à des installations performantes. La difficulté de recrutement tient au développement rapide du secteur par rapport à la disponibilité de la main d'œuvre et à l'attractivité du secteur sur l'ensemble du territoire allemand.



Parmi l'ensemble des filières liées aux technologies de l'environnement, la filière énergie représente 17,4% des étudiants inscrits. Toutefois selon l'étude de l'ifo[216], les entreprises bavaroises de l'énergie se plaignent d'un déficit de compétences dans la physique des matériaux, la métallurgie ou encore dans l'électrotechnique appliquée au

[216] Source : Ministère de l'économie bavarois, 2014, *Umweltwirtschaft in Bayern*, p. 59

secteur des renouvelables. Des aptitudes plus « soft » liés aux capacités de résolution de problème et de management sont également signalées comme insuffisantes. Le secteur solaire se plaint également du manque de polyvalence des installateurs de panneaux solaires.

Conclusion

Mesurer les effets de la politique du gouvernement bavarois sur la structuration de l'innovation dans le secteur énergétique n'est pas aisé dans la mesure où d'autres facteurs peuvent influencer le marché ou la capacité d'innovation des acteurs bavarois. L'évaluation des politiques publiques est rarement en mesure d'établir un lien causal entre la politique publique et sa contribution aux innovations ou de dégager les effets tant quantitatifs que qualitatifs de ces politiques par rapport à d'autres facteurs conjoncturels ou structurels. En effet, une étude montre que la politique industrielle généraliste lancée en Bavière entre 1994 et 1999 ne permet pas d'identifier de différences dans le comportement innovant des entreprises bavaroises comparées aux entreprises d'autres Länder, alors que ces derniers n'ont pas développé de politique identique. En revanche, dès lors que la politique industrielle a été concentrée sur quelques champs sectoriels à partir de 1999, l'innovation en Bavière s'avère nettement plus développée qu'ailleurs, comme tend à le montrer le nombre de brevets déposés (voir plus haut) (Falck, Kipar 2010).

Si la portée de la politique d'innovation de la Bavière dans le secteur énergétique est difficilement chiffrable, il n'en demeure pas moins que la tradition innovante de ce Land structure le secteur énergétique. En misant sur l'innovation, la Bavière échappe à la concurrence de produits moins chers venant d'Asie, assoit une compétence high tech dans le secteur de l'énergie et construit un réseau de partenaires industriels et scientifiques. Ce faisant elle cherche également à assurer sa sécurité énergétique en mettant en avant l'importance d'une approche holistique de la transition énergétique. Il s'agit moins pour la Bavière de développer des filières industrielles de fabrication traditionnelle des matériaux et produits renouvelables mais d'anticiper l'avenir en misant sur des systèmes innovants qui visent une harmonisation plus efficace de l'offre et de la demande, l'amélioration des réseaux et la réduction de la consommation énergétique.

La Bavière mise ainsi sur une gestion à long terme de la transition énergétique dont il est difficile aujourd'hui d'évaluer les effets, à l'exception des effets d'agglomération des compétences et des savoir-faire. Cependant, il est difficile de savoir si l'innovation dépend uniquement de la politique du gouvernement bavarois ou si les entreprises locales disposent de capacités d'innovations grâce à des investissements privés, à l'instar de l'entreprise bavaroise sonnen (Wildpoldsried). Spécialiste du stockage et pionnier européen de la « blockchain) avec sonnenCommunity lancé en 2016 en Bavière, elle compte aujourd'hui deux grands investisseurs privés : General Electric et Shell Ventures. L'entreprise pétrolière a investi en mai 2018 60 millions d'euros dans l'entreprise allemande. Pour sonnen cet investissement lui permet d'envisager un déploiement sur les marchés internationaux et notamment américains et australiens, pour Shell, il s'agit de diversifier son portefeuille et de se présenter comme un acteur global sur le marché de l'énergie propre. Shell New Energies Division et sonnen ont signé un accord pour développer des synergies dans la recherche de solutions énergétiques intégrées innovantes en matière de stockage, de gestion des réseaux et de solutions de chargement pour les voitures électriques[217].

[217] https://sonnen-batterie.com/en-us/sonnen-closes-new-eu60-million-financing-round-and-adds-shell-ventures-new-investor

Références

Alic J.-A., Sarewitz D., 2016, "Rethinking innovation for decarbonizing energy systems", in *Energy Research & Social Science*, 21, 212-221

Bayerische Allizanz für Energieforschung – und Technologie, 2011, *Empfehlungen der Expertenkommission*, Septembre

Bayerische Staatsregierung, 2011, *Bayerisches Energiekonzept « Energie innovativ »*

Bayerischer Landtag, 2014, *Schriftliche Anfrage des Abgeordneten Andreas Lotte*, SPD, 17/2861, 26 septembre

Bayerischer Landtag, 2016*, Schriftliche Anfrage des Abgeordneten Alexander Muthmann, Freie Wähler* vom 16.11.2015, 17/10150

Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLU), 2018, *Windenergie in Bayern*

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, 2016, *EEG-Reform 2016, Ergebnisse der Verhandlungen der Regierungschefs der Länder*

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, 2016, *Bayerisches Energieprogramme für eine sichere, bezahlbare und umwelverträgliche Energieversorgung*

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Medien, Energie une Technologie, 2014, Umweltwirtschaft in Bayern

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Medien, Energie une Technologie, 2017, *Industriebericht Bayern 2017*, Juillet

Bayersisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie, 2018, *Cluster Offensive Bayern. Im Netzwerk zum Erfolg*, mai

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit, Bundesverband Deutsche Startups e.V., 2019, *Green Startup Monitor 2018*

Bührer S., 2008, "Zwischenevaluation der Cluster-Offensive Bayern. Ein Zwischenbericht zu Konzept und methodischem Vorgehen der Untersuchung" in, Wessels J., *Cluster-und Netzwerkevaluation. Aktuelle Beispiele aus des Praxis, Institut für Innovation und Techni*k, DeGEval, p. 20-26

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit, 2018, *GreenTech made in Germany 2018, Umweltechnik-Atlas für Deutschland*, Mars

Bundesnetzagentur, 2018, Übersicht Stromnetzbetreiber

Energie Innovativ, 2013, *Energieforschung und –technologie in Bayern*

EY, 2019, *Start-up Barometer Germany*, January

Falck O., Heblich S., Kipar S., 2010, "Industrial innovation: direct evidence from a cluster-oriented policy", *Regional Science and Urban Economics*, 40, 574-582

Falck O., Kipar S., 2010, "Die High-Tech Offensive im Freistaat Bayern", *Ifo Schnelldienst*, Feb 11, 63 , 5/6, p. 21-26

IHK in Bayern, 2016, *Patente in Bayern 2016/2017*

Jungwirth C., Müller E.-F., 2014, "Comparing top-down and bottom-up cluster initiatives from a principal-agent perspective: what we can learn for designing governance regimes", *sbr* 66, Juillet, 357-381

KPMG, 2019, *Deutscher Startup Monitor 2018*

Kreitlein S., Höft A., Schwender S., Franke J., 2015, "Green Factories Bavaria: A network of distributed learning factories for energy efficient production", in *Procedia CIRP* 32, pp. 58-63

Kulicke M., 2008, "Cluster- und Netzwerkevaluation – eine kurze Bestanaufnahme", in Wessels J., *Cluster-und Netzwerkevaluation. Aktuelle Beispiele aus des Praxis, Institut für Innovation und Technik*, DeGEval, p. 11-19

Langer K., Decker T., Roosen J., Menrad K., 2016, "A qualitative analysis to understand the acceptance of wind energy in Bavaria", in *Renewable and sustainable energy reviews*, 64, 248-259

Leipziger Institut für Energie, 2015, *Aktuelle Zahlen zur Energieversorgung in Bayern*

Ulrich P., Lehr U., 2018, *Erneuerbar beschäftigt in den Bundesländern. Bericht zur aktualisierten Abschätzung der Bruttobeschäftigung 2016 in den Bundesländern*, GWS, mars

Wessels J., 2008, *Cluster-und Netzwerkevaluation. Aktuelle Beispiele aus des Praxis*, Institut für Innovation und Technik, DeGEval