Institut pour l'Innovation et la Compétitivité i7 **14 mai 2013**

Quelle place pour l'énergie éolienne dans la transition énergétique ? Une analyse des enjeux de la filière industrielle de l'éolien en matière d'innovation, de compétitivité et d'emploi.

Pascal Morand, Professeur à ESCP Europe et Directeur de l'Institut pour l'Innovation et la Compétitivité i7
Julie Bastianutti, Chargée de recherche à l'Institut pour l'Innovation et la Compétitivité i7

Avec la contribution de **Jean-Luc Thomas**, Professeur et Directeur du département d'ingénierie mécanique et électrotechnique, Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM)

Ce rapport est le fruit d'un partenariat entre l'Institut pour l'Innovation et la Compétitivité i7 et France Energie Eolienne.

Il a bénéficié de la contribution active d'Alice de Bazin, assistante de recherche à i7.

Nous tenons également à remercier Jean-Marie Chevalier, Michel Cruciani et Pierre Parvex pour les perspectives ouvertes sur la transition énergétique et les échanges enrichissants dont ils nous ont fait bénéficier ; Jean-Roger Mercier pour son éclairage sur la question des terres rares ; Raphaël Contamin et Thomas Muller pour leur regard et leur expertise sur les différents aspects touchant à l'énergie éolienne et la problématique énergétique dans son ensemble ; Jacopo Moccia, pour la vision européenne et internationale qu'il nous a fait partager ; Frédéric-Charles Aillet, pour son regard d'architecte-paysagiste ; Aurélien Saidi, pour son éclairage économique et statistique ; Julie Fabbri, pour son accompagnement constant ; Maxime Barbier, pour sa contribution au traitement des données ainsi que les étudiants de l'option innovation de ESCP Europe, et notamment Leslie Kabla pour son investissement dans la réalisation des supports de communication.

Sommaire

RESUME DE L'ETUDE 7

INTRODUCTION 10

A. ETAT DES LIEUX DE LA DEMANDE ET DE L'OFFRE 13

1 La place de l'énergie éolienne en France 13

2 La place de l'énergie éolienne en Europe 15

3 La place de l'énergie éolienne dans le monde 21

4 L'Europe et la France dans la compétition industrielle mondiale 23

B. COMPETITIVITE, CHAINE DE VALEUR ET EMPLOI 28

1 La compétitivité de l'éolien 28

2 La chaîne de valeur et ses imbrications 34

3 L'emploi et ses composantes 38

4 Les facteurs d'innovation 45

C. L'INTEGRATION DE L'EOLIEN DANS SON ENVIRONNEMENT ECONOMIQUE, SOCIAL, SOCIETAL, TECHNOLOGIQUE 52

1 Sortir de l'injonction paradoxale 52

2 L'éolien : une énergie en quête de reconnaissance institutionnelle 56

3 La pertinence d'une approche design 59

4 La question fondamentale du réseau 63

CONCLUSION – COMMENT COMBINER AU MIEUX COMPETITIVITE, INNOVATION ET EMPLOI ? 68

ANNEXES 70

1. Le débat français sur le coût de l'éolien 70

2 Bibliographie 75

Résumé de l'étude

La transition énergétique est en route. L'éolien est appelé à y jouer un rôle important. C'est d'ores et déjà le cas dans des pays tels que le Danemark, l'Allemagne, l'Espagne. L'ambition éolienne se retrouve également dans les autres continents, comme aux Etats-Unis et en Chine, malgré les fluctuations dues aux circonstances économiques et technologiques. Si l'éolien terrestre reste très largement majoritaire, l'éolien maritime a pris son essor, en particulier en Grande-Bretagne et dans les pays nordiques.

Avec près de 7900 MW installés, la France se situe en 8ème position mondiale en termes de capacités installées. L'énergie éolienne y représente 3% de la consommation nationale d'électricité. Sa part relative devrait augmenter dans les 15 années à venir pour représenter un pourcentage allant de 10 à 15% de la consommation électrique totale. La tendance actuelle est pourtant paradoxalement inverse, les capacités installées diminuant depuis 2011, en raison d'une double incertitude économique et juridique pesant lourdement sur les anticipations des investisseurs et des industriels.

Néanmoins, l'éolien est une industrie (au sens large) compétitive, puisque le coût de production, de l'ordre de 70 à 80 €/MWh pour l'éolien terrestre, est loin d'être disproportionné par rapport à ceux des énergies fossiles ou du nucléaire (sachant que les arbitrages méthodologiques génèrent *ipso facto* une incertitude quant à l'estimation des coûts relatifs). Son prix ne souffre pas par nature des fluctuations du marché et des incertitudes qu'elles génèrent, et son coût carbone est nul ou très faible, quelle que soit la manière dont il est ou sera mesuré à l'avenir. L'éolien terrestre dispose même d'un coût inférieur à celui du nucléaire nouvelle génération et pourra être abaissé de 10 à 20% dans le futur. L'éolien maritime, qui en est à un stade moins avancé, reste plus cher, de l'ordre de 150 à 200 €/MWh. Il est anticipé que ce chiffre puisse être abaissé à 120 euros. Quoi qu'il en soit, l'éolien ne prétend pas se substituer en France aux sources d'énergies existantes, mais apporter un complément d'énergie propre à des conditions économiques qui ne dénaturent pas la compétitivité-prix de l'électricité en France, tant pour les entreprises que pour les citoyens.

Pour faire face à cet accroissement tendanciel de la demande, au niveau européen et mondial, l'industrie européenne est particulièrement bien placée, en position de leader sur la scène internationale, dans un contexte où les activités industrielles sont largement réparties en Europe. Il apparaît ainsi un enjeu majeur de politique industrielle européenne, qui fait pendant à celui de la politique énergétique européenne.
Cette bonne compétitivité relative s'inscrit dans le cadre d'une chaîne de valeur européenne, qui dispose d'un réel potentiel d'optimisation en termes de *supply chain* et de logistique, de coûts et de services. Cette chaîne de valeur est assurée par des *pure players* ou des filiales de grands groupes, concernant les donneurs d'ordre. La filière industrielle française compte à ce jour plus de 200 entreprises. On retrouve la présence de grands groupes au niveau du développement et de l'exploitation, ainsi que nombre de PME et d'experts de différents horizons. Il est essentiel de raisonner au niveau

européen dans son ensemble, sachant que les coûts de transport et de stockage des éoliennes et de leurs composantes tendent à fixer les capacités de production à proximité des marchés. Par ailleurs, les modalités de développement et d'installation des fermes éoliennes favorisent l'emploi de proximité. De cela, résulte que l'emploi éolien dans un pays est largement fonction des capacités cumulées installées, 1 MW générant en moyenne 1 emploi direct en Europe. Le chiffre peut être moindre (0,8) et aller jusqu'à 1,5 – le Danemark, dont la puissante industrie est concentrée sur l'exportation, fait ici exception. La France se situe dans la fourchette haute, car le tissu industriel y est dense. Les gisements d'emploi n'en sont pas moins considérables, en raison du potentiel non encore exploité d'intégration de nouvelles entreprises dans la filière, de l'entrée dans le jeu de donneurs d'ordre français et du développement en cours de l'éolien offshore.

Bien que l'éolien soit décrit comme une technologie « mûre », il recèle de multiples potentialités d'innovation. Il ne faut pas se focaliser ici, comme sur un plan général d'ailleurs, sur l'innovation de rupture, mais sur l'innovation incrémentale et globale. La R&D, importante au sein des donneurs d'ordre, se décline aux différents échelons de la filière et dans les différents pays d'implantation. Elle concerne tant les gains de productivité que l'électronique de puissance, pas tant la résistance des pâles que l'acoustique, la stabilité des fondations que les systèmes de maintenance. Cette conception holistique de l'innovation doit être privilégiée par l'ensemble des acteurs de la filière, les pouvoirs publics, les banques et financeurs en général.

Afin que l'éolien puisse assurer la mission qui lui est impartie, il lui faut sortir de l'injonction paradoxale qui bride son élan. Les conditions économiques d'achat de l'électricité doivent être stabilisées sous la forme de tarifs comprenant ou non des primes *ex ante* ou *ex post*. L'évolution des tarifs doit être corrélée aux gains de productivité à venir, complétés par des appels d'offre dans certains projets d'envergure nationale. Les délais administratifs de réalisation des projets doivent être, par ailleurs, raccourcis et simplifiés. Il s'agit sur le fond de lever les incertitudes et de dégager l'horizon de l'investissement de moyen et long terme, seule façon de générer de la part des entreprises, des investisseurs et des banques, des anticipations en cohérence avec les chiffres communément projetés.

Le développement de l'éolien, qui se prête à la décentralisation, se heurte à la tradition de centralisation française. En cela, il peut être à la pointe d'une mutation de fond, qu'a pu connaître dans un autre registre le secteur de l'informatique. Ce mouvement de décentralisation et de responsabilisation des acteurs locaux comme des citoyens, accompagne ainsi la mutation culturelle de la société française. Mais cela suppose une relation de confiance renforcée et structurée entre les acteurs économiques et les pouvoirs publics en matière d'innovation et d'emploi, qui doit être formalisée et faire l'objet d'un pacte unissant les acteurs et sujet à un suivi tout aussi formalisé. Plus généralement, l'éolien ne dispose pas encore de la reconnaissance institutionnelle qu'il peut légitimement revendiquer et qu'il doit maintenant acquérir à l'aune de l'ambition qu'on lui prête et des attentes que l'on manifeste à son endroit.

L'éolien est avant tout une source d'énergie, en cela appartenant à la catégorie des *utilities*. L'éolienne, comme objet technique, est pourtant l'héritière du moulin, à la vocation tout autant culturelle que fonctionnelle, qui doit s'inscrire aujourd'hui dans une perspective *design* à tous niveaux. Les discussions dichotomiques relatives à son esthétique n'ont pas lieu d'être et doivent laisser la place à une vision où les compétences en matière d'architecture, de paysagisme et de *design* doivent avoir toute leur place. Ce n'est pas tant le conservatisme paysager qui doit primer dans son aspect rigide, que le conservationnisme permettant notamment de veiller au fait que l'avifaune ne soit pas altérée, tandis que l'ichtyofaune peut directement bénéficier de l'éolien maritime. La mutation culturelle et *design* de l'éolien en cours s'étend à l'hydrolien ainsi qu'au petit éolien, ce qui se reflète dans les multiples initiatives entrepreneuriales et créatives en la matière, et concernera tôt ou tard l'habitat sur un plan plus général.

Enfin, en tant qu'énergie intermittente, l'éolien est très concerné par les réseaux et leur évolution. Ceci va bien au-delà des questions liées au raccordement, car ce qui est un problème marginal au sens économique du terme prend une autre dimension dès lors que l'éolien est appelé à se développer à une plus large échelle. Au-delà d'un relâchement des contraintes au point de raccordement des fermes éoliennes, rendu possible par des *grid-codes*, une amélioration du lissage de puissance, des systèmes de stockage, etc., il faut envisager une autre étape, qui est celle de la solution hybride, permettant d'interconnecter l'éolien (principalement offshore) avec le réseau alternatif par une liaison à courant continu. L'étape suivante, que nous recommandons de préparer dès aujourd'hui, consisterait à créer un nouveau réseau à courant continu accompagné de la mise en place des convertisseurs de puissance et de protections adéquates, en augmentant ainsi la capacité des infrastructures tout en minimisant les pertes. Il faudrait alors *in fine* se poser la question de la technologie des parcs éoliens du futur, dont les aérogénérateurs, *i.e. les turbines*, seraient interconnectés entre eux et avec le réseau en courant continu, les alternateurs restant naturellement de type à courant alternatif.

Ainsi l'éolien se trouve-t-il *de facto* à la pointe de la transformation technologique, économique, sociale et culturelle qui conditionne notre avenir énergétique comme notre mode de vie.

Introduction

Il est surprenant de voir à quel point l'énergie éolienne peut être controversée. Elle comprend certes d'ardents défenseurs mais aussi des détracteurs impitoyables. S'il lui est généralement reconnu d'être une énergie propre, en tout cas singulièrement plus propre que les énergies traditionnelles, fossiles et électriques, lui sont également associées des images qui rejaillissent immanquablement sur sa réputation : elle serait très chère, bruyante, peu productive. Certains y verraient même une duperie : on ferait tourner artificiellement les pales en l'absence de vent pour cacher sciemment aux citoyens qu'elles sont inefficaces ! Les éoliennes elles-mêmes donnent lieu aux réactions les plus contrastées. Rien n'est plus laid pour les uns : elles ne seraient ainsi qu'une sorte d'équivalent esthétique des lignes à haute tension, la différence étant qu'on peut tout à fait s'en passer. Tandis que d'autres ne sont pas insensibles à leur allure et à une forme de sérénité qu'elles peuvent inspirer. On trouve même une troisième catégorie de personnes, qui les apprécient pour peu qu'elles restent à une distance respectable de leur domicile. Les rapports eux-mêmes qui ont fait florès en France, en Europe et dans le monde semblent parfois peiner à se déprendre d'une forme de jugement de valeur *ex ante*.

C'est dans ce contexte passablement antagonique, et à l'occasion du grand débat national sur la transition énergétique, que l'Institut pour l'Innovation et la Compétitivité i7 de ESCP Europe, avec le soutien de France Energie Eolienne (FEE), publie un rapport contribuant à la réflexion sur la place de l'énergie éolienne dans la transition énergétique[1].

Concernant l'éolien, les enjeux économiques principaux résident dans la compétitivité de la filière aux niveaux européen et national, mais aussi la concurrence mondiale. A ces enjeux globaux, sont liés ceux de l'emploi, des opportunités d'innovation tant technologique qu'économique et sociale. Ce rapport est ainsi délibérément holistique, car il est incontournable d'intégrer l'ensemble des paramètres dans une vision raisonnable et prospective de l'avenir de l'énergie éolienne en France comme en Europe.

Un autre enjeu est bien évidemment politique. En France plus encore que dans d'autres pays européens, la politique énergétique se constitue dans un jeu complexe entre acteurs économiques et industriels d'une part, administratifs et politiques de l'autre. Le débat sur la transition énergétique se propose ainsi d'être un lieu de débat entre ces différents acteurs et les citoyens. Comme le précise la lettre de mission du secrétaire général du débat, la stratégie de la transition en France est fondée sur deux principes, à savoir l'efficacité et la sobriété

[1] L'Institut pour l'Innovation et la Compétitivité i7 est un *Think Tank* académique européen qui a pour A fort ancrage académique et aux liens étroits avec les entreprises, l'Institut i7 contribue à stimuler la création, la diffusion et l'échange de connaissances sur les pratiques les plus récentes autour de l'innovation entre trois types d'acteurs - académiques, entreprises et pouvoirs publics - afin de stimuler la capacité d'innovation des entreprises et des économies européennes. Il vise également à formuler une vision globale de la compétitivité (prix et hors prix) et à faire le lien entre les problématiques de compétitivité des entreprises et des nations.

énergétiques d'une part, et le développement prioritaire des énergies renouvelables (EnR). Des engagements politiques ont d'ores et déjà été pris. Le Président de la République s'est engagé à diminuer la part du nucléaire de 75% à 50% en 2025. Et les premiers appels d'offres pour le développement de l'éolien en mer ont été attribués début 2012. Du point de vue politique, l'objectif de préservation de l'indépendance énergétique de la France reste inchangé dans le fond mais doit être adapté dans la forme aux évolutions du contexte européen. Dans le cadre du traité de Lisbonne, les pays membres restent libres de choisir leur mix énergétique tandis que l'UE élabore les politiques globales (sécurité de l'approvisionnement, création d'un marché interne unifié, lutte contre le changement climatique) et contrôle leur application. En 2008, le paquet « énergie climat » a ainsi été adopté au niveau européen : en 2020, l'objectif est d'améliorer l'efficacité énergétique de 20%, d'atteindre 20% d'EnR dans la consommation et de diminuer de 20% les émissions de gaz à effet de serre (GES) par rapport à 1990. La France s'est pour sa part engagée, dès 2003, à diminuer de 75% ses émissions de GES à l'horizon 2050 par rapport au niveau de 2005, date à laquelle le niveau des émissions était revenu à celui de 1990. L'objectif en matière d'énergies renouvelables se situe pour la France au taux de 23 %, cible réaffirmée dans le cadre français par la loi « Grenelle I ».
Le Grenelle de l'environnement a également précisé les objectifs en matière d'énergie éolienne, avec des cibles de 3,4 et 1,4 Mtep[2] pour l'éolien terrestre et l'éolien off shore. Ce scénario correspond à un total de 19 GW sur terre et à 6 GW sur mer.

Ainsi qu'il a été écrit dans un rapport récent du CAS, « Nul ne peut prédire ce que sera le paysage énergétique en 2030, a fortiori en 2050. L'incertitude porte sur tous les domaines : elle est technologique, économique, politique, financière et même démographique »[3]. Dès lors, un objectif raisonnable consiste à disposer vers 2030 de la palette la plus large possible d'énergies à faible émission de carbone, dans *des plages de prix comparables (<100€/KWh)* en valeur économique équivalente actuelle). Cet objectif vise à disposer de marges de choix les plus importantes possibles à cet horizon. C'est à cette date notamment que le parc nucléaire exploité pendant 50 ans devrait commencer à être remplacé à forte cadence, selon la part que l'on souhaitera accorder au nucléaire à l'horizon 2050. A cet horizon, le but est que les choix soient les plus ouverts possibles.

Il existe un consensus sur cette position de diversification : les économistes ; les organisations nationales gérant le réseau et la régulation ; les industriels et syndicats professionnels. Il n'est que de prendre connaissance des écrits et prises de position de RTE en facteur du développement durable et de l'accompagnement de la transition énergétique, ou encore de l'Union Française des Industries Pétrolières : « L'UFIP souligne que, au cours de cette transition, toutes les énergies seront nécessaires et seront mobilisées pour assurer le développement de l'économie : "les énergies fossiles, le nucléaire et les énergies

[2] Millions de tonnes équivalent pétrole.
[3] Centre d'Analyse Stratégique (Groupe de travail présidé par Jacques Percebois), 2012, *Rapport énergies 2050*, Paris

renouvelables". Elle réaffirme qu'il est inutile de les opposer, car elles sont complémentaires et toutes indispensables. »[4]

Il s'agit ainsi d'accueillir toutes les énergies renouvelables, d'encourager une consommation plus flexible, de réduire les pics de consommation et de mieux maîtriser la demande, de développer les infrastructures de réseau, de rendre le système électrique plus intelligent (effacement et smart-grids). Toute analyse doit par ailleurs se référer à l'intrication des trois dimensions du marché, politique, économique, technologique.

Mais a-t-on tiré toutes les conséquences de cette mutation ? Pour contribuer utilement au débat s'agissant de l'énergie éolienne, ce rapport se propose d'établir un état des lieux de la filière en 2013 et de donner une vision prospective, c'est-à-dire qui mette l'accent sur les tendances, les potentialités de développement en lien avec les différents choix socio-politiques possibles. Ce cadrage portera autant sur la place de l'énergie éolienne dans le mix énergétique que sur les acteurs et la filière industriels. L'état des lieux doit servir de base à la réflexion portant sur les modalités du développement de la filière industrielle et les conditions de sa compétitivité. Nous essayons d'adopter une vision large de l'innovation et de la compétitivité en ne restreignant pas notre analyse au cadre strict de la France ni aux dimensions technologiques de l'innovation. Il s'agit de savoir quelle est la place de l'industrie européenne dans cette perspective. Un autre point essentiel consiste à mettre en évidence les interdépendances des marchés de l'énergie au niveau européen et mondial. Nous mettons également en avant la nécessité d'innovations technologiques incrémentales, mais aussi économique et sociale.
Cette analyse nous permet enfin de formuler des propositions d'orientation des politiques publiques pour alimenter le débat sur la transition énergétique et d'accompagner le positionnement des acteurs de la filière.

[4] http://www.enerzine.com/14/15486+inutile-dopposer-les-energies-entre-elles,-elles-sont-complementaires+.html , 22 mars 2013

A. Etat des lieux de la demande et de l'offre

Comme nous l'avons mentionné en introduction, des engagements politiques ont d'ores et déjà été pris quant aux perspectives d'ensemble de la transition énergétique. Le Président de la République s'est engagé à diminuer la part du nucléaire de 75% à 50% en 2025. La France a prévu de réduire de 75% les émissions de GES d'ici 2050, et de contribuer à l'objectif de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation finale, à l'amélioration de l'efficacité énergétique tout en maintenant indépendance énergétique et sécurité de la production.
Ces objectifs sont à resituer dans un contexte à la fois européen (mise en place d'un marché unique de l'énergie et réflexion collective sur les actions en faveur de l'environnement et du climat avec le paquet « climat énergie ») et mondial (protocole de Kyoto et engagement incertain des grands pays industriels ; crise économique mondiale qui donne à certains égards un coup de frein au développement de l'industrie éolienne, reposant partiellement sur une demande publique et le soutien financier des Etats.

1 La place de l'énergie éolienne en France

La France a un potentiel important en ressources énergétiques renouvelables, à la fois terrestre et maritime, tant en métropole que dans les DOM-TOM. Au 1er janvier 2013 selon les chiffres de RTE, 4500 éoliennes représentent une puissance installée de 7449 MW. L'énergie produite par le parc éolien a progressé de 23% par rapport à 2011, pour atteindre 14,9 TWh. **Cela représente actuellement 3,1% de la consommation nationale d'électricité et environ 10 000 emplois équivalent temps plein.**
La puissance éolienne installée en France atteint les 1 000 MW en Champagne-Ardenne et en Picardie et dépasse les 650 MW dans les régions Lorraine, Bretagne et Centre.

En 2012, le pic de production éolienne a été atteint le 27 décembre à 15h30 pour une puissance de 6 176 MW, soit un facteur de charge de 80,2%. Cette valeur de production n'avait jusqu'ici jamais été atteinte. Le taux de couverture moyen de la consommation par la production éolienne à fin décembre 2012 est de 3,1% contre 2,5% en 2011. Il a atteint près de 12% le dimanche 15 avril 2012 aux alentours de 17h30. La France est ainsi le 5ème pays européen en terme de puissance installée totale.

Cependant, après une période de croissance où la capacité installée augmentait de 30 à 100% d'une année sur l'autre entre 2005 et 2010, un recul du marché s'est amorcé en 2011 pour se confirmer en 2012 avec seulement 757MW raccordés (+8,4% de capacité de production).

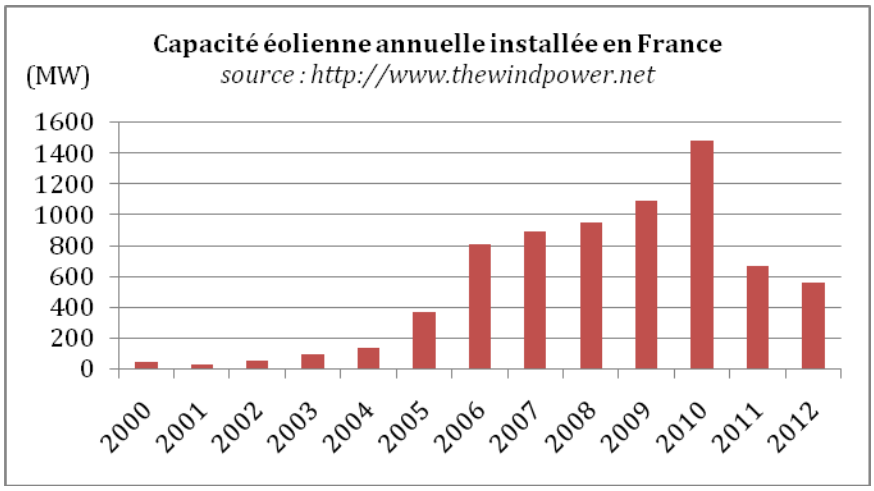


Figure 1
Capacité éolienne annuelle installée en France, 2000-2012

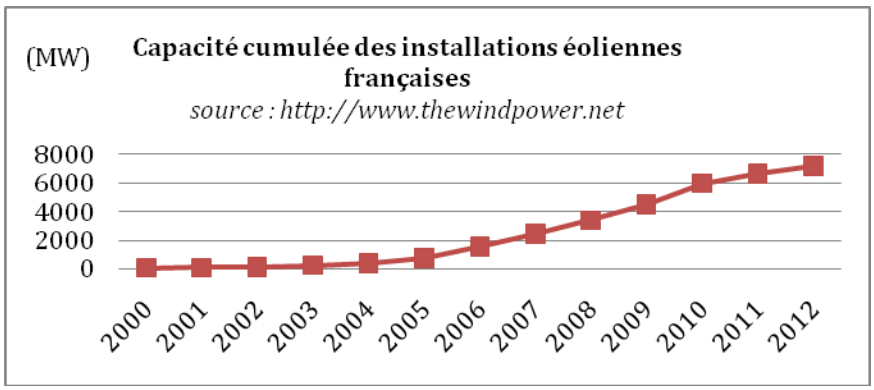


Figure 2
Capacité cumulée des installations éoliennes françaises, 2000-2012

Cette forte instabilité du marché pose des problèmes évidents. Elle est certes liée à une caractéristique inhérente aux marchés d'équipement et à la sensibilité particulière qu'ils présentent face aux évolutions de la conjoncture, selon un principe expliqué par les théories économiques les plus traditionnelles de l'accélérateur et de l'oscillateur. Mais elle est susceptible de mettre en péril non seulement la santé des entreprises mais aussi l'innovation et remet en cause l'objectif visant à atteindre un taux de 10% d'électrique d'origine éolienne dans le mix français en 2020. De surcroît, l'industrie éolienne n'ayant pas été dans le passé une priorité en France, il n'est pas encore possible aux industries qui s'y développement de pouvoir compenser en un temps bref une chute du marché par un rééquilibrage à l'exportation.

Une prolongation voire un renforcement du soutien public est ainsi justifié et même incontournable si la France souhaite atteindre ou approcher l'objectif de 25 GW de puissance éolienne en 2020. Fin juin 2012 la puissance installée en éolienne terrestre s'élevait à 7GW soit un peu plus d'un tiers de l'objectif. Au rythme actuel de 1 GW installé par an, la puissance terrestre cumulée fin 2020 ne serait que de 15,5 GW, au lieu des 19 GW escomptés. En outre, aucune éolienne off shore n'est pour l'instant installée. Les appels d'offre récents et à venir sont calibrés au regard de l'objectif de 6 GW installés en 2020 mais les retards pris dans cette procédure et les délais nécessaires à la mise en œuvre rendent impossible la finalisation de l'installation d'une telle puissance à cet horizon.

2 La place de l'énergie éolienne en Europe

Au 1er janvier 2012, la puissance totale installée dans l'Europe des 27 s'élevait à 105.7 GW, soit une croissance de 12% par rapport à la puissance cumulée de 2011.

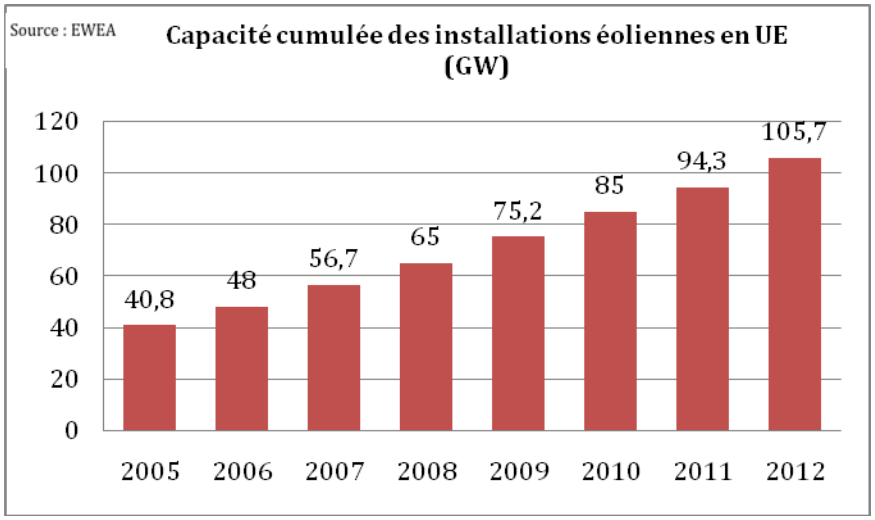


Figure 3
Capacité cumulée de production des installations éoliennes en UE, 2005-2012

Au niveau de la répartition de cette puissance installée dans les différents pays, on constate de fortes disparités. En 2012, l'Allemagne héberge plus de 30% du total des installations européennes d'éoliennes, devant l'Espagne, l'Italie et Grande-Bretagne puis la France. Quinze pays de l'UE ont au total installé plus de 1GW de puissance éolienne.

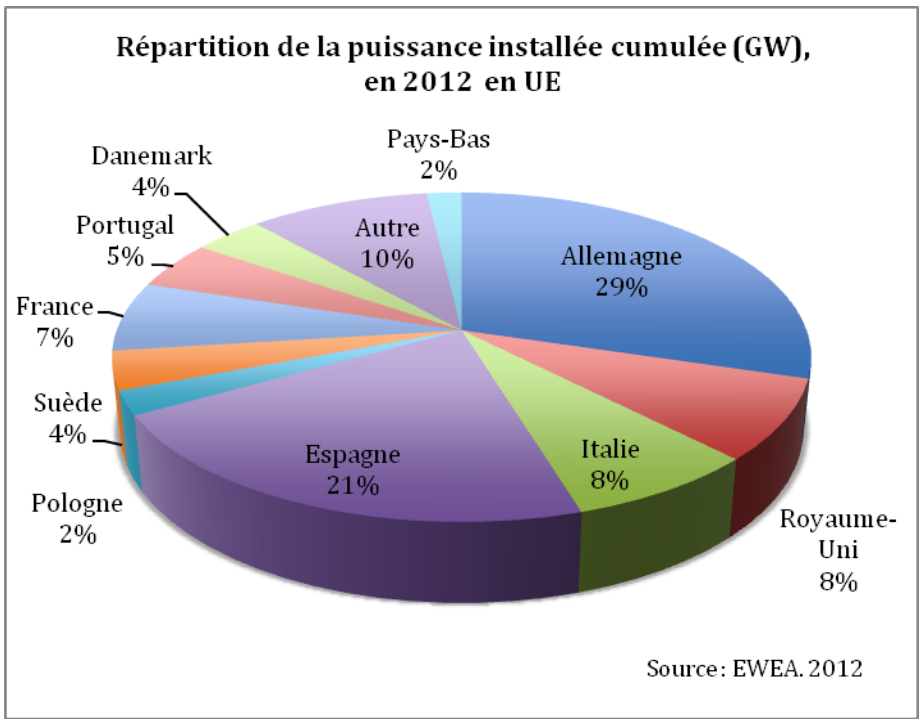


Figure 4
Répartition de la puissance installée cumulée en UE (2012)

Cette répartition des installations doit être mise en regard de la part de l'éolien dans la consommation électrique totale, afin de ne pas se laisser tromper par « l'effet taille » des pays européens. Ainsi le Danemark n'abrite que 4% de la puissance éolienne européenne installée mais l'électricité en provient à hauteur de 27%. L'Allemagne, quant à elle, compte 30% de la puissance éolienne installée pour une part de 11% de sa production électrique

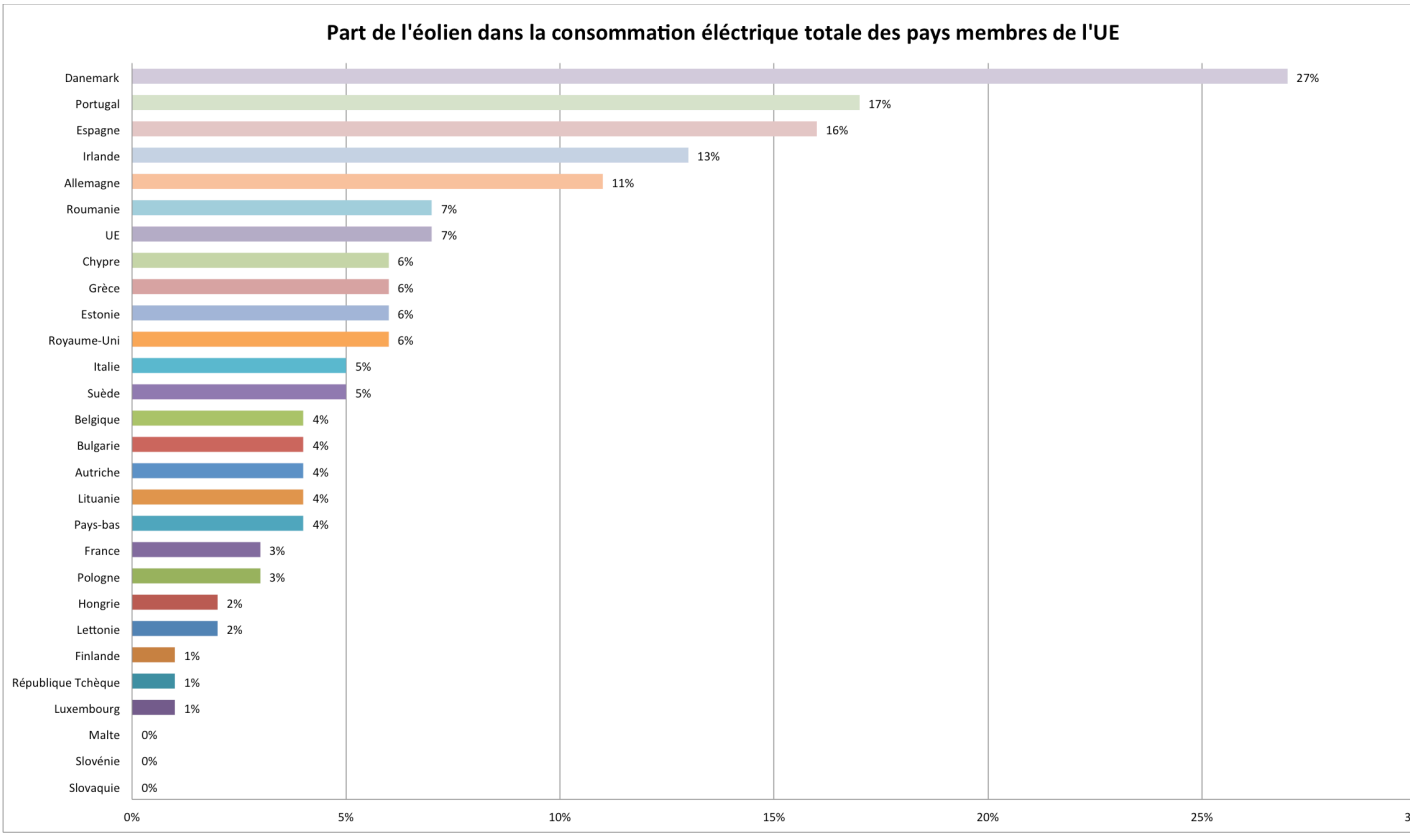


Figure 5
Part de l'éolien dans la consommation électrique en UE, 2012. Source : EWEA

De manière générale, la puissance éolienne installée a augmenté de façon constante au cours des 17 dernières années (de 814MW en 1995 à 11567 MW en 2012), ce qui représente une croissance annuelle moyenne du marché de 15,6%. Si l'on considère la capacité de production en 2012, elle a augmenté de 132% depuis 2005 et à un rythme annuel de 12% en moyenne ces deux dernières années.

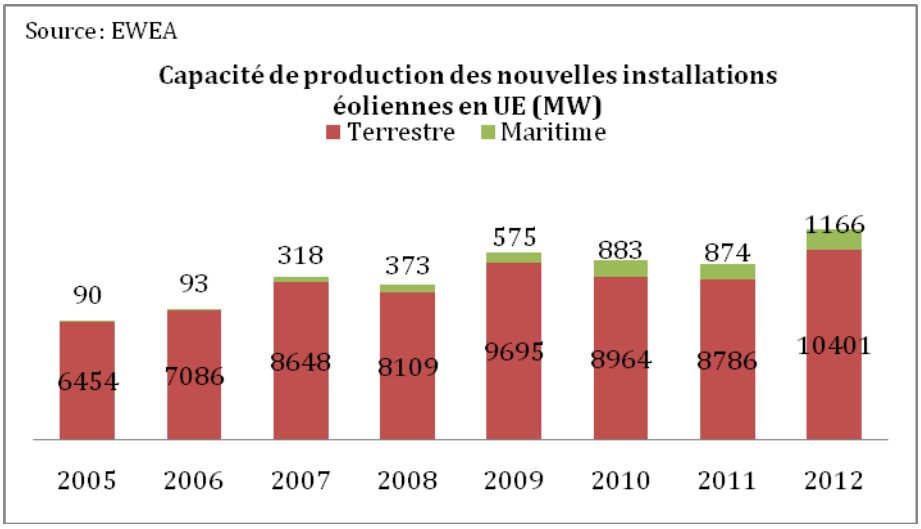


Figure 6
Capacité de production des nouvelles installations éoliennes en UE, 2005-2012

Cette croissance est cependant inégale. Toujours en forte croissance en Allemagne, en Suède et au Royaume-Uni, l'éolien terrestre marque également de fortes performances dans certains marchés émergents de Europe de l'Est. En revanche, on observe une baisse des installations dans les marchés plus matures comme l'Espagne ou le Danemark où la croissance annuelle se situe autour de 5% sur les trois dernières années.

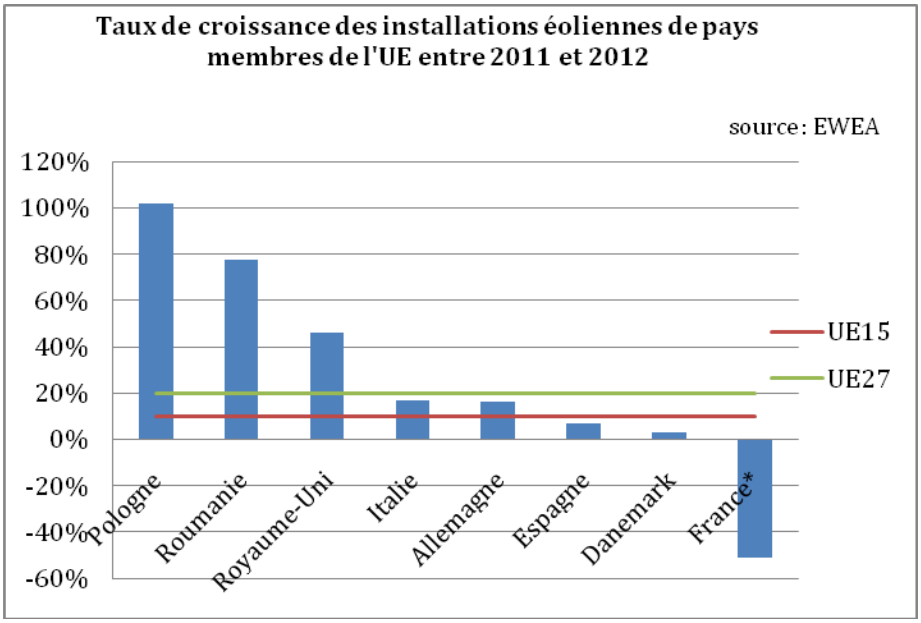


Figure 7

Taux de croissance des installations éoliennes de pays membres de l'UE, 2011-2012

Il est intéressant de comparer cette évolution avec celle des autres capacités de production énergétique, en 2012 où l'on constate nettement, au niveau européen, que les énergies renouvelables constituent les marchés d'installation les plus dynamiques, le gaz étant le seul autre secteur en progression, ce qui contribue à faire évoluer la répartition par source de la production électrique en UE encore dominée par le charbon (25%), qui sera bientôt rattrapé par le gaz au rythme actuel des installations.

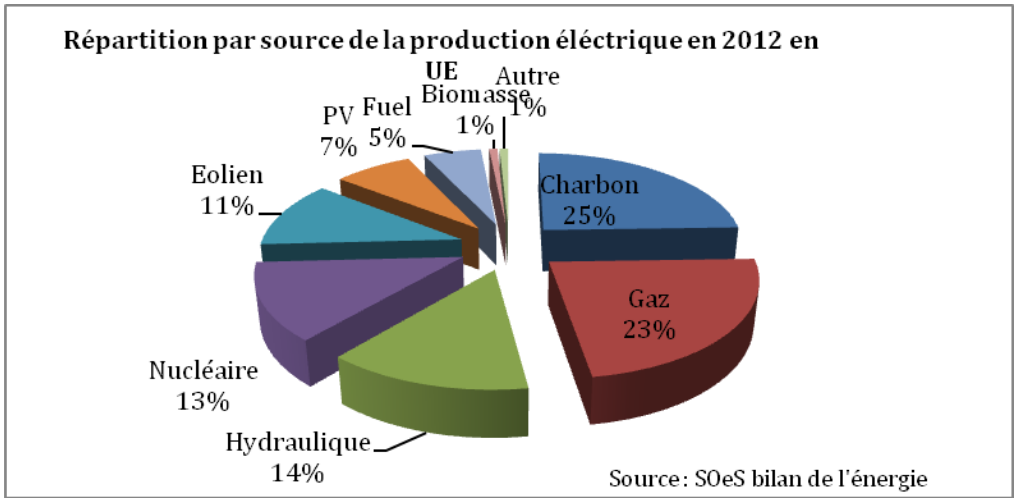


Figure 8
Capacité de production des nouvelles installations éoliennes en UE, 2005-2012

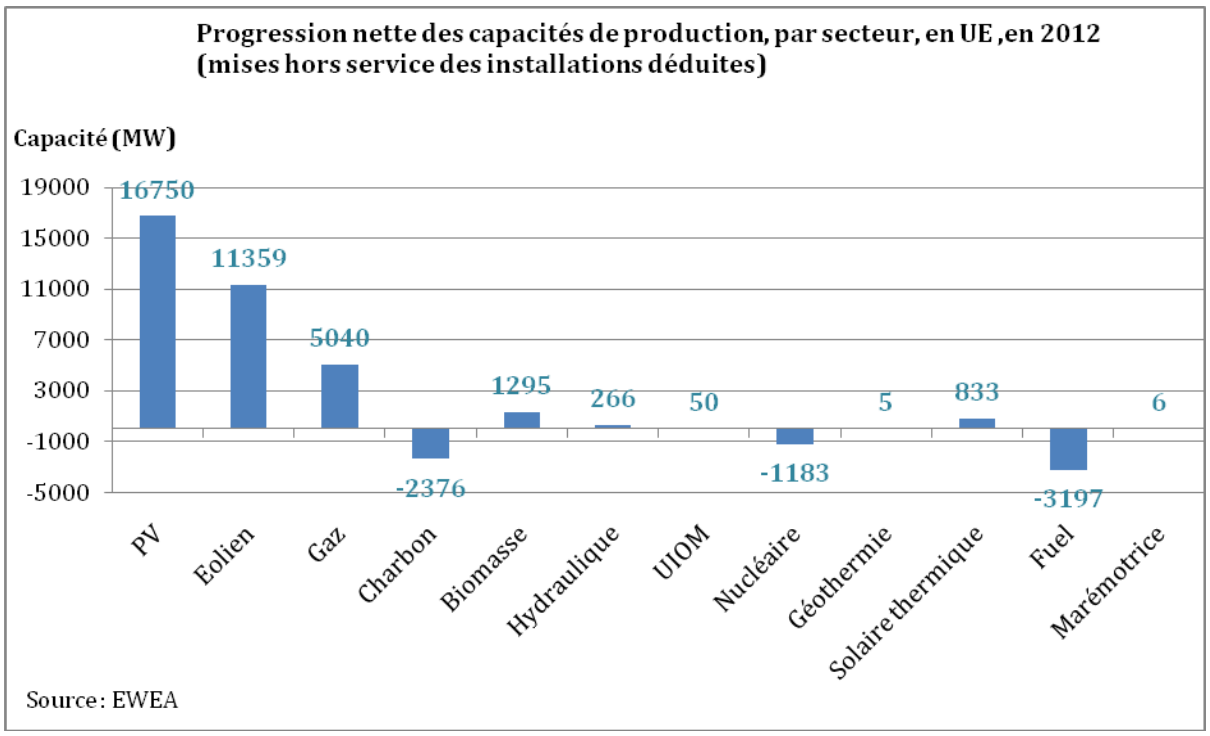


Figure 9
Progression nette des capacités de production par secteur, en UE, en 2012

Ces tendances correspondent aux objectifs européens de l'Union, particulièrement ambitieux fixés pour 2020 en matière d'énergies éolienne et photovoltaïque. Pour l'énergie éolienne, il s'agit d'atteindre les 230 GW, ce qui permet de couvrir entre 14 % et 18 % de la demande en électricité, alors que nous ne disposons aujourd'hui que d'une capacité installée de 105,6 GW ce qui permet de couvrir 11% de la production électrique.

Au niveau européen, un des enjeux pour les années à venir est de travailler à l'amélioration de l'interconnexion des réseaux électriques et du couplage des marchés. Le marché unique intégré de l'électricité (MIE) doit être réalisé à l'horizon 2014 selon les vœux du Conseil Européen. Les interconnexions entre les marchés sont effectives et nombreuses : la France compte par exemple 46 points d'interconnexions. Le couplage[5] des marchés, effectif entre la France, l'Allemagne et le Benelux, doit s'étendre au Nord Pool (Danemark, Suède, Norvège) ainsi qu'au Royaume-Uni, à la Pologne et aux pays baltes : le projet North Western Price Coupling (NWE) devrait être opérationnel en novembre 2013. En parallèle, les pays de la péninsule ibérique interconnectés entre eux et avec la France vont être intégrés dans les tests afin d'accélérer le couplage des deux zones. L'étape suivante sera le couplage des autres pays européens, en commençant par l'Europe centrale puis l'Europe du Sud-Est.

[5] Les mécanismes de couplage de marché permettent d'optimiser le processus d'allocation des capacités transfrontalières grâce à un mécanisme de formation des prix coordonné, prenant en compte les ordres entrés par les membres de plusieurs marches organisés (source : http://www.epexspot.com/fr)

3 La place de l'énergie éolienne dans le monde

D'après les statistiques 2012 du Global Wind Energy Concil (GWEC), la puissance éolienne totale installée fin 2012 dans le monde s'élevait à 282 482 MW. La capacité ajoutée sur la période 2011-2012 représente un taux de croissance de 19 %. Depuis dix ans, ce taux de croissance est en moyenne de 26% par an. D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée.

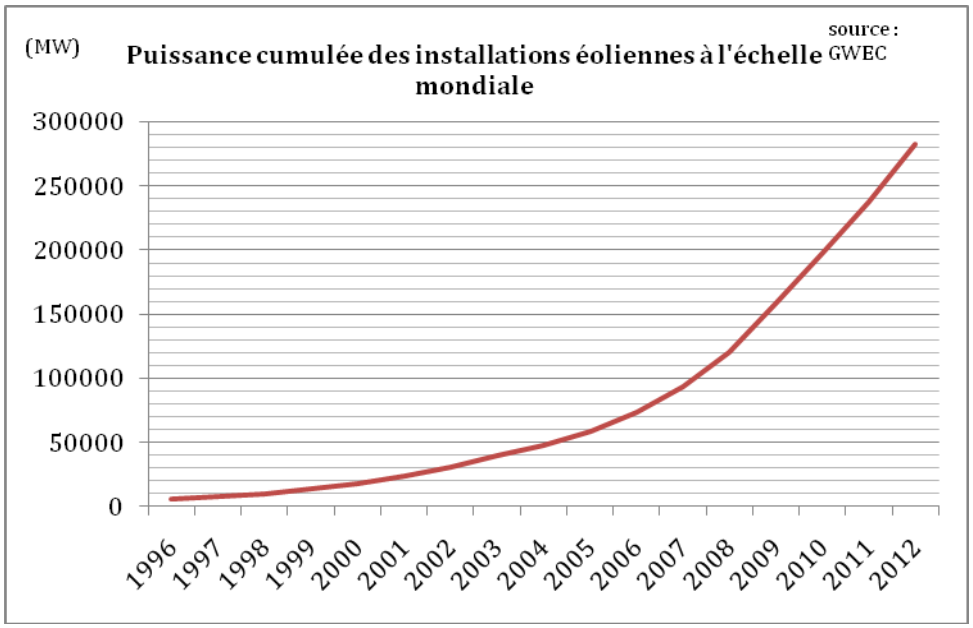


Figure 10
Puissance cumulée des installations éoliennes à l'échelle mondiale

L'augmentation annuelle de la capacité mondiale liée à l'installation de nouvelles éoliennes montre que le décollement de l'industrie s'est produit au début des années 2000 pour s'accélérer en 2004, c'est-à-dire juste avant l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto en février 2005. Après une période faste de croissance pendant quatre ans, la crise financière mondiale de 2008 a eu des répercussions immédiates sur le secteur éolien dont la croissance a subit un coup d'arrêt brutal pour repartir ensuite à un niveau moins élevé.

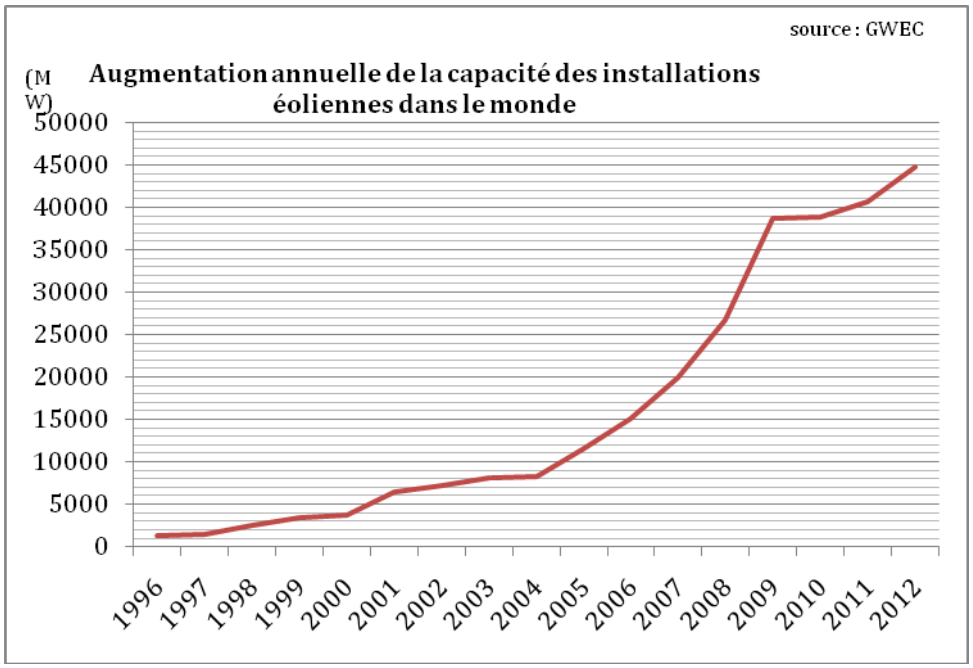


Figure 11
Augmentation annuelle de la capacité mondiale des installations éoliennes dans le monde, 1996-2012

Les pays dont la capacité augmente le plus sur la période 2011-2012 sont la Chine et les Etats-Unis qui représentent actuellement 48% de la production mondiale. Selon ce même rapport au 1er janvier 2013 la France se situe actuellement au 8ème rang mondial des capacités installées par pays, les quatre premiers étant la Chine (75 564 MW), les Etats-Unis (60 007 MW), l'Allemagne (31 332 MW) et l'Espagne (22 796 MW). Elle a été dépassée en 2012 par l'Angleterre et l'Italie.

La crise économique qui frappe depuis quatre ans le secteur de l'éolien est devenue mondiale. La baisse de la demande en Asie depuis deux ans, couplée à la baisse des subventions et aides publiques en Europe notamment, a généré des surcapacités mondiales. Aux Etats-Unis, 2012 marque la fin des crédits d'impôts pour les parcs éoliens, d'où il a résulté par un effet d'anticipation une forte augmentation des ventes avant la fin de l'année 2012. Les Etats-Unis sont devenus en 2012 le premier marché avec 13124 MW de nouvelles installations, dépassant la Chine où elles se sont élevées à 12960 MW, chiffre en diminution de 26%. Suivent l'Allemagne, l'Inde et le Royaume-Uni. On peut maintenant s'attendre à la baisse du prix des turbines et surtout à la chute du nombre des commandes aux Etats-Unis, qui pourront être partiellement compensées par une accélération des marchés canadien et brésilien. Des études, notamment menées par HSBC, montrent toutefois une baisse de 12% en volume du marché mondial en 2013, alors que les usines des principaux turbiniers tournent au ralenti. La reprise du développement devrait avoir lieu à partir de 2014, non seulement pour l'éolien terrestre mais aussi avec le développement de l'éolien offshore.

4 L'Europe et la France dans la compétition industrielle mondiale

Il faut ici souligner un point important : en l'état actuel des choses, l'Europe tient son rang dans la compétition mondiale où elle continue d'être en position de leader en dépit d'une érosion relative de ses parts de marché. Le tableau ci-dessous figure les parts de marché relatives des différents grands compétiteurs, qui peuvent être des « *pure players* » (Vestas, Enercon, Gamesa, etc.) ou des filiales de groupes aux activités plus globales (Siemens, General Electric, etc.). La compétition mondiale est d'une grande intensité, sujette tant à l'évolution des marchés qu'aux paramètres politiques qui souvent les conditionnent.

Si l'on examine les données de 2011, apparaît la forte position danoise, à travers Vestas mais aussi indirectement Siemens (tout en ayant leur siège en Allemagne, les activités liées à l'énergie éolienne sont situées essentiellement au Danemark suite à l'acquisition de Bonus AS en 2004. Siemens comptait, en 2011, 7800 salariés dont 5200 au Danemark et 1000 en Allemagne. L'industrie allemande fait également très bonne figure avec, outre Siemens, Enercon et deux entreprises figurant juste après la dixième place et représentant 2%du marché mondial, Nordex et Repower. L'Espagne, à travers Gamesa, reste également bien placée. General Electric occupe également une place de choix, tout en restant très centré aujourd'hui sur le marché américain.

2012 marquerait une évolution des classements selon Navigant Research. Vestas aurait perdu sa première place mondiale au bénéfice de Général Electric, Siemens se glissant à la troisième place, Enercon à la quatrième devant Suzlon, Gamesa et les quatre plus importants turbiniers chinois perdant du terrain. Ces données sont peu ou prou confirmées par Bloomberg New Energy Finance, qui met au coude à coude GE et Vestas avec 11,8% de part de marché, juste devant Siemens (11%) puis Enercon (7,2%), Suzlon/Repower désormais agrégé (6,6%), Gamesa (6,4%) et les quatre turbiniers chinois (Goldwind, 6% ; Guodian ; 3,5% ; Sinovel, 2,7% et Sewind, 2,3%). Ces chiffres sont toutefois contradictoires avec ceux qui sont produits par le cabinet danois Make Consulting, qui place Vestas en tête avec 14,6% contre 13,7% pour GE, Gamesa devant Enercon et prend acte de la sortie des turbiniers chinois du top ten.

Au-delà d'un débat méthodologique et d'un désaccord sur le leadership mondial (symboliquement important sous l'angle de la domination de Vestas tout au long de la dernière décennie), ces résultats ne sont pas surprenants. Les excellents résultats de GE pour 2012 sont mécaniquement liés à l'importance des commandes aux Etats-Unis sur l'année, où GE réalise deux tiers à trois quarts de ses ventes, tandis que la mauvaise performance des turbiniers chinois est symétriquement liée à la plongée du marché local. On retrouve la sensibilité particulière des marchés d'équipement à l'évolution de la demande.

De surcroît, l'industrie éolienne est peut être sujette à une forme d'injonction paradoxale, dans le sens où l'éolien est souvent une priorité énergétique et économique affichée des

gouvernements mais est dans le même temps sujet aux aléas des politiques publiques et soumis à la concurrence des industries des pays émergents, sans oublier la crise économique européenne.

Dans ce contexte, le leader Vestas traverse une période difficile, a réduit ses effectifs depuis début 2012 de plus de 5000 salariés avec en perspective un effectif réduit à 16000 salariés fin 2013. Différents scénarios sont envisageables : le redressement et la poursuite de l'activité en tant que *pure player*, la prise de participation d'un groupe aux activités diversifiées (des discussions en cours ont été confirmées avec Mitsubishi), dans un contexte où les deux leaders chinois, Sinavel ou Goldwind, marquent leur intérêt pour cette belle entreprise. Il faut ici souligner l'importance considérable du rôle de Vestas, qui à ce jour a élaboré un cinquième des turbines vendues dans le monde et assure l'équivalent des besoins en électricité de 19 millions de consommateurs européens ; également pour l'économie danoise, où l'entreprise représente le cinquième de l'activité industrielle et 6,4% des exportations (en 2011). Pour autant, le gouvernement danois a fait part de sa volonté de ne pas intervenir dans domaine ne relevant pas de l'économie publique.
Cela dit, Vestas est loin cela dit d'être la seule entreprise à connaître des difficultés. Ainsi Gamesa a prévu la réduction de 20% de sa masse salariale, en Europe, en Chine et aux Etats-Unis.

Après avoir été en pointe il y a plusieurs décennies avec Jeumont-Schneider, l'industrie de l'éolien a été délibérément laissée de coté, avant de redevenir un enjeu avec la mise en œuvre de la transition énergétique. L'éolien n'était pas une priorité car il était considéré comme relativement coûteux et pas plus propre que le nucléaire en termes d'émission de CO2. Un autre point important a également valeur d'explication : le fait que l'éolien a une propension à se développer d'autant plus grande qu'il s'inscrit dans un pays de tradition décentralisée. La décision d'implantation d'une ferme éolienne, s'agissant du terrestre en tout cas, relève d'acteurs locaux et non pas nationaux, fût-elle soumise à une législation et à une réglementation nationales. C'est d'ailleurs le cas des énergies renouvelables en général et ça a le mérite parmi d'autres de responsabiliser lesdits acteurs et la population en général. Toutefois, ce type d'approche heurte en quelque sorte la tradition française de politique énergétique, laissant une large place à la centralisation et à l'idée d'une stratégie d'indépendance pilotée à l'échelle nationale. C'est un point sur lequel il conviendra que la France fasse un jour son aggiornamento, de même qu'elle a dû le faire en matière informatique ; ainsi les citoyens, au-delà de la technologie des smart grids, seront-ils davantage amenés à l'avenir à participer à l'autocontrôle de la consommation énergétique, sans même évoquer ici le rôle potentiel de l'autoconsommation, fût-il très limité.

Cette situation a conduit à la répartition du marché français suivante :

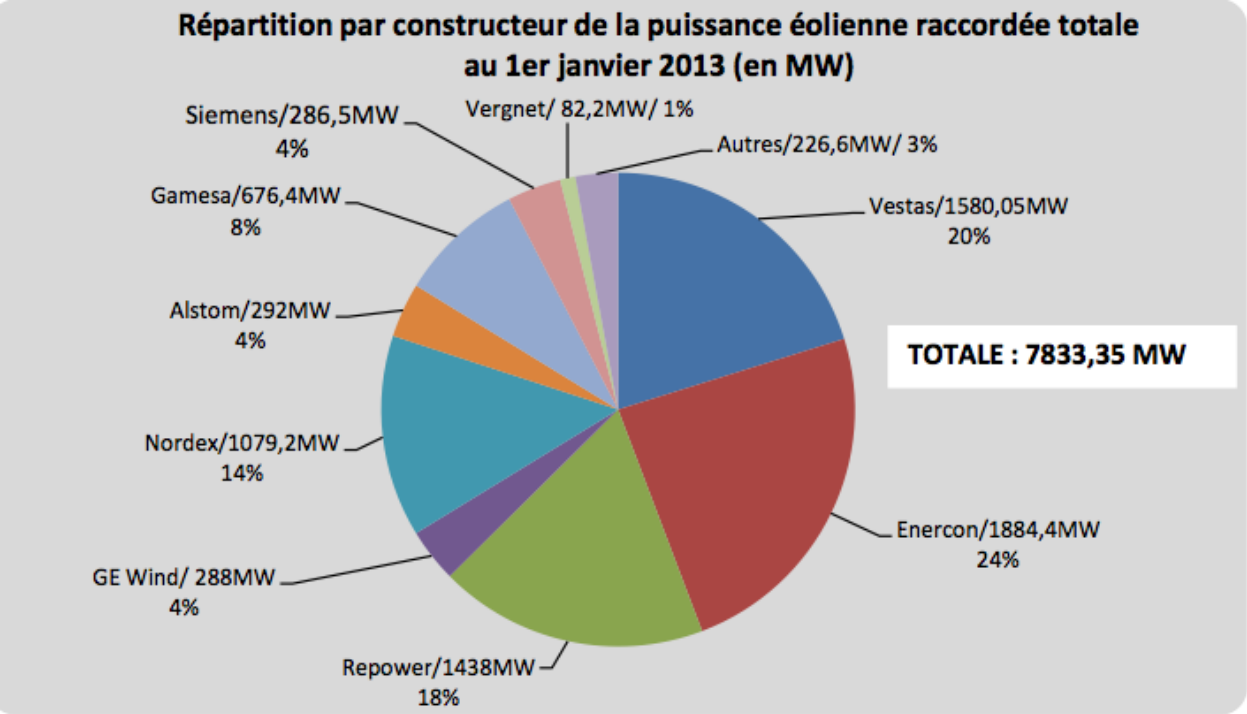


Figure 12
Répartition par constructeur, en France, de la puissance éolienne raccordée totale au 1er janvier 2013. Source : FEE

On constate ainsi que les turbiniers allemands représentent environ 56% du marché français, tandis que l'industrie danoise (en incluant Siemens) en représente le quart. On constate également que la part de marché relative de Nordex et Repower est significative si l'on garde à l'esprit leur poids à l'échelle du monde. On retrouve l'idée traditionnelle des liens forts entre les deux pays (même si Repower appartient à Suzlon).

Si l'on s'intéresse maintenant par comparaison au marché allemand, on peut faire trois constatations. Premièrement, la prédominance de l'industrie allemande sur son marché, dont elle représente les trois quarts. Deuxièmement, la nette domination d'Enercon, typique Mittelstand familial très bien implanté sur son marché tout en étant très ouvert à l'international. Troisièmement, le bon chiffre de Bard, si l'on garde à l'esprit que cette entreprise se consacre à l'offshore, dont on mesure ainsi une réelle émergence au niveau global.

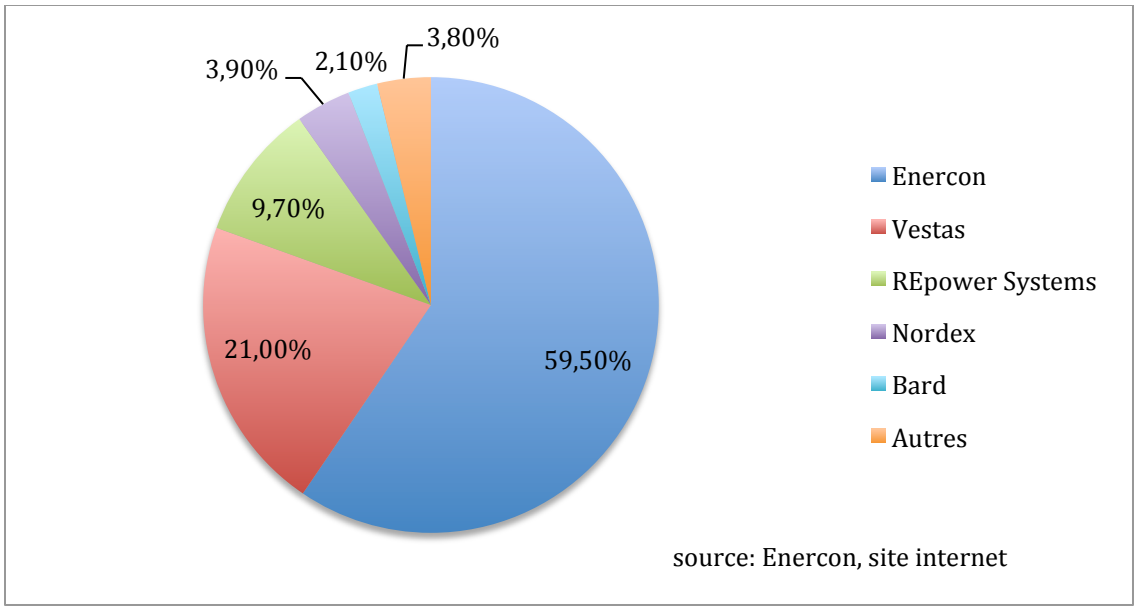


Figure 13
Répartition par constructeur, en Allemagne, de la puissance éolienne raccordée totale en 2011

Dans ce paysage global l'éolien offshore, beaucoup plus restreint à ce jour que l'éolien terrestre, redistribue les cartes sans que l'on sache à moyen terme ce qu'il sera de la position concurrentielle des différents acteurs. Toujours est-il que Siemens est aujourd'hui particulièrement bien placé, puisqu'occupant 80% du marché avec 693 MW installés, devant Repower (13%) et Bard (7%). Il s'agit des chiffres de 2011, année du décollage de l'éolien maritime grâce au marché britannique qui, avec 750MW a représenté 85% des installations devant l'Allemagne (100 MW).

L'éolien devenant une priorité, il est logique que les grands acteurs français de l'énergie s'intéressent à son développement industriel. Ainsi, Alstom et Areva s'y sont-ils désormais fermement engagés, pour le terrestre et pour l'offshore avec Alstom, uniquement pour l'offshore avec Areva. C'est dans ce contexte qu'Alstom a pris en 2007 le contrôle d'Ecotècnia (fabricant d'éoliennes espagnol) et qu'Areva a acquis en 2007 51% de Multibrid (entreprise allemande spécialisée dans l'éolien offshore) – tandis que les circonstances ont fait que Repower, dont le groupe français était le premier actionnaire, passe au même moment sous pavillon indien – puis, mi 2009, PN Rotor, fabricant allemand de pales de haute technologie pour les turbines éoliennes offshore, et enfin en juin 2010 les 49% restant de Multibrid depuis renommé AREVA-Wind.

Ainsi Alstom et Areva sont-ils aujourd'hui en mesure de s'intégrer au paysage concurrentiel mondial, et pour commencer en France, ce dont témoigne leur participation active au premier appel d'offres offshore, qui a largement bénéficié à Alstom. On retrouve à cet égard les grands acteurs de l'énergie français, impliqués dans le cadre de procédures concurrentielles à caractère centralisé permettant le regroupement dans divers consortia. Il est en tout état de

cause essentiel pour la France de disposer de champions dans le domaine de l'éolien dès le moment où elle s'y engage résolument.

Nonobstant, il importe tout autant d'avoir un œil des plus attentifs sur la situation européenne. S'il est coutumier d'évoquer l'impératif d'une politique énergétique européenne, notamment en matière de réseau, point sur lequel nous reviendrons, il est en de même pour la politique industrielle énergétique. La France est la principale avocate de la politique industrielle européenne, cela vaut sans conteste pour l'industrie de l'éolien. A l'horizon 2020, il est essentiel que le top 10 et même le top 20 soit composé d'entreprises en majeure partie européennes issus notamment des pays où l'éolien est une priorité stratégique. C'est d'autant plus vrai que le redéploiement requerra un soutien public (pour tous les pays concernés et à l'échelle européenne) et il serait très paradoxal que ce soutien finance des industries qui n'aient pas d'implantation en Europe.

Ce qui vaut pour l'éolien terrestre et offshore vaut également pour l'hydrolien, ainsi que pour le petit éolien, qui ne sont pas traités formellement dans ce rapport. Le petit éolien, en particulier, est plus aisément transportable et manufacturable en Asie et pourra également représenter un enjeu important à un horizon de dix ans.

B. Compétitivité, chaîne de valeur et emploi

1 La compétitivité de l'éolien

Cette question est sans cesse débattue en France, mais aussi dans bien d'autres pays. Les uns considèrent qu'il est parfaitement compétitif, les autres qu'il est artificiellement subventionné et qu'il en résulte un coût dommageable pour la collectivité. Les points de vue peuvent être très affirmés et donner lieu à une forme de vivacité et parfois d'agressivité dans l'expression contradictoire. Citons par exemple le débat danois à ce sujet, initié par le rapport d'un important *think tank* d'inspiration libérale, le Cepos, accusant l'éolien du pire notamment en matière d'emploi, de prix à l'électricité et de subvention à l'exportation[6]. Une coalition d'experts et académiques indignés y a répondu quelques mois plus tard, point par point, dans un rapport tout aussi vigoureux[7]. On retrouve en France des antagonismes similaires. Ainsi, l'Institut Montaigne s'est-il élevé contre l'éolien, sujet auquel le CAS s'est également attelé en adoptant un point de vue plus modéré[8] (voir le compte-rendu du débat en annexe). Ce qui frappe également sur un plan plus général est les fréquentes accusations de déni d'objectivité, tel ou tel point de vue étant suspecté de dissimuler l'instrumentalisation d'un lobby, qu'il s'agisse de celui du nucléaire, de l'énergie fossile, de l'éolien lui-même, etc.

Le débat sur la compétitivité a un enjeu supplémentaire en France. Toutes les études de compétitivité industrielle globale affirment – c'est un même un truisme de le préciser ! – que le prix de l'électricité y est particulièrement compétitif. Cela viendrait même compenser l'accroissement des coûts salariaux plus rapide dans notre pays ces dernières années. **Il s'agit en tout cas d'un facteur déterminant de compétitivité-prix.** Quant au consommateur, il est également très bien loti, avec un prix inférieur et parfois très inférieur à celui dont doivent s'acquitter ceux des pays voisins. L'éolien, comme d'ailleurs l'ensemble des énergies renouvelables, est dès lors parfois présenté comme une menace que seule une subvention déraisonnable peut temporairement et faussement écarter. Ce propos est encore plus affirmé depuis que se laisse entrevoir le supposé eldorado du gaz de schiste.

Dans ce contexte, il est important de donner ici quelques ordres de grandeur, quitte à en relativiser quelque peu l'évaluation dans un second temps. L'électricité est aujourd'hui vendue à

---

[6] CEPOS (Center for Polistiske Studier), 2009, *Wind energy, the case of Danemark*.

[7] CEESA (Coherent Energy and Environmental System Analysis) Research project, 2010, *Danish wind power export and cost,* Department of Development and Planning, Aalborg University.

[8] Centre d'Analyse Stratégique, 2009, *Le pari de l'éolien*, La documentation française, Paris
Le Biez Vincent, 2008, «Eoliennes : nouveau souffle ou vent de folie?», Institut Montaigne, Briefing paper
Le Biez Vincent, 2008,, «Pour rétablir la vérité sur le coût de l'éolien», Institut Montaigne, Briefing paper.

un prix de marché de l'ordre de 45 euros le MWh. A ce prix, le nucléaire comme le gaz sont considérés comme les plus compétitifs, talonnés par l'éolien terrestre (voir la figure 14 ci-après pour un tableau de synthèse du coût de production des différentes énergies).

S'agissant du nucléaire, la Cour des Comptes estime dans son dernier rapport que le **coût moyen du MWh produit s'élève à 49,5 € avec les données de 2010[9].** Il s'agit bien sûr du prix correspondant aux centrales existantes et qui intègre en partir le coût de la gestion du vieillissement et de la rénovation. Cependant, dans les 20 ou 30 ans à venir, les centrales qui atteindront 40 ans d'exercice devront faire l'objet de profondes rénovations de leurs réacteurs ou de démantèlement. Les investissements à prévoir à court et moyen terme représentant a minima un doublement du rythme actuel d'investissement de maintenance. **Ce doublement fera augmenter le coût moyen de production de l'ordre de 10 %, soit un coût d'environ 54 euros/MWh pour le nucléaire traditionnel.**
Quant au « nouveau nucléaire », son coût complet se situe aujourd'hui à un niveau compris entre 80 et 100 euros par MWh – et les estimations ont plutôt tendance à augmenter en raison des délais dans la fabrication de l'EPR.

Concernant les centrales à cycles combinés gaz (CCG), les niveaux de prix fluctuent fortement en fonction du prix du gaz naturel. Le rapport *Energies 2050* met ainsi en évidence un coût de 49 euros/MWh en 2010 mais de 69 euros/MWh en 2011, en raison d'une variation de 20 euros du combustible[10]. L'inconvénient sur le moyen/long terme est bien l'importance des fluctuations potentielles du prix ainsi qu'une dépendance énergétique évidente. Le gaz de schiste est évidemment dans ce contexte intéressant à envisager au point d'être parfois perçu comme la solution à nos maux énergétiques, mais les conditions actuelles d'extraction et l'interrogation sur le niveau réel des réserves en France (sans oublier la fluctuation des prix du marché auxquelles il n'échappera pas) excluent à l'évidence d'en faire la solution idéale des années à venir. Par ailleurs, le coût carbone n'est pas pris en compte ici. Il est souvent dit qu'il n'est, *de facto*, pas essentiel puisque les prix des quotas d'émission sont aujourd'hui des plus réduits. Mais on ne peut pas raisonner ainsi et se contenter d'observer que le niveau exécrable de notre taux de croissance a brisé la prise en compte économique de la pollution carbone. Il faut raisonner à moyen et long terme en examinant le coût carbone additionnel selon différents scénarios de croissance, sans exclure l'instauration d'une taxe carbone et son impact potentiel.

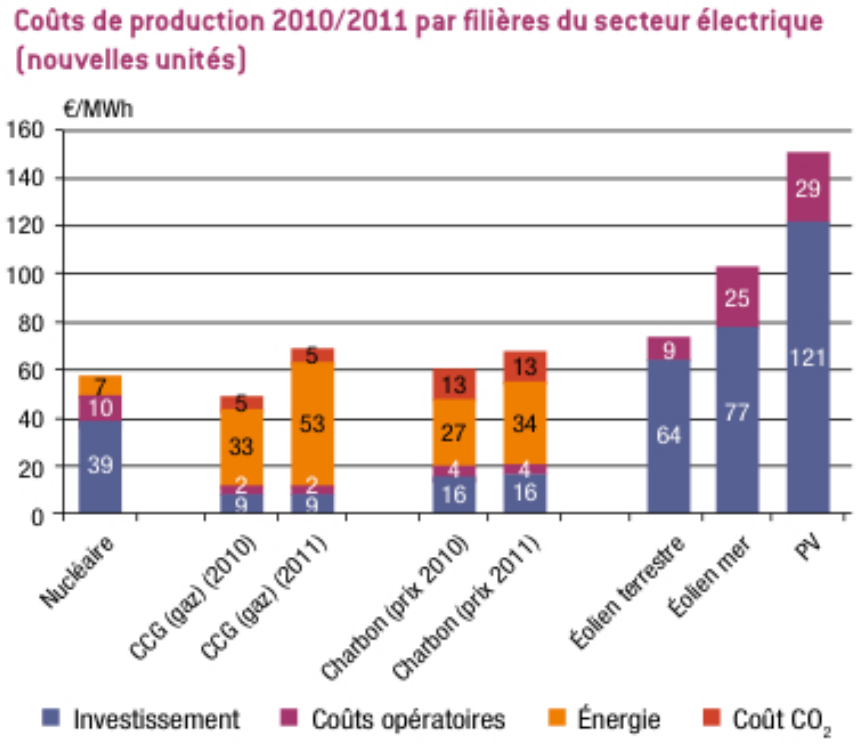
Ce document ne porte pas sur la transition énergétique en tant que telle – raison pour laquelle ne sont pas citées ici toutes les sources d'énergie – mais sur la place de l'éolien dans cette perspective. Dès lors qu'on accepte le principe de la transition énergétique, il s'agit de réfléchir en termes de coût marginal et de se porter prioritairement sur les énergies renouvelables les moins coûteuses. Or, il n'y a aucun doute sur le fait que l'éolien terrestre s'impose à cet égard, avec un coût compris aujourd'hui entre 75 et 80 euros par MWh et des perspectives

[9] Cour des Comptes, 2012, *Les coûts de la filière électronucléaire*, Rapport public thématique

[10] Centre d'Analyse Stratégique (Groupe de travail présidé par Jacques Percebois), 2012, *Rapport énergies 2050*, Paris

d'abaissement à 60 ou 65 euros, point sur lequel nous allons revenir. L'éolien maritime est en revanche plus cher à ce jour, de l'ordre de 150 à parfois 200 euros par MWh. C'est parfaitement logique en raison des coûts d'investissement (installation, câblage, raccordement etc.) et de maintenance, sensiblement supérieurs. Des études technico-économiques réalisées en Grande-Bretagne, où l'offshore a valeur de priorité, estiment que le coût pourrait être abaissé au niveau de 120 euros à un horizon de quelques années. Les autres énergies renouvelables, en revanche, sont aujourd'hui loin d'être aussi compétitives, même si elles progressent, comme par exemple l'énergie solaire qui est à un niveau oscillant entre 100 et 350 euros/MWh, ou la biomasse, avec des chiffres encore supérieurs. Il est d'ailleurs surprenant que ces écarts conséquents soient parfois occultés dans le débat énergétique, ce qui ne veut pas dire bien sûr qu'il faille écarter la diversité, mais prendre en compte cette donne dans la formulation d'une combinatoire optimale. Et l'on peut revenir ici à la compétitivité-prix : en supposant même que la part du nucléaire soit abaissée à 50% dans la période impartie, l'adjonction d'une composante d'éolien terrestre à 15 ou 20% de l'ensemble et composée majoritairement d'éolien terrestre ne dénaturera pas la compétitivité française, tout en étant conforme au principe français d'indépendance énergétique.

Ajoutons à cela que le coût de production de l'énergie éolienne consiste essentiellement en des coûts fixes forts d'investissement (amortis sur des périodes de 15 à 20 ans) et des coûts marginaux faibles (coût faible d'exploitation, pas de combustible, pas de quota de CO2).



Source : commission Énergies 2050, à partir d'hypothèses de l'OCDE-AIE WEO 2011[1]

Figure 14 –
Coûts de production 2010-2011 par filière du secteur électrique.

Comme il est souligné néanmoins dans le rapport Energies 2050[11], ces coûts sont à prendre avec précaution en raison de certaines hypothèses normatives, comme la définition des taux d'actualisation et la durée de vie des installations… Il est difficile de prévoir avec précision l'évolution de ces coûts : dans le cas des industries capitalistiques comme l'éolien, le coût est très sensible au taux d'actualisation, à l'évolution du prix de l'investissement et à la durée d'utilisation (tant en nombre d'années de fonctionnement d'un parc qu'en durée d'appel annuelle du moyen de production). Ainsi, il est certes raisonnable d'amortir sur 15 ans mais également d'estimer que la durée de vie peut s'élever à 25 ans. Les entreprises s'en tiennent aujourd'hui à 15 ans notamment parce que cela est cohérent avec la durée d'engagement de rachat d'électricité, mais un passage à 25 ans abaisserait *ipso facto* le prix du MWh de 80 euros à 65 euros. De même, des déterminants plus spécifiques à chaque installation font varier des coûts extérieurs devant être intégrés : raccordement au réseau, conditions météorologiques, gestion de l'intermittence, coûts de démantèlement…

L'estimation du coût complet de production de l'énergie éolienne est essentielle dans la mesure où elle sert de base à la fixation du tarif d'achat et conditionne ainsi sa légitimité sociale. Selon le décret du 10 mai 2001, rappelle la Commission de Régulation de l'Energie (CRE), « les tarifs d'achat de l'électricité sont égaux aux coûts de production, incluant investissement et exploitation, évités sur le long terme au système électrique, auquel peut s'ajouter une rémunération supplémentaire correspondant à la contribution des installations à la réalisation des objectifs (fixés par la loi, telle la lutte contre la pollution ou le réchauffement climatique). Le coût de production évité est égal au coût complet de production de l'électricité à laquelle l'électricité d'origine éolienne se substitue, duquel doivent être déduits les coûts supplémentaires induits par l'éolien sur le système électrique en matière de réserves, d'ajustement, et de développement de réseau »[12].

Le débat autour des enjeux concernant la tarification et l'évaluation des coûts oppose défenseurs et sceptiques de l'énergie éolienne sur la base d'arguments et de faits qui ne sont pas toujours comparables les uns par rapport aux autres[13]. Ainsi, la question du surcoût est complexe, tout en étant décisive car elle conditionne la légitimité du tarif d'achat. En effet, la contribution au service public de l'électricité (CSPE), payée par le consommateur final, prend en charge la différence entre coût complet de production évité et tarif garanti. Si la différence due à l'éolien constitue un déficit pour la collectivité, payable par le consommateur, alors les effets négatifs concernant l'augmentation du prix de l'énergie et la baisse du pouvoir d'achat vont avoir un effet négatif sur la légitimité et l'image de l'énergie éolienne. Si, en revanche, on parvient à obtenir un bénéfice pour la collectivité, alors l'éolien peut contribuer à un allègement de la CSPE.

[11] Centre d'Analyse Stratégique, 2012, *Rapport énergies 2050*, Paris.
[12] Centre d'Analyse Stratégique, *Le Pari de l'éolien*, 2009, page 17.
[13] Le Centre d'analyse stratégique en fournit une vision synthétique qui permet de remettre en perspective ces différentes positions in *Le pari de l'éolien*, *op.cit*. *supra.*

En outre, dans les territoires insulaires, le développement de l'éolien est un moyen efficace pour diminuer le poids de la péréquation tarifaire, représentant environ 32% de la CSPE en 2013 (contre 57% en 2009). La technologie de production est compétitive dans les territoires d'Outre-mer, où la production d'électricité s'appuie sur des centrales thermiques, coûteuses en émission de GES et en approvisionnement en matières premières combustibles.

Se pose plus généralement la question de l'articulation de la compétitivité et du mécanisme optimal de régulation du développement de l'éolien. Cette problématique, qui concerne toutes les énergies renouvelables, renvoie à une littérature économique plus générale, très abondante et initiée par Martin Weitzman dès 1974, portant sur l'arbitrage entre régulation par les prix et par les quantités (en l'occurrence par le tarif d'achat et l'appel d'offres). **Du point de vue théorique, les deux mécanismes sont en principe équivalents. Mais l'asymétrie d'information fait que le choix de l'instrument économiquement optimal dépend de différents facteurs**[14]. Sur cette base, les recherches ont été nombreuses mais les conclusions restent ouvertes sur les avantages et inconvénients respectifs des différents systèmes. En pratique, les paramètres industriels, politiques, financiers viennent s'ajouter à la prise de décision mais ne peuvent pas être aussi aisément intégrés dans la modélisation. On peut toutefois avancer le point suivant : **la régulation par les prix présente pour les acteurs le grand avantage de dégager l'horizon et de faciliter les investissements de long terme car elle réduit l'incertitude de marché ; la régulation par les quantités permet de doser le développement et de réduire l'incertitude liée à la rente potentiellement induite par le prix, tout en créant un fractionnement et un régime d'incertitude pouvant ternir les engagements des acteurs.** Mais s'ajoute ici une forme d'asymétrie d'information peu traitée dans les modèles et pourtant prégnante dans la décision publique, renvoyant plutôt à la théorie des jeux : les critères économiques et sociaux potentiellement adjoints à l'attribution des appels d'offre et se télescopant avec l'objectif de prix faible. Le décideur public français, quel qu'il soit, est nécessairement sensible à l'impact en la matière de la transition énergétique, particulièrement dans la situation économique présente. Le cas du photovoltaïque est un bon exemple des dérapages s'agissant de l'absence d'effet d'entraînement industriel. Or, il peut être perçu que le mécanisme de l'appel d'offres est un meilleur outil de canalisation du développement de la filière sur le territoire national, et peut davantage incarner une forme de volontarisme industriel adaptée à notre époque, sous des conditions de compétitivité raisonnables**. En d'autres termes, l'asymétrie d'information jouerait en faveur des industriels dans le cas d'une régulation par les prix, tandis qu'elle basculerait en faveur du décideur public dans le cas d'une régulation par les quantités**. C'est pourquoi le mécanisme de prix, doit à l'avenir s'accompagner d'une forme de réassurance des décideurs publics et d'engagement réciproque venant équilibrer le niveau d'information et témoigner du volontarisme industriel partagé des acteurs de la filière.

[14] En 1974, Weitzman a en effet montré que si la pente de la courbe du dommage marginal (lié aux émissions de CO_2) est plus forte que celle du coût marginal de dépollution, imparfaitement connue par le décideur, alors il faut privilégier l'instrument quantité (et vice-versa). Pour les ENR, le coût marginal de dépollution s'obtient à partir du coût de production des ENR et des émissions liées à la production ENR comparées à ceux des moyens de production à partir d'énergies fossiles. Weitzman, Martin L. 1974. «Prices vs. Quantities». *The Review of Economic Studies* 41(4):477 491.

Encadré n°1 – les tarifs d'achat

En France, l'énergie éolienne est financée par deux types de mécanismes, certains visant à réguler la quantité d'énergie produite (appels d'offre : objectif en volume), d'autres son prix (obligation d'achat à tarif garanti). Concernant une régulation par les prix, deux mécanismes sont envisageables : le tarif d'achat, consistant à acheter à un tarif fixe l'énergie produite pendant une période donnée ; la prime, s'ajoutant à la valeur de marché, liée à la production et à la vente de l'énergie en question sur le marché de l'électricité. Dans le cas de la prime, son montant peut être fixé ex-ante ou ex-post (en fonction des prix de marché réellement observés).

L'énergie éolienne terrestre produite fait l'objet d'une obligation d'achat à un tarif garanti depuis le début des années 2000. Les distributeurs d'électricité doivent acheter l'électricité produite à partir de l'énergie éolienne aux exploitants en faisant la demande. Le surcoût est répercuté aux clients par une contribution proportionnelle à l'électricité consommée : la CSPE, contribution au service public de l'électricité[15]. Pour bénéficier de cette obligatio d'achat, il faut être situé en ZDE (zone de développement de l'éolien, définies par la circulaire du 19/06/2006). Avant le 15/07/2007, les exploitants d'éolienne de moins de 12MW situés en dehors des ZDE pouvaient bénéficier de l'obligation d'achat dans certaines conditions.

Le tarif de rachat de l'éolien est fixé par la loi POPE de 2006. Le montant est actualisé en fonction d'un indice des coûts horaires du travail et d'un indice des prix à la production (arrêté tarifaire de 2008). C'est ce tarif qui est actuellement remis en cause et fait l'objet d'un recours judiciaire porté devant la CJUE.
Le montant se situe actuellement à 8,2 c€/kWh pour les 10 premières années de production. La rémunération varie ensuite entre 2,8 et 8,2 c€/kWh pour les cinq années suivantes, en fonction de la productivité du site. Cela permet de favoriser les zones où les vitesses de vent sont plus faibles et ainsi d'inciter à un développement mieux réparti sur le territoire:

- Tarif maintenu à 8,2 c€/kWh pour les sites produisant 2400 h/an ou moins
- Tarif à 6,8 c€/kWh pour les sites produisant moins de 2800h/an
- 3,2 c€/kWh pour les sites produisant moins de 3600 h/an

Le tarif est calibré pour offrir une rentabilité suffisante aux producteurs (taux de rendement interne de l'ordre de 8 %). Ce tarif étant plus élevé que la valeur de marché de l'électricité, le surcoût pour les acheteurs obligés est compensé par la CSPE, prélevée sur les factures des consommateurs finaux. Il est lissé légèrement abaissé dans le temps : aujourd'hui de 82 euros le MWh, il convergera graduellement vers un niveau de 69 euros.

[15] La contribution au service public de l'électricité (CSPE), payée par le consommateur final, prend en charge la péréquation tarifaire (les surcoûts de production dans les zones non interconnectées au réseau électrique métropolitain continental), l'obligation d'achat de l'électricité (les surcoûts résultant des politiques de soutien à la cogénération et aux énergies renouvelables), ainsi que la solidarité avec les personnes en situation de précarité. Elle répercute ainsi sur le consommateur la différence entre le prix payé par Électricité de France, conformément à ses obligations d'achat, et le prix de l'électricité sur le marché de gros.

2 La chaîne de valeur et ses imbrications

La chaîne de valeur de l'éolien peut être examinée sous l'«angle vertical» (élaboration de la turbine) ou horizontale (étapes conduisant à la l'aménagement d'une ferme éolienne).
Conçue à partir de multiples matériaux, une turbine requiert onze composants et trois mille pièces. On peut considérer qu'elle se compose en résumé de **trois grandes parties : la tour, les pâles et la nacelle,** qui en est la partie « intelligente » et rassemble elle-même des composants essentiels. **La tour représente plus du quart du coût de revient industriel (26,30%), les pâles un pourcentage légèrement inférieur (22,20%). Dans la nacelle (51,50%)**, l'accélérateur représente près de 13% ; la part relative du convertisseur de puissance, de transformateur, de la génératrice, de l'arbre principal, du système d'orientation des pâles, s'échelonnent entre 5 et 2,5%, les autres composants occupant ensemble les 20% restants. Les grands turbiniers sont avant tout des assembleurs et donneurs d'ordre plus ou moins intégrés. Ils produisent tout ou partie des pâles, mais peuvent également les acheter selon le *business model* de l'entreprise ; certains d'entre eux produisent leurs boîtes d'engrenage ou d'autres composants, mais ce n'est pas systématique.

Si l'industrie française de l'éolien est émergente au niveau des donneurs d'ordre, elle est d'ores et déjà bien développée sur chacun des composants. Ainsi la démarche Windustry, lancée en 2009 par le SER-FEE, à travers une étude effectuée auprès de plusieurs centaines d'entreprises françaises, a-t-elle identifié 200 entreprises évoluant dans l'éolien en 2010 – dont les activités sont la fonderie, la métallurgie, l'électronique ou le génie électrique, et qui se sont diversifiées dans l'éolien. Il a également été mis en évidence une grande variété d'activités dans cette filière avec un tissu régional d'implantation très diversifié, ainsi que 150 nouveaux acteurs potentiels. Ce tissu industriel dense est composé de PME et de filiales de grands groupes industriels développant une activité spécifique (Schneider Electric, Nexans, Leroy Somer, etc.) et établissant des partenariats avec des PME, comme EADS Astrium, qui s'est implanté à Bordeaux pour monter une unité de conception et fabrication de pales de grandes dimensions en collaboration avec Vergnet. Et il faut ajouter que plusieurs entreprises françaises de composants sont des leaders mondiaux sur leur marché.

Il demeure important de souligner que l'industrie française n'est pas traditionnellement positionnée sur le segment des turbines à proprement parler. Les exceptions sont les entreprises opérant sur des marchés de niche, comme le groupe Vergnet spécialisé dans la fabrication d'éoliennes pour des sites aux conditions extrêmes ou Alizeo, sur le marché des éoliennes rabattables. La situation est dorénavant différente avec Alstom et Areva, qui ne produisent pas cependant leurs turbines en France.

Enfin, les appels d'offres dans l'éolien offshore attribués en 2012 vont s'accompagner d'installations en France d'usines de fabrication de composants et d'assemblage. Alstom

s'implante ainsi à Cherbourg (fabrication de mâts et pales ; assemblages et fondations) et à Brest, Saint-Nazaire et Le Havre (sites d'assemblages et de construction des fondations).

On est donc en présence d'une chaîne de valeur bien articulée, dont peut être fait un inventaire non exhaustif d'entreprises françaises ou installées en France présentes sur les différents segments pour illustrer le propos .

Tableau 1 – Répartition des acteurs de la chaîne de valeur en France

Partie de l'éolienne	**Exemples d'entreprise française ou installée en France**
Mât et embase (*tower and embedded steel can)*	Baudin Chateauneuf, France Eole
Pâles (*blades)*	Rolix Desfontaines, Astrium, ATV, FDKomposites
Multiplicateur (*gearbox)*	CMD Gears, CORDM, Lufkin France
Arbre principal (*rotor main shaft)*	Bosch Rexroth
Système d'orientation de la nacelle *(Yaw Draw)*	Bonfiglioni
System d'orientation des pâles (*blade pitch system)*	MOOG
Moyeu de rotor (*rotor hub*)	Bot Fonderie
Alternateur (*generator*)	Leroy Sommer, Jeumont Electric, Mercen
Cadre *(main frame)*	De nombreuses fonderies seraient compétentes
Roulements (*Rotor Bearing*)	NTN-SNR Roulements
Pitch System	Cobham Slip Rings,
Convertisseur *(power converter)*	Ainelec, GE Energy Power Conversion,

Transformateur *(transformer)*	CG France, Schneider Electric
Constructeurs d'éolienne	Alizeo, Alstom, Areva Wind, Enercon, Gamesa, GE Energy, Nordex, Repower SAS, Siemens, Vergnet, Vestas

Plus généralement, l'organisation de la filière renvoie à une problématique classique de *supply chain*, appelée à s'intensifier dans les années à venir. A l'occasion du développement de l'éolien dans un pays, le donneur d'ordres peut décider d'une implantation partielle et amener ses fournisseurs et sous-traitants à la même démarche, ou acheminer les éléments indispensables depuis leur pays d'origine. Il peut aussi contracter avec des fournisseurs locaux, ce qui suppose une adaptation rapide à ses besoins, ce qui n'a rien d'évident. Pour ce qui concerne l'éolien maritime, la situation est un peu différente dans le sens où il entame son développement et où les relations avec les fournisseurs, pour ce qui lui est spécifique, ne sont pas encore stabilisées.

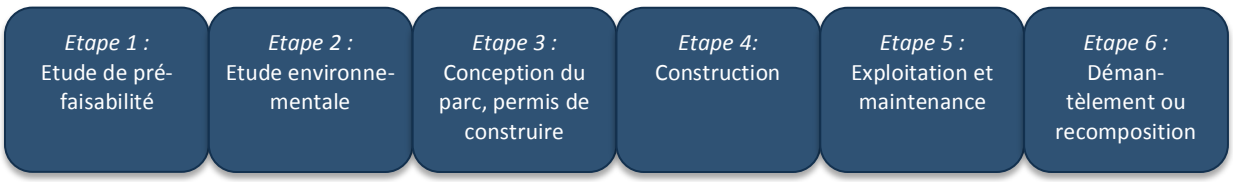
Rien de bien particulier à ce stade, sinon trois caractéristiques si l'on compare l'éolien à d'autres secteurs : l'importance du coût du transport, de celui du stockage et les délais longs qui perdurent. Les deux premiers facteurs rendent plus difficile la délocalisation, le troisième pourrait la faciliter. En ce qui concerne les deux premiers, la taille de la tour milite en faveur d'une production locale, quasiment incontournable et qui requiert des compétences ne relevant que partiellement de l'industrie mécanique (fonderie et usinage de précision des structures de grande taille ; fabrication de composites ; soudure et chaudronnerie en acier de large épaisseur, etc.); Les pâles, plus complexes, peuvent toutefois être également produites localement. Les «composants nobles » sont moins assujettis à ce type de coût et relèvent d'une compétence plus spécialisée ; tout est dès lors affaire de *supply chain*.

Ce qui est frappant à cet égard dans les discours est la tendance naturelle à une organisation européenne de la chaîne de valeur, qui se cumule à des discours qui restent nationaux et qui, s'ils demeurent aussi catégoriques, vont altérer la compétitivité européenne potentielle et donc celle de chacun des pays. On voit bien d'ores et déjà pourtant que Siemens est dans ce domaine danois avant que d'être allemand, qu'Areva est autant allemand que français, même chose pour Alstom, tout autant espagnol que français. Il serait absurde de s'en émouvoir. On peut certes imaginer que certaines unités de production soient rapatriées en France ou que des turbiniers non français installent des usines s'ils sont assurés d'un développement dans le pays. C'est d'ailleurs ce qu'a fait Enercon (25% des parts de marché d'installation d'éoliennes en France) qui a investi 25 millions d'euros pour lancer la fabrication de mâts en béton dans l'Oise (l'usine a été ouverte en octobre 2012). Rien n'interdit par ailleurs l'implantation en France d'usines de nacelles, qu'elle émane de turbiniers français ou européens. Tout cela va dans le bon sens mais le vrai sujet est de savoir si la chaîne de valeur va ou non rester en Europe, sachant que comme on l'a vu l'industrie européenne reste dominante tout en ayant perdu du

terrain. Que des constructeurs européens installent des usines en Amérique ou en Asie pour accompagner le développement local est légitime, pour les mêmes raisons qui font que le développement européen va se faire dans un contexte où les coûts de transport et de stockage vont favoriser les implantations européennes. Ceci, toutefois, ne peut se faire que jusqu'à un certain point : le coût de la main d'œuvre reste en Europe occidentale dix fois supérieur à ce qu'il représente en Chine, même si les coûts salariaux chinois augmentent rapidement.

C'est pourquoi il sera indispensable de raisonner à l'avenir en prenant en compte les possibilités de production en Europe centrale et orientale – les implantations dans l'espace euroméditerranéen pouvant également avoir un sens géopolitique mais modérément économique, en raison du coût du transport maritime et sauf si des sites marins lui donnent ce sens économique. Le coût de la main d'œuvre est en effet en moyenne trois fois inférieur à ce qu'il est en France et les conditions de transport ont d'ores et déjà été largement améliorées. Nous insistons ici sur le fait que ceci doit être anticipé et non subi. On peut certes rétorquer que c'est incompatible avec l'idée que le secteur soit subventionné mais il faut raisonner dans une logique différente. Ou bien l'on souhaite que l'éolien aille vers davantage de compétitivité comparé à d'autres sources d'énergie, ou bien on y est indifférent. Si l'on considère que l'indifférence est impossible puisque c'est le citoyen qui finance le surcoût, il faut aller vers des coûts plus faibles, d'une part par l'innovation – ce que nous allons traiter plus loin dans ce chapitre – d'autre part par une optimisation de la *supply chain*, domaine dans lequel l'éolien est plutôt en retard, car il n'a jamais été trop fortement confronté au problème classique du niveau des coûts de production à ce jour. N'oublions pas qu'un facteur important du succès de l'industrie allemande sur un plan général est l'allocation d'une partie de sa production et de ses achats en Europe centrale et orientale, associée à une politique de qualité, d'innovation et de haut de gamme. 15% seulement de la valeur ajoutée de la Porsche Cayenne est ainsi réalisée en Allemagne. Pour prendre un autre exemple, les entreprises textiles françaises qui occupent le plus d'employés en France (comme Thuasne en textiles techniques ; Petit Bateau en mode, qui emploie 1100 personnes en production en France sur un total de 4000) sont celles qui sont parvenues à anticiper et gérer la péréquation de leur capacité de production en Europe en dans les pays méditerranéens, ce qui leur a précisément permis de se développer et de préserver l'emploi en France. Il ne s'agit ici en rien de pousser à la délocalisation, et peut-être les investigations et études en la matière conduiront-elles à la conclusion que l'Europe occidentale est à elle seule compétitive, mais le pire, pour l'emploi et la valeur ajoutée en France, serait d'en faire un sujet tabou.

Examinons maintenant la chaîne de valeur « horizontale » de l'éolien, qui part de l'étude de pré-faisabilité, et passe par l'étude environnementale, la conception du parc et l'obtention du permis de construire, l'exploitation et la maintenance, et enfin le démantèlement ou la recomposition.



L'ordre de grandeur couramment admis est un rapport de 1 à 0,5 : l'installation d'une ferme terrestre de 10 MW (5 turbines de 2 MW pour une valeur globale de 10 millions d'euros) donnera lieu à un budget global d'aménagement de 5 millions d'euros, ce chiffre étant bien supérieur dans l'offshore.

On trouve dans cette partie de la chaîne toute une série d'acteurs aux activités dont les contours sont variés et qui peuvent être plus ou moins intégrés. Ainsi les développeurs prennent-ils en charge la mise en œuvre du projet d'installation des parcs et les exploitants gèrent-ils leur exploitation et leur maintenance. La maintenance peut être également pour partie pris en charge par les turbiniers selon les modalités contractuelles adoptées. Les acteurs peuvent être de différentes tailles en développement et en exploitation, une centaine d'entreprises sont ainsi actives parmi lesquelles un certain nombre de PME françaises très performantes, avec également une implication croissante des groupes rachetant des PME, d'où le fait que dix entreprises regroupent plus de 50% de la puissance installée, les exploitants les plus importants étant GDF Suez, EDF ENR, qui a racheté les parcs Iberdrola en France, Kallista. Une cinquantaine d'entreprises sont par ailleurs actives pour le raccordement au réseau.

Dans toute cette chaîne, les compétences les plus diverses sont requises, en matière d'ingénierie, de génie civil, de BTP, de levage et transport, d'écologie, d'architecture et de design, point sur lequel nous reviendrons, **d'acoustique et d'éthologie, de financement et de gestion de projet,** etc. Certaines de ces compétences sont donc des plus classiques mais d'autres relèvent d'une expertise environnementale au sens strict et au sens large très contemporaine.

Un dernier point dans la chaîne de valeur est qu'un projet se construit dans la longue durée, puisque le délai s'étalant entre les études préliminaires et le développement du parc va fréquemment jusqu'à huit ans, en comptant les aller-retour induits par les recours et le durcissement des conditions administratives.

3 L'emploi et ses composantes

La question de l'emploi dans le secteur de l'éolien est indissociable de celle de l'emploi dans l'énergie dans son ensemble. Le problème est que l'on dispose aujourd'hui de données partielles qui souvent ne portent que sur une source d'énergie en particulier, et d'études faisant état parfois des emplois détruits dans un secteur et parfois d'emplois créés dans un autre, alors que l'enjeu est clairement de savoir ce qu'il en est pour une production énergétique donnée et au niveau global.

Ainsi, PwC a mené en 2011 une étude pour AREVA évaluant les pertes d'emplois liées à une réduction de la part du nucléaire[16]. Dans le cas d'un passage à 50% d'énergie nucléaire, les pertes se chiffreraient à 250 000 emplois (ETT[17]), dont 45 000 emplois directs, 100 000 emplois indirects et induits et 100 000 emplois potentiels liés à l'export. En cas de sortie du nucléaire, le total monterait à 500 000 emplois, dont 125 000 emplois directs et 285 000 emplois directs et induits. Toutefois, les emplois créés par le remplacement de cette part de nucléaire par d'autres moyens de production n'ont pas été pris en compte.

Symétriquement, le SER, par l'intermédiaire d'une étude menée par le cabinet BIPE en janvier 2012, a proposé une évaluation des créations possibles d'emplois d'ici 2020 dans l'ensemble des filières EnR en prenant pour hypothèse une part de 25% d'EnR dans le mix énergétique français. 124 000 emplois directs et indirects seraient créés et doubleraient ainsi, entre 2010 et 2020 le nombre d'emplois des filières. Concernant l'éolien, on passerait ainsi de 8100 emplois dans la filière en 2010 à 57 000 en 2020. Toutefois, les emplois perdus dans le nucléaire n'ont pas été pris en compte.
Les scénarios et estimations fondées sur des hypothèses de forte progression des EnR combinée à une réduction de la consommation par amélioration de l'efficacité énergétique sont également intéressants à prendre en compte. Ainsi une étude menée pour le WWF estimait en 2008 [18] qu'il était possible de créer presque 700 000 emplois en misant sur l'efficacité énergétique et les EnR (+880 000 emplois) qui compenseraient largement les destructions dans les filières énergétiques et automobiles (-250 000 emplois). Le mécanisme principal concerne la réduction de la facture énergétique dont le corollaire est un gain de pouvoir d'achat. Ceci joue essentiellement sur les emplois induits, donc difficilement évaluables avec précision. En outre, ces évaluations sont également dépendantes d'une autre variable : le prix du pétrole. En effet, un prix élevé renchérit mécaniquement le prix des énergies, produisant des modifications du comportement des consommateurs, qui ne sont plus, cette fois, imputables à la politique climatique.

Ainsi, les résultats de toute modélisation sont dépendants d'un ensemble d'hypothèses retenues :

- le coût des mesures d'efficacité énergétique,
- l'évolution du coût global de production de l'énergie en cas d'augmentation significative de la part des EnR et la répercussion pour les industriels en termes de compétitivité,
- les emplois créés dans le domaine de l'efficacité énergétique doivent être nuancés par les dépenses concernant les rénovations, adaptations des infrastructures.

Toute méthode proposant des évaluations partielles ou parcellaires peut conduire à donner des informations utiles mais jamais à fonder des choix de politique publique qui engageraient des moyens (humains, financiers, matériels) considérables.

[16] http://www.pwc.fr/lelectronucleaire-en-france-125-000-emplois-directs-et-une-contribution-au-pib-de-071-en-2009.html#_ftn2 ; voir également le rapport du CAS (2012) « Energies 2050 », p. 178.
[17] ETT = équivalent temps plein
[18] Quirion P. et Demailly P. (2008) *-30% de CO_2 = + 684 000 emplois. L'équation gagnante pour la France.* Etude WWF France

Ces éléments mettent en évidence le fait que la compétitivité de la filière éolienne doit faire l'objet d'une évaluation certes spécifique, mais également conjointe avec celle de l'ensemble des filières EnR en France et, plus globalement, que ce type de raisonnement doit s'inscrire dans une perspective d'ensemble. Concernant les spécificités de la filière éolienne, il est nécessaire d'adopter une vision extensive de la filière, depuis la R&D jusqu'à l'exploitation et même au démantèlement des sites, en passant par les étapes de production industrielle et la commercialisation.

On dispose de données sur l'emploi en France en 2012 émanant de l'ADEME[19] sur la base de calculs faits à partir des marchés intérieurs et des exportations en utilisant des ratios provenant des enquêtes annuelles d'entreprise et des données du dispositif ESANE permettant à l'INSEE de préparer ses statistiques annuelles. Il apparaît ainsi que **la filière comptait environ 10 000 emplois en 2012.** Une étude plus complète parue en octobre 2010 faisait le point sur les marchés et les emplois des activités liées à l'amélioration de l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables en fournissant des données plus détaillées. Il est cependant à noter que la synthèse de 2012 fait le constat d'une révision importante des prévisions faites pour 2010-2012 en raison de l'intégration des données mises à jour et de l'évolution des méthodes. Le tableau ci-dessous présente ainsi les chiffres actuels et l'évolution entre 2006 et 2012 des emplois liés à l'énergie éolienne. La comparaison entre les estimations parues en 2012 et celles parues en 2010 permet de montrer les précautions à prendre concernant l'utilisation de ces chiffres, mais aussi le coup de frein subi par l'éolien en France ces dernières années[20].

Tableau n°2 – Emplois liés au développement de l'énergie éolienne

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Chiffres 2012							
Equipements et installations	5550	5670	7860	8560	10120	8640	8280
Commercialisation	450	650	930	1230	1550	1780	1960
Total 2012	***6000***	***6320***	***8790***	***9790***	***11670***	***10420***	***10240***
Chiffres et prévisions 2010							

[19] ADEME (2012) « Maîtrise de l'énergie et développement des énergies renouvelables : état des lieux des marchés et des emplois» *Stratégie & études*, n°34, 21 novembre.

[20] ADEME (2010) «Marchés, emplois et enjeu énergétique des activités liées à l'amélioration de l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables : situation 2008-2009 – perspectives 2010» , Direction exécutive de la stratégie et de la recherche, octobre 2010

Equipements et installations	5279	6095	7040	8671	10609		14018
Production et commercialisation	320	492	710	915	1195		1875
Total 2010	***5599***	***5687***	***7750***	***9586***	***11804***		***15893***

Pour faire la relation entre marchés et emplois, des données un peu datées mais intéressantes existent dans le rapport 2010 de l'ADEME (pages 37-50). Par exemple, le tableau suivant permet de faire le lien entre puissance annuelle installée en MW, investissements en M€, production de composants et emplois :

Marchés et emplois liés aux investissements dans l'éolien et à l'exportation

	2006	2007	2008	2009 (e)	2010 (p)	2012 (p)
Puissance installée dans l'année (MW)	810	888	950	1 088	1 400	1 800
Investissements marché intérieur (M€)	1 013	1 200	1 285	1 415	1 820	2 340
Production (M€)	758	942	1 099	1 363	1 682	2 355
dont exportations de composants (M€)	405	513	632	795	941	1 323
Emplois liés au marché annuel	5 279	6 095	7 040	8 671	10 609	14 018

Estimations In Numeri ; 2006 – 2009 aux prix courants ; 2010 – 2012 aux prix 2009

Marché et emplois liés à la production d'énergie éolienne

	2006	2007	2008	2009 (e)	2010 (p)	2012 (o)
Puissance raccordée en fin d'année (MW)	1 713	2 484	3 496	4 628	5 974	9 374
Production d'énergie (TWh)	2 230	4 116	5 754	7 819	9 776	14 745
Valeur de l'énergie vendue (M€)	188	345	483	685	860	1 298
Emplois liés à la production de l'énergie	320	492	710	915	1 195	1 875

Estimations In Numeri ; 2006 – 2009 aux prix courants ; 2010 – 2012 aux prix 2009

Tableau n°3 – Marchés et emplois liés aux investissements et à l'exportation dans l'éolien ; et liés à la production d'énergie éolienne

Il est intéressant de situer la position de la France dont son environnement international, en comparant la situation de l'emploi selon les pays et en examinant les déterminants. Les données dont on dispose sont loin d'être exhaustives. S'agissant de l'Europe, on dispose de l'ensemble des chiffres pour l'année 2008, ainsi que des chiffres 2011 pour l'Europe dans son ensemble, le Danemark, l'Espagne et la Belgique. On peut procéder de deux manières : à travers des séries chronologiques et en coupe instantanée. La durée est toutefois trop courte pour appliquer des modèles statistiques aux séries chronologiques, raison pour laquelle on part ici d'une analyse comparative en Europe et dans le monde, en s'en tenant aux emplois directs, cela pour l'année 2008, puisque c'est la seule année pour laquelle on dispose de l'ensemble des données nécessaires pour l'Europe et le monde.

Lorsque l'on procède à la régression, en incluant les Etats-Unis ou la Chine, il apparaît possible de dresser un modèle linéaire d'une très bonne qualité, avec un coefficient de détermination compris entre 0,8 et 0,95. Le second enseignement est que ce modèle ne comporte qu'une seule variable explicative : la capacité cumulée. Toutes les autres variables explicatives – investissement dans l'année en cours ou suivante (pour intégrer une variable d'anticipation), la part relative de l'éolien dans la consommation ou la production, le poids des donneurs d'ordre, des variables plus macroéconomiques, etc. – perdent leur pouvoir explicatif lorsque la capacité cumulée est incluse dans le modèle.

Le modèle obtenu conduit à la conclusion suivante : en moyenne, la production d'1MW conduit à l'emploi direct d'1,1 personne. Cette relation dépend toutefois des pays qu'on intègre dans la régression. Si l'on exclut les plus gros producteurs (Danemark, Chine, Espagne, Allemagne, Etats-Unis), la relation tombe à 0,8 emploi direct créé pour 1 MW. Deux pays font exception : le Danemark, dont le modèle est tout avant basé sur l'exportation et pour lequel le chiffre s'élève à 2,7 ; les Etats-Unis, où se dégage un chiffre du même ordre, probablement en raison de différences méthodologiques liées à l'estimation de l'emploi (en particulier, le pourcentage d'emplois industriels y est de 25% de l'ensemble, tandis qu'il s'élève à 66% en Europe et en Chine ; ceci se justifie pour partie par le fait que les Etats-Unis sont largement importateurs, mais ça ne peut expliquer cette grande différence, dont on peut penser qu'elle tient également à une conception différente de la dualité emplois directs/indirects).

L'analyse des chiffres 2007-2011 pour le Danemark, l'Espagne, la Belgique et l'Europe confirme cette corrélation, dont il convient d'expliquer de quelle causalité elle peut résulter. Elle tient en fait à deux facteurs. **Le premier est de nature industrielle et est une résultante directe du caractère européen de la chaîne de valeur. Il est un principe qui trouve ici son application : une chaîne de valeur industrielle européenne tend au développement des emplois en Europe,** tandis qu'une chaîne de valeur dont les donneurs d'ordre européens n'ont pas d'activité industrielle dans leur métier de référence (grands distributeurs, succursalistes, etc.) est moins encline au développement des emplois en Europe. Précisons que la part de matière et d'achats pour les turbines, qu'elles soient destinées au terrestre ou au maritime, est de 80% pour les tours, 60% pour les pales et 80% pour la nacelle. **L'importance des potentiels de développement industriel des fournisseurs français et européens est une résultante naturelle de ces données.**

Par ailleurs, les coûts de transport et de stockage sont plus élevés que dans bien d'autres secteurs, ce qui favorise l'emploi européen, de même que les composants d'un avion assemblé en Europe sont le plus souvent d'origine européenne. Dans ce contexte, la décomposition (partielle) de la chaîne de valeur se fait en Europe et conduit à une forme de répartition relative des emplois où les investissements se font plus aisément à proximité des marchés, comme le montrent des exemples relatés précédemment. C'est pourquoi, mécaniquement, le développement de la production cumulée dans un pays aboutit à celui des emplois industriels, même s'il va de soi que les pays où les turbiniers sont implantés disposent d'un surcroît relatif d'emplois.

La situation française en matière d'emplois industriels apparaît supérieure à la moyenne. Le nombre d'emplois en France correspond à **un ratio de l'ordre de 1,4**, qui ne peut s'expliquer par un grand nombre relatif d'emplois durant la phase d'installation et d'exploitation, bien que certains obstacles administratifs consubstantiels à la tradition française puissent éventuellement induire une moindre productivité. On ne peut certes mésestimer quelques problèmes de raccordement méthodologique, mais **cette caractéristique française en matière d'emplois directs résulte également de la densité de l'emploi industriel et de synergies effectives avec d'autres secteurs et filières.**

Qu'en sera-t-il à l'avenir ? Les investissements se rapprochant naturellement des marchés dans ce secteur, ils sont amenés à se développer en Asie et sur le continent américain, tout autant qu'en Europe, avec le développement des chaînes de valeur correspondantes. Ceci implique que les turbiniers européens vont intensifier des politiques d'investissement internationaux hors Europe, qui vont compléter leurs politiques d'exportation. Ceci est déjà d'ailleurs en cours, et d'autant plus impératif que la part des activités non européennes est d'ores et déjà élevée. Cette forme d'internationalisation relève en quelque sorte d'un nouveau type de métier. L'industrie française, basée avant tout sur les composants, est moins directement concernée à ce jour par cette problématique, sauf à travers ses propres exportations et implantations internationales. Areva et Alstom pourront à l'avenir bénéficier de leurs courbes d'expérience internationale accumulée pour prendre ce type d'orientation. Réciproquement, on peut certes imaginer l'importation de pâles ou d'autres composants en provenance de Chine, et tout groupe soumis à une forte pression concurrentielle sur les prix sera amené à se poser la question de ce type d'opportunité. C'est pourquoi la solidarité européenne et la mise en œuvre d'une politique industrielle éolienne pour notre continent sera primordiale pour sa pérennité comme pour l'emploi, en se rapprochant ici du modèle industriel allemand ou suisse.

Maintes études montrent plus généralement que l'éolien crée plus d'emplois que les énergies fossiles durant les phases industrielles, de construction et d'installation, moins durant la phase d'exploitation[21]. Il est par ailleurs acté que les emplois issus de l'industrie représentent deux tiers de l'ensemble et les emplois de développement, installation et production, un tiers. Ce chiffre concorde avec ce que représente la part relative de l'un et de l'autre en termes de chiffre d'affaires induit.

Durant la phase d'installation d'une ferme, les emplois sont quasi exclusivement locaux (hormis pour gérer des questions techniques très complexes dont seul le turbinier à la maîtrise) et même très locaux, puisqu'il s'agit d'emplois liés au BTP au sens large et au transport de courte distance. Cela peut permettre également de compenser des difficultés que rencontrent les entreprises des pays concernés et ses répercussions en matière d'emploi local. Cette situation est d'une certaine manière comparable à celle du nucléaire, à la différence que la taille des chantiers comme la moindre expertise relative requise permet de solliciter des PME locales,

[21] Voir par exemple Jacob Funk Kirkegaard, Thilo Hanemann et Lutz Weischer (2009) « It should be a breeze: Harnessing the potential of open trade and investment flows in the wind industry energy » Working paper series, World Resources Institute, Peterson Institute for International Economics, Washington

plutôt que des groupes internationaux qui sous-traitent leur activité réalisée *in fine* par une main d'œuvre locale ou non. Au cours de la phase d'études, les emplois liés notamment à l'environnement sont sollicités et créés, s'inscrivant en général dans le cadre du conseil ou à travers le recours à des expertises indépendantes. Les cabinets spécialisés regroupent des compétences issues de l'« économie du savoir » contemporaine, où il est souvent nécessaire de maîtriser la langue française et la culture locale, bien que dans certains domaines, tels que l'acoustique, ce soit l'expertise intrinsèque qui importe, mais le niveau de compétence dans toutes ces catégories de métiers est excellente en France. En revanche, les besoins en emploi liés à la sécurité et aux risques divers sont moins nombreux que dans l'énergie nucléaire ou d'origine fossile.
Quoi qu'il en soit, on peut anticiper à l'avenir des gains de productivité à travers une plus grande automatisation mais la nature locale de l'emploi ne changera pas.

Durant la phase d'exploitation, les besoins en emplois sont plus faibles que dans d'autres secteurs, qu'il s'agisse du nucléaire, de fossile, ou d'énergies renouvelables telles que le photovoltaïque, si on rapporte les emplois aux kWh produits. Ceci est directement lié au faible coût marginal de production et à l'excellente productivité de l'énergie éolienne.

Il va de soi, par ailleurs, que l'éolien maritime génère davantage d'emplois que l'éolien terrestre, en raison d'une chaîne de valeur plus complexe et d'une plus faible productivité rapportée à la production. Et si l'on raisonne sur la base de dix années d'expérience en offshore indépendamment de la nationalité d'origine du turbiner, 63% de la valeur ajoutée est réalisée localement, ce qui rejaillit directement sur les emplois locaux.

Soulignons le caractère paradoxal d'un débat qui est loin de se limiter à l'éolien et même à l'énergie. Une activité est d'autant plus louée qu'elle génère de l'emploi, ce qui est logique, tandis que notre pays peut se prévaloir d'un niveau élevé de productivité, tout en cherchant à le perpétuer, ce qui ne l'est pas moins! Or, une activité qui génère plus d'emplois qu'une autre pour un niveau de production donné dispose par définition d'un niveau de productivité plus faible! C'est pourquoi ces données sont à manipuler avec précaution. Une plus grande productivité générée par une activité induit indirectement une plus grande faculté à générer des emplois dans le même secteur ou dans d'autres !

Ce qu'il faut en résumé retenir en matière d'emploi est que :

- Un MW installé « rapporte » de 0,8 à 1,5 emplois et la France est plus proche de la fourchette haute en raison de l'intensité de son tissu industriel.
- L'arrivée d'Alstom et d'Areva confortera cette situation.
- L'emploi français bénéficie largement de l'intégration de la chaîne de valeur européenne.
- Un emploi sur trois relève des activités de service liées à l'installation des fermes éoliennes.
- Cet emploi induit est très largement national et même en bonne partie local.
- L'emploi en éolien maritime est supérieur en raison notamment de plus grandes difficultés d'installation et d'exploitation.

NB : soulignons que sont pris en compte dans cette analyse les emplois directs et non indirects. L'estimation du nombre d'emplois indirects en général laisse la place à trop d'aléas, ce qui lui enlève une bonne part de sa crédibilité, d'autant qu'elle se prête à une forme de « course à l'échalote ». Les estimations en matière d'emplois indirects reposent depuis des décennies sur une certaine interprétation du multiplicateur keynésien, aux contours flexibles, assez désuète par ailleurs. Elles n'intègrent pas de surcroît les raisonnements en termes de chaîne de valeur. On peut certes dire que des secteurs tels que le bâtiment disposent d'un bon rôle d'entraînement – comme le prouvent a contrario *les grandes difficultés des pays qui en sont trop dépendants. De ce point de vue, l'éolien est plus favorable que d'autres secteurs à l'emploi indirect.*

4 Les facteurs d'innovation

Le fait que l'éolien soit associé à l'idée d'une technologie mure tend à occulter le grand potentiel qu'il recèle, à bien des niveaux. Cette occultation est d'autant plus prégnante que la culture française tend à se focaliser sur l'innovation de rupture, alors que l''innovation incrémentale est au moins aussi importante, et ce d'autant plus que l'innovation de rupture est souvent loin de profiter au mieux au pays qui l'a initié. La vie des entreprises et de l'économie en général est jalonnée d'innovations technologiques, design, marketing, *business models*, etc., qui, en se cumulant dans le temps, conduisent à la croissance et aux gains de productivité. C'est pourquoi il est important ici d'expliciter les facteurs d'innovation de toute nature et de relativiser la place de l'innovation majeure ou de rupture, qui changerait complètement la donne. On ne peut s'attendre à inventer chaque jour l'imprimerie, l'électricité, ou la machine à vapeur !

Si l'on en revient à la définition schumpéterienne, une innovation peut prendre la forme d'un nouveau produit, d'un nouveau processus de production, d'une nouvelle source d'approvisionnement. Le produit est nouveau dans la mesure où il donne lieu à un nouvel usage. Il importe de ne pas confondre invention et innovation, l'innovation donnant lieu à la mise en œuvre d'une nouvelle idée sur le marché, ce qui n'est en rien consubstantiel à l'idée d'invention. Il ne faut pas confondre non plus R&D et innovation, car la conversion de la R&D en innovation est loin d'être évidente et l'innovation peut parfaitement se passer de R&D.

Cette indispensable conception holistique de l'innovation d'enlève rien bien sûr à l'importance de la R&D comme l'un de ses facteurs déterminants. Les turbiniers l'ont bien compris, qui y consacrent un montant compris entre 5 et 10% de leur chiffre d'affaires, suivant en cela la norme des industries à forte valeur ajoutée technologique.

Sur ces bases, nous sommes en mesure de procéder à une typologie des innovations dans l'éolien, qui peuvent concerner les champs les plus divers : l'usage des matériaux, les technologies et procédés, la gestion de l'intermittence, la chaîne de valeur, la logistique, les *business models*, les systèmes d'information, l'architecture et le design, l'acoustique, les

dommages écologiques et enfin les réseaux. Ceci vaut pour l'éolien terrestre comme maritime. Il faut y ajouter les innovations portant sur le petit éolien, qui sont multiples et vont s'intensifier.

Dans le système matriciel d'utilisation des matériaux à toutes les étapes de la filière, nombreux sont ceux dont l'utilisation se prête à des innovations potentielles (acier, cuivre, fibre de verre, fibre de carbone, aluminium, aimants permanents, etc.), afin d'en optimiser l'utilisation. Il en résulte des programmes de recherche et de R&D en chimie et en sciences des matériaux, appelés à s'intensifier. Nous allons ici porter une attention particulière à la question des aimants, qui est une problématique pertinente pour certaines technologies éoliennes, comme le petit éolien et les turbines à entraînement direct, sans multiplicateur mécanique (générateurs synchrones), utilisées pour les éoliennes offshore. La production d'aimants permanents pose un double problème, lié à l'utilisation des terres rares. Le premier problème est celui des des mauvaises conditions d'extraction et propriétés environnementales, qui constituent le point faible d'une énergie par ailleurs très propre. A cela s'ajoute un problème d'ordre géopolitique, puisque les terres rares sont principalement extraites en Chine, pays pouvant, dans un contexte classique de négociation internationale, en tirer profit le moment venu pour le développement de son industrie éolienne. Deux réponses peuvent être apportées à cela. D'une part, la R&D des turbiniers visant à en minorer l'utilisation ; d'autre part et surtout, à moyen et long terme, la mise au point d'un substitut aux terres rares. Une innovation de rupture serait ici la bienvenue et l'impératif écologique rejoint l'équilibrage géopolitique. Hitachi conduit ainsi des recherches approfondies et prometteuses sur le fer amorphe, qui dispose également de propriétés d'aimantation.

Encadré n°2 - Enjeux des terres rares et des solutions alternatives

Les éoliennes sont loin de constituer la première application des terres rares, qui sont utilisées principalement dans la fabrication de batteries, d'aimants, en tant que catalyseurs, et pour d'autres technologies de pointe. Les véhicules électriques et hybrides ont font abondamment usage, elles sont également très présentes dans les produits électroniques tels que les smartphones.

Les éoliennes utilisent les terres rares pour les aimants permanents. On dénombre quatre grandes méthodes pour convertir l'énergie éolienne. La technologie dite synchrone à aimants permanents est l'une d'entre elles et ne représente qu'une fraction de l'ensemble des éoliennes installées. Les génératrices à aimant permanent ne concernent en effet que les éoliennes à entraînement direct, et même parmi celles-ci, il existe d'autres possibilités technologiques pour la génératrice (bobinages et excitation électrique par exemple).

Les aimants servent à la construction de moteurs synchrones, qui sont très demandés pour les grandes éoliennes allant jusqu'à 6MW de capacité installée. La fiabilité et les besoins de maintenance sont beaucoup plus faibles que pour les autres techniques. Ainsi le temps moyen entre deux pannes pour une éolienne à aimant permanent est estimé à 8000 heures, contre 1500 heures pour un moteur à induction à boîte de vitesse. C'est typiquement notamment la méthode qu'on utilise pour l'offshore où on évite d'aller régulièrement changer des pièces pour maintenance. De plus, les synchrones à aimants permanents ont un meilleur rendement et peuvent marcher assez bien par vent faible, si de bons réglages s'y prêtent.

Un MW installé requiert de l'ordre de 600 kg d'aimants permanents et le néodyme est la terre rare la plus utilisée à cette fin, constituant environ un quart de l'aimant permanent, le reste étant pour l'essentiel du fer et du bore, qui ne sont bien entendu pas des terres rares Mais le problème est que les capacités magnétiques du néodyme s'altèrent si la température dépasse un certain seuil relativement bas pour une salle des machines. Il faut donc mettre une toute petite proportion de dysprosium, une autre terre rare. pour doper l'alliage. La quantité est très faible mais le dysprosium est plus rare (beaucoup moins extrait) que le néodyme, d'où une tension accrue sur le marché, sans doute beaucoup plus que le néodyme, même si paradoxalement, on l'utilise moins. Notons qu'on peut substituer éventuellement pour partie du praséodyme au néodyme, ou utiliser du samarium mélangé au Cobalt (praséodyme et samarium sont des terres rares, le cobalt étant comme le fer un métal électromagnétique). Toutefois, les aimants au samarium-cobalt sont moins puissants et plus fragiles qu'au néodyme. Par ailleurs, Kumara Kobayashi et Michael Coey ont découvert de façon indépendante vers 1990, que l'on pouvait avoir recours à une autre famille, composée de samarium, de fer et d'azote, mais les utilisations de ce matériau restent marginales. Ajoutons enfin qu'un rapport du Bureau de recherches géologiques et minières estime pour sa part qu'un MW installé nécessite un total de 200 kg de terres rares.

Dans ce contexte, trois points importants se conjuguent, qui conditionnent l'avenir. D'une part, le besoin en terres rares est extrêmement coûteux. D'autre part, les terres rares sont très largement concentrées en Mongolie chinoise. Or, la Chine en a abondamment besoin pour son industrie, d'où des restrictions à l'exportation d'ores et déjà effectives d'année en année et qui peuvent s'amplifier, et la possibilité d'un jeu géopolitique où les Européens ne sont pas à leur avantage. Les Etats-Unis et l'Australie, qui disposent de réserves, ne les exploitent pas en raison des prix chinois et du risque environnemental, et par ailleurs la Chine a racheté des brevets américains. Certains projets sont toutefois en développement dans différents pays, notamment aux Etats-Unis et en Russie, également en matière de récupération des terres rares dans les objets usagés. En troisième lieu, le risque environnemental est très élevé. L'extraction de terres rares donne lieu au rejet d'éléments toxiques et radioactifs dans des proportions substantielles, qui affectent substantiellement la santé des populations concernées.

De tout cela résulte l'importance de s'affranchir de l'utilisation des terres rares pour les aimants de bonne qualité. Hitachi a annoncé en 2008 avoir la maîtrise du fer amorphe, un matériau magnétique aux excellentes propriétés. La technique du fer amorphe reste une technique dite synchrone à aimants permanents mais par le feuilletage, l'alliage etc. En 2013, l'incertitude demeure sur la fabrication industrielle de gros aimants permanents à base de fer amorphe. Divers laboratoires de recherche, dont Hitachi, étudient aussi en laboratoire la synthèse du nitrure de fer, qui a des caractéristiques magnétiques encore plus intéressantes que le néodyme-fer-bore. Mitsubishi fait également état de recherches concluantes.
Des avancées sont donc possibles pour réduire la dépendance aux terres rares. L'Europe semble aujourd'hui malheureusement peu présente dans ce champ de recherche pourtant essentiel à bien des égards.

On peut se référer à :
- Applications des terres rares (rapport du Bureau de recherches géologiques et minières): http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Econote_ECOMINE-No2_2011.pdf
- Un article très complet sur le sujet http://www.encyclo-ecolo.com/Terres_rares
- Pour un éclairage plus approfondi, voir Michael Coey (2010) *Magnetism and magnetic material,* Cambridge University Press.

A noter qu'ENERCON fabrique des éoliennes sans Néodyme http://www.enercon.de/fr-fr/1461.htm

Les recherches et innovations portant sur les technologies et procédés ont un quintuple objet. **En premier lieu, celui d'accroître la capacité et donc la productivité des éoliennes**, à travers des tours plus élevées (mâts hybrides pour aller plus haut et avec plus de puissance,

etc.), ou des pâles également plus grandes. D'un point de vue technologique, le diamètre des pâles n'a comme limite que celle qui lui est imposée par la thermodynamique ! Ainsi en arrive-t-on à ce jour à des capacités de 6 à 8 MW pour le terrestre et de 10 MW pour l'offshore. Et s'agissant des pâles, de nombreux autres foyers d'innovation se dégagent (dégivrage, pâles liaisonnées, pâles discrètes, etc.). Il est bien évident par ailleurs que la nacelle et ce qui la compose donnent lieu à une R&D intense et riche en innovations, visant notamment à un renforcement du dispositif électronique de puissance. **Le second aspect porte sur les caractéristiques d'usage, ainsi sur l'acoustique, où la compétence française au sein notamment des groupes internationaux est de premier plan** et se traduit par des recherches et développements technologiques de valeur. Ce volet touche à la question du design, qui sera reprise dans une section lui étant dédiée. **Le troisième aspect porte sur les processus de fabrication des composants**, par exemple le contrôle dimensionnel de pièces, dans le cadre d'un besoin de standardisation qui se fait de plus en plus sentir comme le soulignait Alfonso Faubel (Alstom Power) lors du dernier congrès de l'EWEA. **Un quatrième champ d'innovations vise à permettre le déploiement d'éoliennes dans des environnements complexes en termes climatiques, d'altitude, d'éloignement, etc., en particulier dans des « zones extrêmes »** (voir encadré n°3 ci-dessous). Se poursuivent enfin des recherches technologiques et de multiples innovations portant sur les hydroliennes et le petit éolien.

Encadré n°3 – Les zones de conditions extrêmes

L'entreprise Vergnet conçoit des éoliennes de petite ou grande taille (dont la puissance peut atteindre 1MW) pour répondre aux contraintes des zones isolées où la dépendance énergétique devient de plus en plus forte.

Dans les zones cycloniques, des systèmes de pales rétractables ou de mâts rabattables sont une des solutions principales pour protéger les éoliennes des épisodes climatiques trop puissants. La société Alizeo a développé des éoliennes de forte puissance (1MW) dont le mât est rabattable en moins d'une heure en cas de cyclone. Elle en assure la fabrication depuis la conception jusqu'à l'installation, collaborant avec Areva et Winwind pour les aérogénérateurs synchrones. Vergnet collabore avec d'autres firmes pour la fabrication ou la conception de certaines pièces (ACO, filiale du groupe Vergnet notamment, Siemens, ABB, Aerotrope, etc.).

Les innovations liées à la gestion de l'intermittence font l'objet de recherches à la fois fondamentales (surtout en France) et appliquées (surtout en Allemagne et au Danemark) et sont être une condition du développement de l'éolien. Il ne s'agit pas de stockage direct (les techniques sont trop coûteuses et pas adaptées aux contraintes industrielles), mais de stockage indirect, par voie chimique ou mécanique. Les innovations concernent ainsi les batteries, le stockage sous forme d'hydrogène, les stations de transfert par pompage (STEP). Des modes d'articulation innovants avec d'autres sources d'énergie telle que l'énergie hydraulique existent

ainsi, comme entre le Danemark et la Norvège, en gardant en perspective la réduction des coûts. Ce point renvoie également à la question cruciale des réseaux, que nous traiterons dans la section 4 de la partie C.

C'est en matière de chaîne de valeur et d'optimisation logistique que l'industrie éolienne souffre d'un certain retard par rapport à d'autres industries. **En d'autres termes, le modèle d'organisation industrielle de l'éolien est en train d'évoluer comme par exemple celui de l'automobile** : moins d'intégration verticale dans les groupes, plus de recours à des sous-traitants devant être capables de s'adapter aux demandes de clients variés dans un marché très concurrentiel mais encore incertain. La situation actuelle tient au fait qu'elle a connu un développement très rapide, dans un contexte où la dimension politico-environnementale a pu, d'une certaine manière, primer sur le contexte économique pour d'évidentes raisons. C'est une situation différente de celle des industries évoluant dans un contexte d'oligopole ou de concurrence monopolistique très concurrentiel, où la pression est extrêmement forte avec la vague contemporaine de mondialisation. Tous secteurs confondus, hormis des cas d'exception, liés à une part très faible de la main d'œuvre dans le coût de revient industriel ou à un *business model* particulier, ceci a conduit, soit à une délocalisation de la chaîne en Asie, soit à une péréquation de la production en Europe dans des pays à différents niveaux de salaire.

En raisonnant ici au strict niveau des coûts, et **si l'on fait l'hypothèse que le coût de la turbine représente les 2/3 du coût total d'un « package » éolien et que le coût de la main d'œuvre représente 20% du coût d'une turbine, on peut imaginer qu'avec une localisation en Europe centrale et orientale de certaines activités de la chaîne de la part des turbiniers ou des fournisseurs, le coût de production d'une turbine pourrait être abaissé de 10 à 15% et donc celui d'un projet et par voie de conséquence de l'énergie éolienne de 7 à 10%.** Ainsi son prix pourrait-il descendre aisément sous la barre des 60 euros par une évolution aussi incrémentale que classique, sans prendre en compte ici les gains de productivité permettant une plus grande puissance. Cela devrait bien sûr s'accompagner d'une montée en régime de l'expertise de la filière en *supply chain* et des innovations qui lui sont inhérentes. La logistique au sens strict et le transport sont également directement concernés, par exemple pour disposer de tours plus faciles à assembler et transporter. **Il est également nécessaire de trouver les moyens d'améliorer l'information des acteurs industriels, de développer des processus de coordination, tant sur la connaissance des projets en cours ou en développement que sur la disponibilité locale des compétences industrielles et de service**.

D'autres innovations incrémentales devraient permettre, au niveau du développement et de l'exploitation, d'améliorer les processus de **maintenance prédictive et de gestion de la puissance**. Plusieurs exploitants de parcs éoliens français ont également développé des systèmes, souvent en interne, qui permettent de superviser à distance les éoliennes, depuis une salle de contrôle centralisée. Ces systèmes permettent de rapatrier en un même lieu et en temps réel l'ensemble des informations relatives à l'opération des turbines (vitesse de vent, direction, vitesse de rotation, éventuels défauts). Certains centres de contrôle ont même la

possibilité d'acquitter à distance certains défauts enregistrés par une turbine et de la redémarrer à distance, contribuant ainsi à une meilleure disponibilité des machines et à une meilleure efficacité des installations.

Par ailleurs, les exploitants de parcs éoliens français ont développé en partenariat avec les fabricants de turbines ou leurs sous-traitants, des systèmes d'analyse préventive (analyses vibratoires, acoustiques etc.) et ont contribué au développement de **plusieurs améliorations techniques qui permettent aujourd'hui d'augmenter la fiabilité des machines et en facilitent l'exploitation.** Ainsi, bien qu'il y ait peu de donneurs d'ordre industriels français, **les opérateurs nationaux ont développé une vraie expertise et une véritable compétence dans les domaines de la maintenance et de l'exploitation de parcs éoliens, et le champ des innovations potentielles reste très vaste.**
Quant à l'offshore, de nombreuses innovations s'agissant des fondations classiques comme du « flottant » sont à élaborer en s'appuyant sur les acquis de l'énergie pétrolière.

Il existe en outre des innovations très intéressantes initiées en dehors du cadre de l'éolien mais dont celui-ci peut directement bénéficier. Citons le cas de la société Leosphere, jeune entreprise française devenue le leader européen de l'observation atmosphérique par LIDAR (Light Detection and Rangin Radar-Laser), dont la technologie permet d'optimiser l'exploitation de l'énergie éolienne en acquérant des données de vent (force et direction) très précises.

On en peut qu'être frappé, enfin, par le grand dynamisme entrepreneurial auquel donne lieu l'éolien, notamment le petit éolien. C'est là un nouveau mode vie qui se prépare, ce sur quoi nous reviendrons. Les projets sont nombreux chez des entreprises telles que Vergnet mais aussi chez de jeunes entrepreneurs ou parmi les élèves ingénieurs ou d'Ecole de Commerce ainsi que les designers. On peut citer ici le cas d'Axéole, qui ne propose rien de moins que de «révolutionner l'éolienne domestique», dans la perspective d'un mouvement plus général. En outre, dans d'autres pays, l'éolien donne lieu à des innovations en termes d'usage, notamment pour des situations de crise, où la portabilité et la maniabilité de petites turbines sont mises à profit, comme le montre l'exemple de la solution développée par la société NPC (voir encadré n°3).

Encadré n° 4 – Les usages inattendus des éoliennes

La société américaine NPC, Natural Power Company est un incubateur de solutions innovantes pour l'usage des énergies renouvelables. Basée à Honolulu, NPC a développé en 2010 un système d'éolienne mobile aux pales rétractables utile notamment après une catastrophe naturelle qui aurait endommagé les centrales énergétiques. En outre, le système éolien est couplé avec des panneaux solaires qui permettent également la production d'énergie photovoltaïque. Les usages humanitaires et militaires semblent prometteurs, le produit étant conçu pour être transportable sur un camion et déployable dans toutes les conditions atmosphériques. L'entreprise NPC se présente comme un incubateur cherchant à concevoir des solutions innovantes pour l'usage d'énergies renouvelables et se concentre ainsi sur la création de prototypes, qui peuvent ensuite être développés si un ou plusieurs organisations y trouvent leur intérêt. Outre la R&D, NPC développe s'occupe des questions de propriété intellectuelle et plus

largement des aspects juridiques, met en place des *joint-venture* avec les organisations intéressées par le développement, etc.

Pour avoir un aperçu de leur solution brevetée pour le domaine de la défense, « Renewable Energy Mission Module » : http://www.naturalpowerconcepts.com/technology.html

On voit bien au total que le champ d'innovation potentiel est immense, notamment en France. **L'éolien peut largement y bénéficier de la grande expertise française dans deux domaines notamment : l'aéronautique et l'exploitation de plateformes pétrolières, où les synergies s'imposent.**

Il ne faut pas oublier toutefois l'importance des innovations non technologiques, et il importera que les financeurs (banques, fonds, sans oublier Oseo et la BPI) prennent en considération la nécessité d'une politique élargie dans ce domaine. Ce sont la pluralité et la simultanéité de ces innovations qui assureront l'avenir de l'éolien. Il faut également garder à l'esprit et en bonne position les innovations en matière de design, très importantes et traitées dans la section 3 de la partie C.

C. L'intégration de l'éolien dans son environnement économique, social, sociétal, technologique

1 Sortir de l'injonction paradoxale

Comme le soulignent les nombreux rapports sur les politiques énergétiques, l'exercice prospectif se révèle particulièrement ardu et hasardeux en raison de la conjonction de multiples incertitudes portant sur tous les domaines, technologique et scientifique, économique et financier, politique et même démographique[22].

La place de l'énergie éolienne dans le mix énergétique (et pas seulement électrique) français dépendra donc de choix avant tout politiques, dont les déterminants reposent sur un grand nombre d'estimations et de paramètres soumis à de fortes variations. Ainsi, l'évolution des prix du pétrole et du gaz est soumise à de fortes incertitudes géopolitiques, de même que la sécurité de l'investissement. Le coût du nucléaire est sujet à de multiples controverses et incertitudes selon la façon dont on prend en compte le risque d'un accident grave, comme Fukushima, la question du coût des déchets, sans parler de la distinction entre le nucléaire historique et le nucléaire nouvelle génération. L'évolution réelle de la demande constitue un déterminant crucial et pourtant pas assez bien évalué par les différentes modélisations. L'unification du marché européen de l'énergie change les règles du jeu pour l'ensemble des acteurs, économiques et politiques. Le développement des énergies renouvelables intermittentes pose des défis économiques et technologiques pour gérer le renforcement des réseaux électriques de transport et de distribution, la prévision de la production et son adéquation avec la demande (gestion de la pointe), le stockage.

Le calcul du coût complet et relatif de chaque énergie, base essentielle pour réfléchir à la composition du mix, est lui-aussi constitué d'interdépendances. La sensibilité forte de ces coûts à la volatilité des prix des énergies fossiles ou encore le taux d'utilisation des différentes filières apporte un biais aux évaluations économiques[23]. Il ne faut pas oublier non plus les emplois générés ou perdus en fonction de la place accordée à chaque filière (en France et à l'étranger), les effets indirects sur la consommation des ménages, sensibles aux variations du prix de l'énergie. Il faudrait pour bien faire raisonner à partir d'un modèle d'équilibre général calculable de type «nouveau classique» ou «nouveau keynésien», tant les interactions interviennent à tous les niveaux et la question énergétique est globale, sachant qu'une approche de cette nature présente des limites méthodologiques !

[22] Le rapport du Centre d'Analyse Stratégique, 2012, « Energies 2050 » en propose une analyse fine et complète, notamment dans les chapitres 3 et 4.
[23] Centre d'Analyse Stratégique, 2012, « Energies 2050 » , p. 233

Ce qui est clair en tout cas dans ce contexte est qu'en regard des conditions économiques (compétitivité de la filière) et écologiques (émissions de CO2) l'éolien a toute sa place dans la constitution du bouquet énergétique national, à un niveau compris, quelles que soient les circonstances et pour prendre un large éventail, entre 10% (Grenelle de l'Environnement) et 25[SL3] % (pour 40 GW installés, en 2030) de la production énergétique nationale. Nous suivons ici plus généralement l'approche du CAS, mesurée, pertinente et qui reste tout à fait actuelle ; le développement soutenable des EnR en général est un « levier indispensable à la diversification du bouquet énergétique et à la réduction des émissions de CO2. La diffusion de ces technologies et l'accélération des efforts en matière de recherche et développement permet de réduire leur coût » (p. 370).

Dans ce cadre, l'éolien a besoin de stabilité pour se développer et assurer les objectifs qui lui sont impartis, et que ce développement ne soit pas entravé par lois qui l'obstruent et des incertitudes juridiques qui créent une forme d'apesanteur dont on voit les effets nocifs sur le fort et récent ralentissement des projets illustré par le graphique suivant.

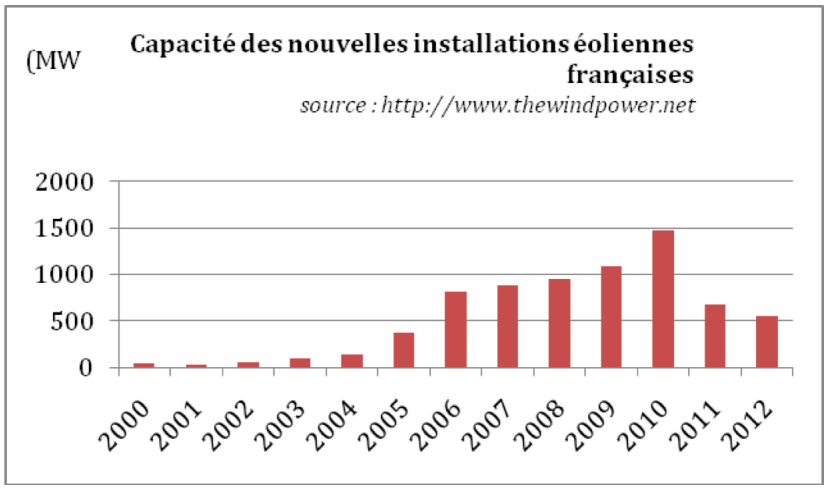


Figure 15
Capacité annuelle installée en France, 2000-2012

Un même cap doit être tenu. Grenelle 2 a, à cet égard, fait reculer les choses après que Grenelle 1 les avait fait avancer !

En 2012, malgré les engagements du nouveau Président de la République en faveur des EnR, c'est une autre contrainte qui menace la reprise. En effet, le collectif anti-éolien Vent de Colère a déposé un recours contre l'arrêté tarifaire de 2008, au motif que celui-ci constituerait une aide d'Etat et serait ainsi illégal. Le Conseil d'Etat ayant renvoyé le soin de l'interprétation à la Cour de Justice de l'Union Européenne (CJUE) en mai 2012, le marché reste en attente et les industriels font face à des contraintes juridiques accrues et un blocage des investissements.

C'est là une problématique très générale et qui vient heurter la mise en œuvre de politiques nationales et aussi européennes de long terme. Il faut être conscient qu'attendre la décision de la CJUE, qui prendra entre 12 et 18 mois, ne pourra que renforcer le mécanisme d'injonction paradoxale et la mise en œuvre de l'objectif national de redéploiement énergétique.

La confirmation de dispositifs de soutien et de régulation (certification « verte », appels d'offres pour les projets, tarifs de rachat de l'électricité, etc.) bien définis et stable est également indispensable. Et la politique de l'éolien est indissociable de la politique globale ; ainsi des accrus efforts en faveur de la recherche et du développement doivent contribuer à la soutenabilité financière des projets en assurant un bon rapport entre le coût et la qualité ; des investissements conséquents doivent être ciblés et dirigés vers la modernisation des réseaux électriques, des technologies de stockage et de prévision de la production et de la demande, nous y reviendrons avec précision. Des capacités de production flexibles sont en outre nécessaires pour pallier l'intermittence. Et il doit être souligné que l'éolien ne se développe pas *contre* les combustibles fossiles voire même contre le nucléaire, mais en complément des énergies traditionnelles dont la part relative va elle-même évoluer. Tout raisonnement d'exclusivité doit être banni !

Cette stabilité institutionnelle est d'autant plus essentielle qu'elle conditionne la politique française des grands acteurs industriels européens (et notamment français), celle des fournisseurs appartenant à de grands groupes, celle des PME françaises et des projets entrepreneuriaux.

Par ailleurs et comme l'a montré la partie de ce rapport consacrée à la compétitivité, la question du financement et du soutien à la filière éolienne est aussi cruciale qu'elle est complexe. Dans le contexte économique général actuel, et en considérant la tendance allant vers une hausse incontournable des prix de l'énergie, qui devra être limitée autant que faire se peut, il est nécessaire de faire en sorte que l'énergie éolienne soit la plus compétitive possible et s'intègre au mieux dans les mécanismes de marché européen.

A cet égard, le débat entre le tarif d'achat et le passage possible à un système de prime oppose deux instruments favorisant l'énergie éolienne. Le tarif d'achat consiste en une mesure incitant à les distributeurs d'électricité à acheter l'énergie produite par les éoliennes : « *l'Etat a mis en place depuis 2000 un dispositif incitatif : l'obligation d'achat. Les distributeurs d'électricité doivent acheter l'électricité produite à partir de l'énergie éolienne aux exploitants qui en font la demande, à un tarif d'achat fixé par arrêté. Le distributeur d'électricité est répercute le surcoût à ses clients par une contribution proportionnelle à l'électricité qu'ils consomment (CSPE)* »[24].

Le tarif d'achat est un instrument qui oblige les distributeurs à acheter de l'énergie éolienne sans conditions. S'il apparaît comme un moyen de promouvoir la filière à ses débuts, il n'est peut être pas la solution la plus valable économiquement. En effet, le financement des énergies renouvelables par un tarif de rachat peut conduire à accroître le prix de l'électricité des

[24] Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie : http://www.developpement-durable.gouv.fr/Tarifs-d-achat,12280.html

ménages et d'une partie des entreprises (les grandes entreprises très consommatrices d'électricité bénéficient d'une exonération). Ainsi la CSPE, qui finance notamment les EnR, la péréquation tarifaire et les tarifs sociaux de l'énergie, représente en 2012 un coût d'environ 4,2 Mds d'€. Ce coût se répercute sur le prix de l'électricité pour le consommateur à hauteur de 13,7 €/MWh, ce qui représente environ 11 % de la facture annuelle moyenne TTC d'un client résidentiel.

Selon les prévisions de Commission de Régulation de l'Energie, la charge liée aux EnR pourrait plus que doubler d'ici à 2020 passant de 2,2 Mds d'€ en 2012 à presque 7 Mds d'€ en 2020. Toutes choses égales par ailleurs, cette hausse conduira à une augmentation du prix de l'électricité d'environ 15 €/MWh. Globalement la facture d'électricité des ménages pourrait croitre de 50% d'ici à 2020, notamment en raison des objectifs de déploiement des EnR. Cette hausse des prix de l'énergie pour les consommateurs (entreprises et ménages) a un impact négatif sur la consommation et la compétitivité des entreprises, à ce titre elle pèse sur l'activité et l'emploi en France. Il demeure, comme nous l'avons montré, que la contribution de l'éolien à cette « dégradation » est très limitée.

Dans ce contexte, la prime d'achat a pour objectif d'inciter les distributeurs à acheter l'énergie éolienne mais sous certaines conditions. La prime cherche à rendre l'énergie éolienne plus compétitive en répondant mieux aux besoins du marché. Par exemple, les producteurs peuvent toucher une prime à la production s'ils arrivent à produire de l'énergie lors des pics de consommation.
Le montant de la prime peut être calculé de deux façons différentes :

- *Ex ante*, sur la base d'une estimation de ce que seront les prix de marché, ou sur la base du calcul des externalités associées à la production d'ENRe (environnementales, stratégiques). Il existe alors une incertitude importante pour le producteur sur sa rémunération totale, qui dépend des prix de marché effectifs. Pour limiter cette incertitude, le système espagnol qui utilise la prime *ex ante* a également instauré des seuils (plafond et plancher) pour la rémunération globale (prix de marché + prime) du producteur à tout instant.
- *Ex post*, sur la base de l'observation de ce qu'ont été les prix de marché réels. Par exemple, aux Pays-Bas, le montant de la prime, calculée sur une base annuelle, correspond à la différence entre l'estimation du coût complet de production et le prix de marché moyen annuel observés *ex post*. Des taux d'ajustements par technologie sont appliqués à ce prix moyen pour tenir compte du profil temporel type de production de chaque technologie. Le producteur bénéficie donc d'une très bonne visibilité sur ses revenus, puisque la seule incertitude supplémentaire qu'il ait à gérer par rapport aux tarifs d'achats est celle du profil temporel de production réel de son installation par rapport au profil moyen des installations utilisant la même technologie.

L'avantage généralement attribué aux tarifs d'achat est de garantir au producteur une visibilité et une sécurité de revenus, ce qui est jugé particulièrement important pour des filières en phase de démarrage, soumises à de fortes incertitudes technologiques et réglementaires. Néanmoins,

le mécanisme de prime *ex post* garantit au producteur pratiquement le même niveau de visibilité et de sécurité de revenus.
L'intérêt des primes est d'envoyer en plus un signal-prix aux producteurs d'énergies renouvelables, ce qui permet un meilleur ajustement de l'offre à la demande. De plus, la prime intègre les producteurs d'énergie aux marchés de l'électricité, ce qui permet de préparer l'atteinte de la parité réseau. Les deux solutions méritent ainsi d'être étudiées par les acteurs en présence de manière concertée.

2 L'éolien : une énergie en quête de reconnaissance institutionnelle

L'éolien est plus enclin à se développer dans les pays à tradition décentralisée. Il n'est que de regarder le rapport à la centralisation et à la décentralisation des pays où il a prospéré. On peut apporter à cela trois commentaires.

Le développement de l'éolien se prête à la constitution de clusters régionaux et de projets d'envergure à cette même échelle. La pépinière d'Oust Marest, décrite en encadré, en constitue une belle illustration. Les initiatives se multiplient aujourd'hui en France, ce qui est une excellente chose. Et une fois installée, une ferme peut devenir un objet de fierté local et qui responsabilise les citoyens eu égard à leur consommation d'électricité.

Les décisions d'implantation d'une ferme éolienne, en tout cas terrestre, relèves d'initiatives locales et le processus d'appropriation s'inscrit dans la même logique. L'Etat édicte les règles et les tarifs d'achat, la Commission de régulation de l'énergie n'a qu'un pouvoir consultatif. Cependant le contrôle de l'Etat se fait dans un cadre pluriel puisqu'il relève tant de la DREAL que de la direction en charge de l'environnement. Le système est tel que les délais pour l'installation d'une ferme éolienne, on l'a vu, sont de 6 à 8 ans.

Sur un autre plan, le développement de l'éolien, comme celui d'autres énergies renouvelables, rentre en contradiction avec la tradition française selon laquelle la politique énergétique relève de l'initiative publique nationale. On peut approuver ou non ce mode de fonctionnement et cette culture, mais ils ont fait leurs preuves et ont apporté dans le passé une indépendance énergétique, un prix faible et une capacité à l'exportation. Au surplus, il faut constater que l'éolien n'est pas toujours bien vu. Certes, il réunit des acteurs industriels/développement de grandes réputations, les grands acteurs européens sont présents et les grands groupes français de plus en plus impliqués. Mais l'éolien est toujours un peu suspecté de tirer son épingle du jeu d'un cadre qui le favoriserait à l'excès, qu'il s'agisse des décisions d'ordre industriel et économique et des projets d'implantation (la situation étant différente pour la dimension environnementale, où l'éolien tient son rang comme il se doit). La situation est très différente notamment de celle de l'Allemagne, où l'éolien a relevé d'une structure décentralisée dès qu'il est devenu une priorité stratégique, dans les années 80, avec le soutien de responsables politiques de tous horizons. Cette décentralisation n'a pas empêché la formation d'une forte communauté de l'éolien, rassemblant industriels, promoteurs, académiques, chercheurs,

membres du (des) gouvernement(s). L'éolien est une force allemande, notamment industrielle, ce qui est susceptible d'inquiéter la France, qui en dispose dans d'autres registres, qu'elle doit pour partie délaisser aujourd'hui ! Dès lors le diagnostic est simple : l'éolien doit devenir une force française, et les jeux de vases communicants comme l'anxiété qui les accompagnent n'ont pas plus de pertinence qu'ils n'en avaient pour le charbon et l'acier dans l'après-guerre.

Il faut également tirer les conséquences de ce constat et de cet impératif dans les grandes écoles et les universités, où l'éolien tient certes une place plus importante qu'autrefois, mais qui reste limitée en dehors des options « développement durable » et « entrepreneuriat ». Il ne s'agit certes pas de créer une grande école de l'éolien, ou de dire que le statut de l'éolien doive être à l'égal de celui du nucléaire ou du pétrole, qui repose sur des décennies d'ancrage, mais de faire en sorte que l'éolien joue un rôle plus important dans le dispositif de l'enseignement et de la recherche, à tous les niveaux, notamment le plus élevé. Non seulement il le mérite, mais en plus il serait incongru qu'il en fût autrement pour une énergie qui va représenter dans un temps bref au moins 10% de l'ensemble. Différentes initiatives doivent dans ce contexte être saluées, telles celle du CNAM qui a bien anticipé cette évolution en intégrant un enseignement spécifique consacré à l'éolien dans l'unité consacrée aux réseaux électriques du diplôme d'ingénieur intitulé « Systèmes électriques », ou encore au sein des masters d'économie de l'environnement et du développement durable.

En bref, le moment est venu d'une plus grande reconnaissance institutionnelle de l'éolien, en renforçant notamment les actions et initiatives associées au plan 'Métiers de l'économie verte dans le domaine de la formation, en particulier dans les établissements d'enseignement technologique, et à tout niveau de qualification..

Mais ceci ne peut se faire à sens unique. L'éolien étant par nature plus décentralisé, il convient que son développement s'opère de façon coordonnée – d'autant qu'il bénéficie de subventions à l'heure où il est difficile d'en attribuer – au même titre que sa montée en régime économique, industrielle et sociale.

C'est pourquoi nous préconisons la mise en place d'un pacte de l'éolien pour le redéploiement énergétique, l'industrie et l'emploi, où devront figurer les engagements de l'industrie et des acteurs de l'éolien en général en faveur de l'investissement, de la recherche, de l'innovation et de l'emploi sur un horizon de 5 à 10 ans. En échange de quoi la stabilité du contexte institutionnel et juridique sera assurée. C'est à notre sens la condition d'une base saine de développement dans un climat de confiance réciproque.

Encadré n°4 – Créer de nouvelles synergies industrielles au niveau régional : le cas de la pépinière Energies renouvelables d'Oust Marest

Entre Normandie et Picardie, la Pépinière Energies Renouvelables d'Oust Marest est un éco-système d'affaires unique en France. Elle regroupe actuellement 6 entreprises (35 emplois), qui

interviennent dans l'installation (Totem Solaire), la vente d'équipements (Exo-Electricité), le développement de projets, l'exploitation et la maintenance (Enercon Service, Gamesa, EnergieTeam France) ainsi que la logistique (STO Logistique). Rattachée à la Chambre de Commerce et d'Industrie du Littoral normand-picard, la Pépinière est une initiative d'accompagnement sectoriel par le biais de l'action de son animateur Eric Masson, spécialiste des énergies nouvelles.

La Pépinière EnR se veut résolument transversale en défendant **une approche multi-activités/multi-filières et une vision globale qui jouent sur la complémentarité des filières EnR**. Chaque village ne peut pas avoir un parc éolien - les contraintes s'accumulent vite, les plans d'aménagement sont stricts –mais pourra accueillir une installation photovoltaïque, du bois-énergie, voire un projet de méthanisation ou de géothermie Cette approche permet de dépasser la segmentation, tant technologique et scientifique qu'industrielle et politique, qui caractérise la filière des EnR. La mixité énergétique n'est pas qu'une question de politique nationale : elle doit d'abord se décliner sur le territoire à une maille très fine, en fonction des besoins et des possibilités locales.

Cette Pépinière a été conçue prioritairement pour **des entreprises jeunes** de moins de 2 ans. Toutefois, elle accueille également une base de maintenance d'éoliennes d'Enercon Service car la société a aux environs près d'une soixantaine de mâts sous contrat pluriannuel de service. Seize personnes y sont embauchées en CDI, essentiellement des jeunes de 20-30 ans qui donnent un nouveau dynamisme aux villages alentour. Ce sont des **métiers valorisants**, qui demandent un certain niveau de qualification tout en restant accessibles. La Région Picardie encourage cette politique par **l'ouverture courant 2013 d'un centre de formation en maintenance éolienne**. De **nouveaux métiers** sont également appelés à se développer, à l'image de ce patron pêcheur qui s'est repositionné sur le marché de l'éolien *off shore* avec un premier navire de servitude (« crew boat »), basé au Tréport, qu'il loue dès à présent avec pilote à des bureaux d'études et des développeurs de l'éolien offshore, dans le cadre d'études ornithologiques ou environnementales, ou encore de campagnes de dépollution pyrotechnique.
L'animateur de la Pépinière EnR, accompagnateur référent des entreprises hébergées, les guide sur ces secteurs naissants et facilite leur intégration sur leurs marchés respectifs grâce à une parfaite connaissance de ces activités.

Une autre dimension essentielle du rôle joué par Eric Masson, est celle de développeur de filière et d'animateur de réseaux techniques et économiques diversifiés autour des Energies renouvelables avec un fonctionnement en mode projet. S'agissant de l'éolien, et notamment de l'éolien offshore, qui bénéficie d'appels d'offres de grande ampleur sur la façade maritime du grand ouest de la France, l'enjeu est clairement industriel.
Selon la région, l'organisation diffère. Du côté picard, co-animation d'un Groupe de Travail Diversification dans l'éolien avec le Conseil Régional de Picardie. Du côté normand, animation, pour le compte des acteurs économiques normands sous la bannière de la CCI de Normandie, d'un groupe de travail « accompagnement des PME/PMI, diversification, export ». La dynamique s'appuie sur une plate-forme d'intermédiation en ligne entre donneurs d'ordres et preneurs d'ordres potentiels, nommée « Vigie Business Eolien offshore » qui comprend près de 800 membres. Sur les 4 zones accordées lors du premier appel d'offres à d'une part EDF EN/DONG Energy/WPD et ALSTOM (Fécamp, Courseulles/Mer/Saint-Nazaire), de l'autre à IBERDROLA/EOLE RES et AREVA Wind (Saint-Brieuc), le contenu emploi attendu est de près de 10 000 emplois. Il s'étoffera encore du fait du lancement de la deuxième tranche d'appel

d'offres sur les zones de Noirmoutier/Yeu et du Tréport, puis d'une 3ème à venir d'ici un an.C'est la raison pour laquelle les Consulaires, dont la CCI Littoral Normand Picard, ont décidé de coopérer ensemble à l'échelle du « Grand Ouest » français et échanger les bonnes pratiques dont Vigie Business Eolien offshore

Outre ces rencontres en région, les entreprises sont invitées par le réseau, avec l'aide de CCI International, à se rendre en Europe, dernièrement au Salon Européen de l'EWEA à Vienne afin de bien prendre la mesure de la dimension européenne et internationale du marché, accompagnés sur place par les partenaires économiques régionaux picards et normands dont Eric Masson. Précédemment, un groupe interrégional s'était rendu en Grande-Bretagne et en Irlande pour mieux appréhender le marché des Energies marines renouvelables

Tout ce travail aurait peu de chances d'aboutir s'il n'était réalisé à tout moment dans la plus étroite collaboration avec la profession éolienne. Une partie importante du temps de l'animateur est consacré à ces contacts avec les donneurs d'ordres, dans toute leur diversité, et les syndicats professionnels que sont le SER et la FEE, aux initiatives desquels (Windustry, Eole Industrie) Eric Masson associe les territoires picards et normands, au service des Energies Renouvelables, et notamment de l'éolien terrestre et maritime.

3 La pertinence d'une approche design

Il en est des éoliennes comme de l'art contemporain. Pour les uns, c'est beau et agréable à regarder, voire apaisant ; pour les autres, c'est laid, envahissant et repoussant, rappelant en plus volumineux une ligne à haute tension. C'est pourquoi il peut être dit que c'est en mer que l'éolien trouve sa place, à l'abri du regard humain, la ferme éolienne se rapprochant alors de l'imaginaire de la plateforme pétrolière, dont elle partage d'ailleurs certaines caractéristiques. On ne pourra certes jamais changer la diversité des appréciations, fort heureusement. Mais sur cette question également, le moment est venu de changer de paradigme et de passer à une autre étape de maturité, en intégrant l'éolien dans une perspective de design global, technologique, esthétique et sociétal.

L'éolienne est, on le sait, l'héritière du moulin. Peut-être faudrait-il d'ailleurs réhabiliter cette terminologie. En resituant les choses dans leur contexte, Gilbert Ruelle nous rappelle que « les moulins ont été largement utilisés en Europe entre le dixième et l'ère industrielle » et que « vers 1800, plus de 15.000 moulins à vent et 80.000 moulins à eau écrasaient le grain et pompaient l'eau »[25]. Le développement de la machine à vapeur puis de l'électricité a sonné le glas du moulin dans sa forme ancienne et indéniablement écologique. Comme un juste retour des choses, l'éolien électrique a fait son apparition dans la seconde moitié du XXème siècle avant de devenir aujourd'hui un vecteur important de redéploiement énergétique et de développement

[25] Commission Energie et changement climatique de l'Académie des Technologies : 10 questions à Gilbert Ruelle sur l'éolien, une énergie XXIè siècle ? – 9 juillet 2008
http://www.canalacademie.com/IMG/pdf/Academie-technologie-eolien-gilbert-ruelle.pdf

durable. Il demeure que l'éolien contemporain est mâtiné du souvenir du moulin dans l'imaginaire collectif, ce qui concorde bien avec notre représentation de la contemporanéité, qui marie innovations audacieuses et nobles traditions. On pourrait certes imaginer le même type de dualité à propos du charbon par exemple, mais si l'imaginaire de la mine de charbon porte des valeurs d'engagement et de solidarité, elle véhicule aussi la mémoire de drames individuels par la maladie et de drames collectifs lors de graves accidents. La vie des moulins fut bien plus douce et aseptisée ! Et cette filiation est bien comprise par ceux de nos contemporains qui saisissent le mieux l'air du temps et dessinent celui qui est à venir, tel Karl Lagerfeld, qui a disposé de grandes éoliennes blanches au Grand Palais à l'occasion de la présentation de sa collection printemps-été 2013 et a déclaré : «Personne n'a critiqué les moulins à vent en Hollande, alors ? Moi, je trouve cela génial ».

Le design peut et doit être compris dans différents sens, mais il signifie en tout cas que l'éolien ne peut être enfermé dans une stricte approche en terme de *utilities*. Bien évidemment, les ingénieurs et développeurs doivent être très attentifs au rendement en puissance d'un parc éolien lors de sa conception. Le positionnement des éoliennes les unes par rapport aux autres n'est pas le fait du hasard et est souvent lié à la maximisation de la puissance que l'on veut capter pour une technologie d'éolienne donnée. Cela suppose en particulier une interdistance minimale entre chaque éolienne. Mais nous préconisons d'englober cette dimension fonctionnaliste, pour essentielle qu'elle soit, dans une approche de design global réunissant l'esthétique, la technologie, les nouveaux usages et modes de vie, la cohérence, la culture.

Tout parc éolien requiert une approche renvoyant à l'architecture et au paysagisme. Mais il importe qu'elle soit partagée par l'ensemble des parties prenantes. D'ores et déjà, les développeurs et installateurs de parcs sollicitent des architectes-paysagistes dont les projets contribuent à une évolution bien pensée de l'environnement. Un certain nombre de parcs sont légitimement reconnus comme « très réussis ». Cette approche doit être confortée. Mais elle ne pourra l'être que si les développeurs, les industriels, les collectivités locales, les représentants de l'administration raisonnent avec les mêmes paramètres. Tout projet de ferme éolienne doit être figuré comme un projet architectural au sens large, avec de surcroît une facilité relative de démantèlement après quelques décennies si les parties prenantes du lieu en décident ainsi quelles qu'en soient les raisons. Les éoliennes « se voient » comme les moulins « se voyaient », ce n'est pas leur faiblesse mais au contraire leur force. Leur déploiement avec la transition énergétique va immanquablement rejaillir sur le paysage géographique français, aux yeux des citoyens locaux et nationaux, ainsi qu'à ceux des touristes. Il doit conforter l'image de la France comme pays de culture et d'esthétique. A cet égard, l'aspect cinétique de la perception d'un parc éolien depuis les axes de circulation (routes et autoroutes, lignes à grande vitesse) est particulièrement intéressant.

Se pose à cet égard un problème de traitement administratif des projets, considérés explicitement et exclusivement comme des *utilities* dont il faut éviter qu'ils altèrent le paysage postulé comme devant rester immuable ou presque. La logique sous-jacente est celle de la conservation au sens strict. Fonctionnalité, neutralité et préservation sont les trois maîtres mots qui dictent la conduite à tenir, faute de quoi tout projet peut être réfuté. Mais il y a ici une

confusion dommageable entre le conservatisme et le conservationnisme. Le modèle optimal sous-jacent doit être celui des réserves de biosphère, qui n'exclut pas l'aménagement des paysages, dès lors que développement économique durable et conservation de la biodiversité sont conjugués harmonieusement. Le seul réel problème à cet égard est celui de l'avifaune et des chauves-souris, l'éolien devant continuer d'en minimiser la détérioration et d'assurer la compensation nécessaire, sachant qu'il est bien loin d'être le principal facteur de mortalité des oiseaux. D'importantes recherches et expérimentations sont d'ailleurs produites à ce sujet (voir encadré n°5). Il doit être par ailleurs souligné l'impact positif de l'éolien marin sur l'ichtyofaune : l'implantation d'éoliennes en mer permet en effet de créer des réserves pour la flore marine, du fait de la création de zones d'exclusion, empêchant navigation et pêche au bénéfice de la biodiversité marine.

Encadré n° 5 – L'éolien et les volatiles

Si l'on prend pour illustration le cas américain, le nombre de volatiles tués par an se chiffre ainsi. Par les éoliennes, 440.000 ; les tours de télécommunication, 6,8 millions ; les automobiles, 80 millions ; les pesticides, 90 millions ; les câbles électriques (collusions, électrocutions), 175 millions ; les chats (domestiques, harets), 1 milliard ; les immeubles (de verre, éclairés ; collusions), 1 milliard.
Différentes initiatives sont prises (localisation des fermes éoliennes à l'écart des courants migratoires ; structuration de la traversée des fermes éoliennes). Une expérience a ainsi été conduite dans la région de Cadix où intervient Marc Béchard, professeur de biologie à Boise State University. Le taux de mortalité a ainsi été réduit de 50% avec une baisse de productivité de 0,7%. le déplacement du seuil de vitesse du vent pour le déclenchement de l'éolienne (le déplacement de 4 m/s à 5,5 m/s a fait plonger de 93% le taux de mortalité des chauves-souris, qui ne sortent pas par grand vent.
Un article de Courrier International d'août 2012 fait une bonne synthèse du sujet.
Pour une compréhension plus approfondie du sujet, voir :

- Meera Subramanian (2012) "The trouble with winds : An ill wind", *Nature*, 486, juin 2012.
- Manuela de Lucas, Miguel Ferrer, Marc J. Bechard, Antonio R. Muñoz, (2012) "Griffon vulture mortality at wind farms in southern Spain: Distribution of fatalities and active mitigation measures", *Biological Conservation*, 147.
- Miguel Ferrer, Manuela de Lucas, Guyonne F. E. Janss, Eva Casado, Antonio R. Munoz, Marc J. Bechard and Cecilia P. Calabuig, (2011)"Weak relationship between risk assessment studies and recorded mortality in wind farms", *Journal of Applied Ecology*, 49.

Seul cet angle définit-il une approche légitime. S'est ajouté à cela une interprétation des textes pouvant varier d'un département à l'autre, et qui a conduit à ce que soient préconisées et autorisées des formes et lignes différentes selon les cas. Cette hétérogénéité a globalement disparu, ce qu'il faut saluer, mais au prix d'une normalisation administrative qui circonscrit largement le champ des possibles. Les exemples sont multiples. Il est assurément préférable d'éviter les effets bigarrés étrangement assortis et parfois agressifs, témoignant en tout cas d'une « compétence couleur » quelque peu défaillante, que l'on peut trouver au hasard d'une

promenade dans telle ou telle région allemande. Mais faut-il pour autant s'en tenir à cette couleur imposée, … qui, si l'on peut dire, se veut passe-murailles ? A moins de considérer que cette neutralité forcée soit également comprise comme une retenue désirée au sens du design, mais une telle dialectique n'est gère robuste ! Et lorsqu'une ligne d'éoliennes est pensée harmonieusement par un architecte-paysagiste, et que l'une d'entre elle pour son malheur se trouve à une distance légèrement inférieure d'un bosquet à ce qui est administrativement autorisé et se voit donc exclue au mépris de l'esthétisme du projet, qui n'entravait pourtant en rien celui du bosquet et de ce qui l'entourait, s'agit-il d'un jugement raisonnable ? Chacun sait qu'en matière d'architecture, de paysagisme et de design, le détail n'existe pas.

L'administration territoriale doit certes respecter sa mission de préservation du patrimoine paysager français, mais ceci n'exclut pas les évolutions et transformations Le paysage français évolue de fait, depuis toujours. Aurait-il été préférable d'empêcher la réalisation des jardins à la Française, sous prétexte qu'ils dénaturaient ce qui leur préexistait ? Que faire des effets du remembrement, qui s'imposent à nous quoi qu'on en fasse et oblige à se rapprocher du Perche pour mieux imaginer ce qu'il en était autrefois ?

Chacun fait ce qu'il a faire en fonction du rôle qui lui est imparti et des règles qu'il est tenu de faire respecter. Mais il y à notre sens urgence là aussi à faire évoluer les choses et ces règles, au profit d'une évaluation prenant réellement en compte la dimension design et de projet esthétique, ce qui nécessite que des compétences en la matière soient adjointes à tous les niveaux. Il convient de faire en sorte que les parcs éoliens soient admirables, dans tous les sens du terme ! Et si l'éolien terrestre est le plus directement concerné, l'éolien maritime ne doit pas échapper à cette conception, a fortiori certes lorsqu'il est à proximité des côtes, mais en toutes circonstances, en vertu d'un principe mariant l'écologie et la modernité.

Les turbiniers en tant que donneurs d'ordre doivent eux-mêmes s'inscrire dans cette perspective. On ne peut certes faire fi des contraintes liées à la physique qui s'imposent à leur politique d'innovation et priment de facto sur le reste, toutefois le design, afin d'étendre le champ du possible, doit être plus directement intégré au métier de turbinier, adjoignant ainsi des compétences permettant que ces acteurs essentiels maîtrisent le dépassement de leur identité *utilities*, même si la dimension environnementale de leur activité est déjà en tant que telle un objet légitime de dignité. N'oublions pas également l'auditif, aussi important que le visuel. L'acoustique est affaire d'ingénierie mais aussi de design. Il s'agit ici de réduire le bruit à néant, au strict minium en tout cas et de faire en sorte que le son, faible, doux et apaisant, soit à l'instar de l'imaginaire de l'éolien dans sa globalité. Les parcs éoliens peuvent ainsi se mettre en arrêt automatiquement en fonction de la direction du vent pour ne pas gêner les zones d'habitation. De la même manière, grâce à la modélisation de la course du soleil, au cas par cas, des arrêts automatiques peuvent se mettre également en fonction pour éviter que les effets stroboscopiques ne soient visibles depuis les zones d'habitation.

La question du design est tout aussi vivante pour ce qui est du petit éolien, prêt à s'imposer dans l'habitat contemporain et à habiller nos villes, parallèlement à la grande fonctionnalité qu'il représente pour des zones n'étant rattachées à aucun réseau. Là aussi, les initiatives se

multiplient. La plus emblématique fut à l'initiative de Philippe Starck, qui a annoncé voici maintenant cinq ans, conformément à sa trajectoire de précurseur, qu'il concevait avec la société italienne Pramac une mini-éolienne permettant à tout un chacun d'alimenter une bonne partie de l'énergie dont il a besoin ; il s'en est suivi une gamme de mini-éoliennes, dont le prix toutefois en fait un produit de luxe, le projet initial de Philippe Starck étant de parvenir à un niveau de prix accessible. Il faut donner du temps au temps, mais nul doute que de nouveaux projets ont suivi et vont continué de le faire, émanant de précurseurs tels que Philippe Starck, d'autres designers et d'entreprises tournées vers le petit éolien combinant innovation technologique et direction artistique. Les paysagistes de l'agence Sempervirens développent actuellement des fontaines écologiques et des bassins vivants, sources de biodoversité, actionnées par des éoliennes à axe vertical ou bien des éoliennes agricoles en milieu urbain (Dijon, Caen). On peut également citer ici un projet abouti très récemment présenté, allant plus loin encore dans la quête environnementale et écologique, émanant des Compagnons du Devoir. Son concepteur, Philippe Chassalle, saluant les performances des éoliennes, n'en était pas moins choqué par l'utilisation abondante du métal et du plastique ; ce qui l'a amené à un concevoir une éolienne « régionale » dont le support est en robinier (bois issu des forêts d'Aquitaine) et où les pâles ont laissé la place à des voiles s'apparentant à des voiles de bateau.

Ainsi, l'éolien est amené à s'épanouir à la campagne comme à la ville, où il importera qu'il ne donne pas lieu à un développement anarchique, à l'instar des antennes paraboliques, mais s'inscrive dans une approche architecturale et design volontariste, selon un schéma de décentralisation qui peut aller aussi loin que possible puisque l'éolienne pourra être partagée par les habitants d'un immeuble et que l'on pourra disposer de l'une d'entre elles comme on le fait d'un micro-ordinateur. Il va de soi que l'éolien participera dès lors d'une mutation de notre mode de vie incluant une responsabilisation locale et individuelle de sa consommation d'énergie. On peut rapprocher cela de la mutation de l'électricité, dont la vocation était pour Edison d'éclairer la ville de New York et pour Lénine de préparer la révolution, mais qui est aujourd'hui devenue lumière, non seulement vive ou tamisée, mais aux milles aspects et ambiances, et donc avant tout question de design s'agissant de la vie contemporaine. L'éolien est ainsi une culture avant que d'être un moyen, un accompagnement sociétal et non pas un mal nécessaire, qui nous renvoie à la tradition ancestrale des bienfaits du vent dès lors qu'on le canalise.

Cet enjeu sociétal et cette immuable évolution ne peuvent pas se dispenser toutefois d'un problème technique qu'il faut prendre à bras-le-corps afin que la technique soit à leur service plutôt que de briser leur élan : la parité de réseau.

4 La question fondamentale du réseau

Il s'agit bien d'une question cruciale, parce que l'éolien ne pourra pas se développer si elle n'est pas traitée de manière approfondie en amont. Elle dépasse certes la question de l'éolien, mais celui-ci est directement concerné en raison de la variabilité qui le caractérise. Il faut avant toute chose distinguer la question du raccordement de celle du système lui-même. Le raccordement de quelques éoliennes sur les réseaux électriques de transport et de distribution (T&D) pour

une capacité de 10 à 20 MW est un défi technique parfois complexe, mais que RTE et ERDF en regard de leur expertise peuvent facilement résoudre. Il en est autrement pour l'adjonction annuelle d'une puissance de 1000 à 2000 MW, non uniformément répartie sur le réseau, qui peut créer des problèmes locaux pouvant provoquer une panne sévère générale sur le réseau, voire un blackout, hautement redouté. Ainsi l'Espagne et l'Allemagne ont-elles été confrontées à des problèmes substantiels dans le passé, et la Chine a-t-elle pris de face son absence d'anticipation sur le sujet, qui explique largement le vif ralentissement du développement éolien ces deux dernières années. La première réponse à apporter dans un tel cas est l'instauration d'une réglementation relatives aux contraintes associées aux points de raccordement, les *grid codes*, ce qu'ont fait l'Espagne et l'Allemagne parmi de nombreux pays, que la Chine met maintenant en place, mais qui font encore défaut en France. A cela s'ajoute la limite de capacité du réseau de transport français, conçu initialement pour la production centralisée, principalement de type nucléaire et qui requiert quoi qu'il en soit des investissements massifs pour supporter l'accroissement de charge qui représente quelques pourcents chaque année, même si ce rythme décélère en raison du ralentissement de l'activité économique.

En suivant ici l'approche de Jean-Luc Thomas, nous pouvons distinguer différents scénarios et types de systèmes d'interconnexion des fermes éoliennes au réseau.
Le premier, qui a cours aujourd'hui, celui de l'interconnexion directe en courant alternatif (AC Grids), part du principe que le risque d'instabilité du réseau augmente, à l'approche de la limite de capacité de celui-ci, en l'absence de contrainte aux points de raccordement. D'où la mise en place de contraintes spécifiques, les *grid-codes*, ainsi que la nécessité d'une harmonisation européenne.
Ceci doit par ailleurs être accompagné d'une amélioration du lissage de puissance, de l'intégration, de systèmes de stockage, de l'introduction des FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission Systems*) au voisinage des interconnexions entre les fermes éoliennes et le réseau.

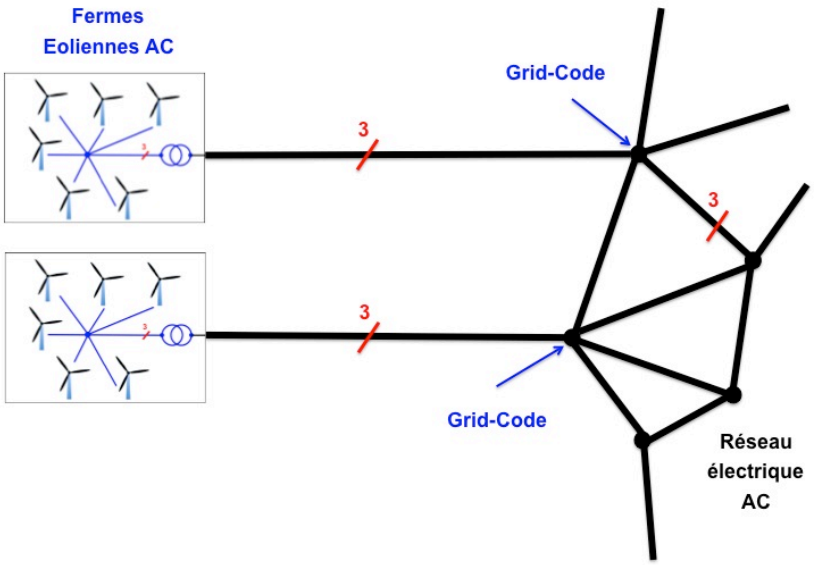


Figure 16
Sources éoliennes AC – Interconnexions directes au réseau à courant alternatif (AC-Grid) sous contraintes de type *grid-codes*

Le développement des réseaux électriques du futur, les *Smart Grids*, à travers une gestion plus intelligente des flux de puissance sur le réseau, est une première approche pour relâcher les contraintes aux points de raccordement des fermes éoliennes.

Mais il ne faut s'en tenir à cela ! L'étape suivante est celle de la solution hybride AC Grids/ DC Grids (courant alternatif / courant continu), permettant d'interconnecter l'éolien, principalement offshore, avec le réseau à courant alternatif par une liaison à courant continu, basée sur les technologies de l'électronique de puissance, appelées systèmes HVDC (High Voltage Direct Current), dont le comportement s'apparente à un pare-feu (firewall) entre le réseau AC et la ferme éolienne.

Il s'agit donc ici d'interconnecter, point à point, par une liaison à courant continu, terrestre ou sous-marine, chaque ferme éolienne de forte puissance au réseau de transport, avec des contraintes de raccordement relâchées.

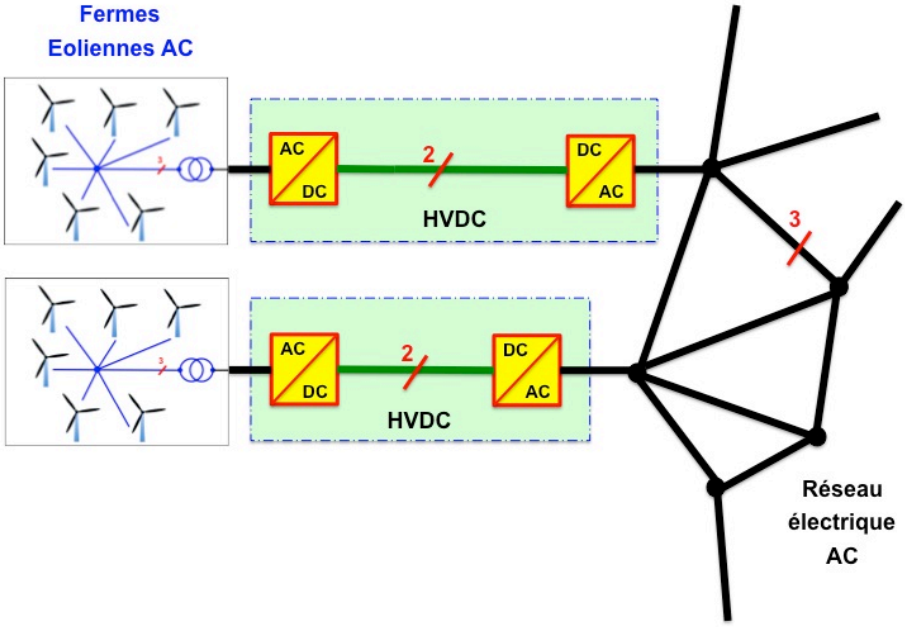


Figure 17
Sources éoliennes AC – Interconnexions au réseau à courant alternatif (AC-Grid) par liaisons à courant continu HVDC de type « point-à-point », terrestres ou sous marines

Les capacités de réseaux à courant alternatif ne sont pas augmentés pour autant. Est ainsi résolu le problème de raccordement à une grande échelle de l'éolien maritime, mais pas celui de l'éolien terrestre.

L'étape suivante, et à notre sens celle qu'il est la plus souhaitable de préparer dès aujourd'hui, consiste à passer aux DC Grids, créant un nouveau réseau à courant continu accompagné de la mise en place de transformateurs DC/DC indispensables et de protections adéquates, en augmentant ainsi la capacité des infrastructures, en planifiant le soutien mutuel des réseaux AC et DC, en effectuant les investissements nécessaires.

L'interconnexion de ces « nouveaux » réseaux à courant continu (DC Grid) avec les sources de production décentralisées, notamment éoliennes, et le réseau historique à courant alternatif (AC Grid) s'effectuera alors à travers des liaisons HVDC « multi-terminaux », appelés MTDC, dont les travaux de R&D sont très actifs actuellement.

En dépit de l'intérêt incontestable du réseau à courant continu (DC-Grid), associé à cette ultime solution, celle-ci est basée sur un nombre significatif de convertisseurs statiques de puissance, MTDC, qui peut s'avérer dans certains cas être incompatible avec les contraintes économiques de certains projets.

Nous pouvons nous poser alors la question, dans ce cas, de l'intérêt de conserver un parc éolien de type source à courant alternatif alors que celui-ci doit être interconnecté à un réseau à courant continu (DC-Grid).
L'ultime étape pourrait donc être de proposer une ferme éolienne dont les aérogénérateurs, *i.e. les turbines*, sont interconnectés directement en courant continu, les générateurs électriques restant naturellement de type à courant alternatif (Figure ci-dessous).

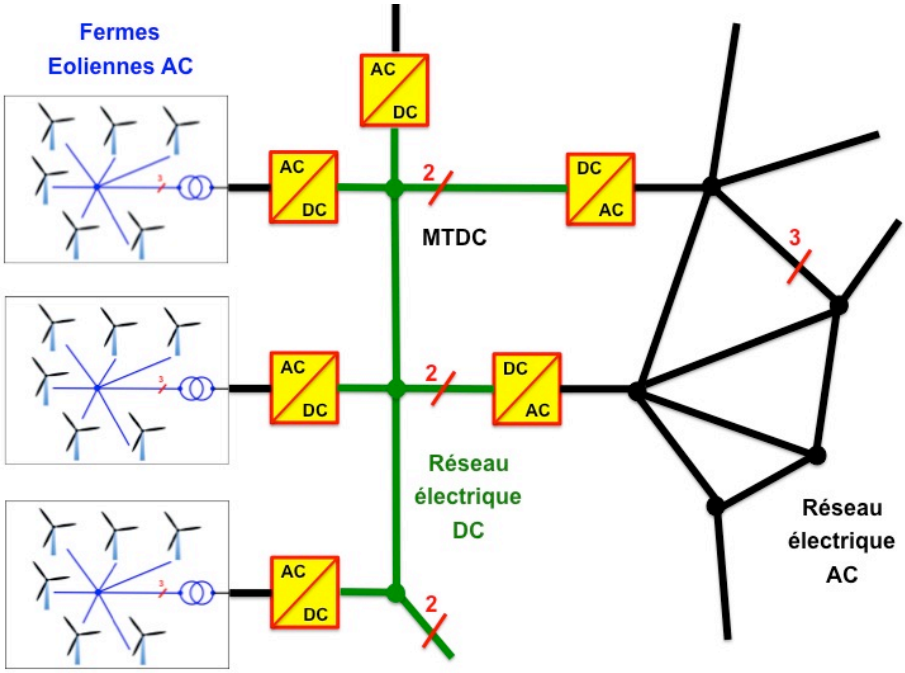


Figure 18

Sources éoliennes AC – Interconnexions au réseau à courant alternatif (AC-Grid) par un réseau à courant continu (DC-Grid) à travers des systèmes MTDC

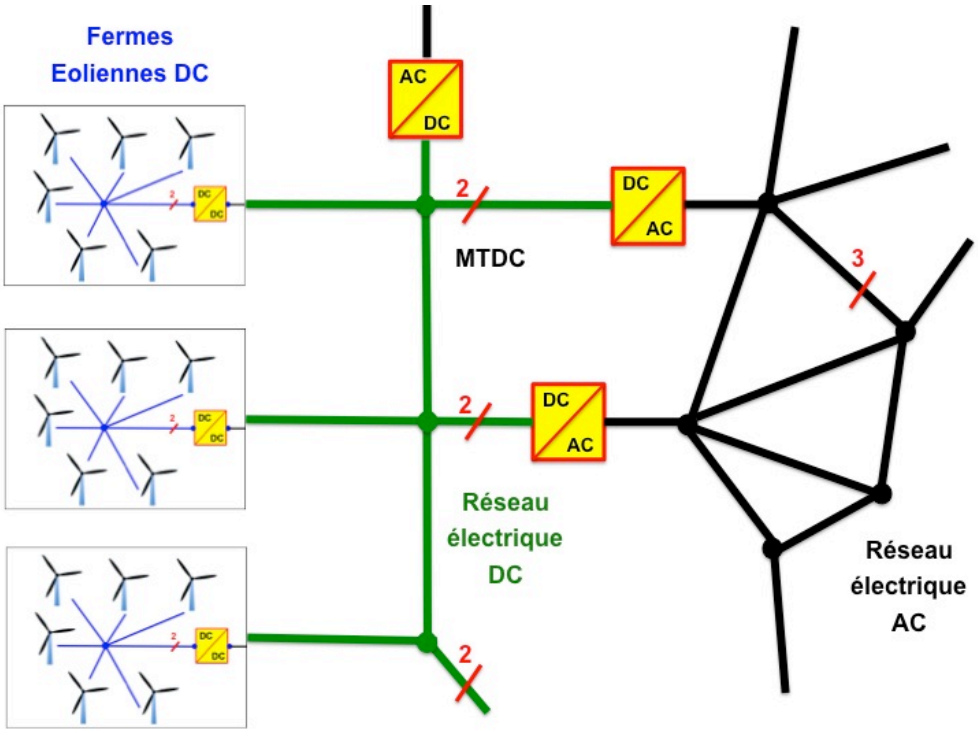


Figure 19
Sources éoliennes DC – Interconnexions au réseau à courant alternatif (AC-Grid) par un réseau à courant continu (DC-Grid) à travers des systèmes MTDC

Ainsi, l'évolution à moyen terme des réseaux électriques vers un grand réseau électrique hybride combinant à la fois des réseaux à courant alternatif et des réseaux à courant continu, intégrant de plus en plus d'électronique de puissance, les convertisseurs MTDC, conduirait à revoir la technologie des parcs éoliens du futur.

Conclusion – Comment combiner au mieux compétitivité, innovation et emploi ?

L'éolien est une énergie à fort potentiel. S'il a déjà fait ses preuves notamment dans les pays où il est particulièrement implanté, son développement durable est aujourd'hui soumis à des incertitudes économiques, juridiques et politiques, qui rentrent en contradiction avec le rôle qui lui est dévolu dans la transition énergétique, tout particulièrement en France.

Il représente une source d'énergie tout à fait compétitive, qui s'inscrit en complément des énergies traditionnelles. C'est déjà le cas pour l'éolien terrestre, ça tendra à l'être pour l'éolien maritime, dont les coûts vont diminuer selon une perspective prometteuse.

Il est également une source considérable d'activité économique et industrielle bénéficiant à la localisation nationale pour des raisons tenant à la nature de l'activité et de la chaîne de valeur du secteur.

Le développement sain de l'éolien repose sur la stabilité des conditions de son développement économique, pour tenir le cap qui lui est imparti dans la transition énergétique. C'est pourquoi celle des tarifs d'achat revêt une importance essentielle, tout en étant éventuellement susceptible d'inclure des primes pour accompagner la transition vers la parité réseau. Le raccourcissement des délais administratifs est également un facteur important contribuant à la stabilité du développement.

Les activités industrielles et de services, génératrices d'emploi, pourront se déployer sous l'égide d'entreprises françaises et européennes car la structure de la chaîne de valeur s'y prête. Cette dimension européenne est à cet égard fondamentale, car ce sont les entreprises de notre continent qui dominent le marché mondial et il importe de faire en sorte que cette situation perdure.

Il apparaît que l'emploi éolien dans un pays est largement fonction de la capacité cumulée installée. Un MW installé « rapporte » de 0,8 à 1,5 emplois – à l'exception du Danemark (2,7) dont l'industrie est puissante et le marché domestique, étroit. Ceci tient, pour une part à l'imbrication de la chaîne de valeur européenne, qui favorise les implantations industrielles à proximité des marchés, et pour une autre part, au fait que le développement et l'exploitation des parcs éoliens, représentant un tiers des emplois directs induits, se prête à l'emploi de proximité. La France est plus proche de la fourchette haute en raison de l'intensité de son tissu industriel. L'emploi français bénéficie largement de l'intégration de la chaîne de valeur européenne.

Un emploi sur trois relève des activités de service liées à l'installation des fermes éoliennes.

Cet emploi induit est très largement national et même en bonne partie local

Les sources d'innovation technologique et non technologique sont par ailleurs multiples, propres à améliorer les conditions de compétitivité comme les nouveaux usages induits par l'éolien.

L'éolien n'est pas seulement une technique, il est aussi une culture, qui laisse une large place au design dans son sens global et qui participe de la vaste transformation économique et sociale que connaît notre société, des points de vue de la prise de conscience écologique, du processus de décentralisation croissant, de la responsabilisation des citoyens, de l'esthétique contemporaine.

Il se situe naturellement à la pointe de cette mutation de grande ampleur, car il combine les aspects prépondérants de ce qui la caractérise. Ceci appelle un changement de paradigme pour tous les acteurs du secteur comme des pouvoirs publics.

Le développement de l'éolien va également de pair avec la transformation des réseaux, où il est loin d'être seule partie prenante, mais qu'il doit accompagner de manière proactive, à travers la gestion de l'intermittence, l'usage des réseaux intelligents, et plus globalement l'aménagement à venir d'un réseau hybride favorable au maritime autant qu'au terrestre, pouvant aller jusqu'à rejaillir sur la transformation des technologies des parcs éoliens du futur.

Enfin, l'éolien est dorénavant en mesure d'occuper dans le paysage contemporain français, notamment institutionnel, la place qui doit lui revenir. Mais il faut pour cela que l'appareil d'Etat et les parties prenantes de la dynamique énergétique et industrielle soient en mesure de se faire mutuellement confiance. C'est pourquoi un pacte privé/public de l'éolien doit être maintenant élaboré, conclu, signé, puis contrôlé dans sa mise en œuvre, afin que soient partagées les informations comme les engagements de court, moyen et long terme, portant sur la recherche et l'innovation, les investissements et l'emploi.

A cette condition, l'éolien pourra s'inscrire harmonieusement dans le cadre de la politique énergétique comme de la politique industrielle françaises et européennes.

Annexes

1. Le débat français sur le coût de l'éolien

La CRE définit le surcoût de l'éolien comme la différence entre le tarif d'achat et une évaluation du coût évité sur le long terme au système électrique ainsi que la contribution des installations à la réalisation d'autres objectifs environnementaux ou économiques par exemple. Le coût complet de production de l'électricité substituée (sans prise en compte des externalités) se situait en 2009 entre 47,3 et 56,1 €/MWh (selon notamment les hypothèses de prix des combustibles fossiles : de 6,5 $/MBtu à 9,5 $/MBtu pour le gaz). S'y ajoutent les coûts externes évités, estimés à 11,2 €/MWh (impacts environnementaux liés à la pollution de l'air et aux émissions de GES). « L'avis de la CRE fait ainsi ressortir l'écart entre le coût évité (intégrant les externalités) pour la collectivité par le développement éolien, compris entre 58,5 et 67,3 €/MWh, et le tarif d'achat fixé par le gouvernement, de 85,6 €/MWh pour l'éolien onshore et de 135,8 €/MWh pour l'éolien offshore », précise le rapport (page 16).

L'Institut Montaigne[26] met en avant un coût de l'éolien encore plus élevé : les auteurs estiment que le surcoût annuel calculé serait égal à 1 milliard d'euros sur la période 2008-2020 et dépasserait les 2,5 milliards au- delà de 2020 », soit 150 €/t CO2 évitée en 2020. Leur calcul du coût de l'éolien prend en compte la différence entre le coût de production (investissement initial, dépenses d'exploitation et de raccordement au réseau) et les bénéfices obtenus (moindre utilisation de gaz et d'uranium, substitution des éoliennes aux centrales thermiques)

Le SER, en 2009, avait mis en avant les résultats d'une étude montrant au contraire les bénéfices pour la collectivité d'une installation de 20 GW de capacité éolienne, se montant à 1,2 milliards par an dès 2020. Plusieurs facteurs n'ayant pas été pris en compte par l'Institut Montaigne contribuent à changer nettement la donne : la dégressivité des coûts d'investissement de l'éolien (2 % par an), la réactualisation des coûts d'adaptation du réseau (jugés surestimés par l'Institut Montaigne), une réévaluation à la hausse du prix des énergies fossiles, une économie de CO2 (prix de la tonne de carbone sur le marché EU ETS – European Union Emission Trading Scheme), et enfin une nouvelle estimation du bénéfice de l'éolien compte tenu de la construction évitée de nouvelles centrales thermiques et nucléaires.

Le CAS n'a pas cherché à trancher entre les positions mais, plus finement, s'est attaché à montrer la sensibilité du calcul des coûts à certaines variables clés : évolution du coût des investissements (€/kW) ; coûts d'adaptation du réseau ; substitution à la production d'énergies thermiques et à la construction de nouvelles centrales ; évolution du prix des énergies fossiles ; coûts de fonctionnement des centrales nucléaires et à gaz ; réduction des émissions de CO2 et

[26] Le Biez Vincent, 2008, «Eoliennes : nouveau souffle ou vent de folie?», Institut Montaigne, Briefing paper.

prix de la tonne de CO2. Voici le tableau de synthèse présentant, fin 2009, la comparaison des hypothèses dans les différentes analyses coûts/bénéfices :
Le CAS en tirait alors les conclusions suivantes :
« Si les chiffres de l'Institut Montaigne sont proches des résultats obtenus pour 2010, ces derniers s'en éloignent par la suite, en raison de la réactualisation de certaines variables, mais surtout de la prise en compte des évolutions de l'investissement, des prix de l'énergie, et de la considération de la vente des quotas de CO2 sur le marché européen. Malgré tout, l'éolien reste un coût pour la collectivité, à hauteur de 148 millions d'euros par an à l'horizon 2020. »[27]

Plus intéressant encore, le calcul de sensibilité de ces résultats à la modification de trois paramètre essentiels : coût d'investissement, recherche des meilleurs emplacements géographiques et prix des énergies fossiles.

Même en tenant compte du fait que ces estimations ont été faites en 2009 avec les chiffres fournis par la Commission Energie de 2007, la comparaison des 4 courbes obtenues (scénario de référence et variation des 3 paramètres) montre la forte sensibilité des résultats à la variation des paramètres et donc la difficulté s'en tenir à une position simple, dans la mesure où il est difficile d'agir sur certains paramètres exogènes (augmentation du prix des énergies fossiles) mais cependant possible de porter plus d'attention à d'autres, comme la localisation de l'implantation des éoliennes. Si le scénario de référence représente un fort surcoût pour la collectivité jusqu'en 2020, il est néanmoins possible d'envisager une situation inverse dans le cas à la fois de progrès technologiques et géophysiques, éléments sur lesquels les acteurs du secteur ont plus de marge de manœuvre que sur l'évolution des prix des énergies fossiles.

[27] Centre d'Analyse Stratégique, 2009, *Le pari de l'éolien*, La documentation française, Paris, p. 21

Tableau n° 2 : Comparaison des hypothèses entre les différentes études coûts/bénéfices

Hypothèses	Institut Montaigne	SER	CAS - Scénario de référence	*Sources CAS*
Investissement en 2008	1 300 €/kW	1 300 €/kW	1 300 €/kW	*Institut Montaigne*
Investissement en 2020	1 300 €/kW	960 €/kW	1 020 €/kW	*2 % de réduction des coûts d'investissement par an*
Taux d'actualisation	8 %	8 %	8 %	*Institut Montaigne*
Durée de vie	20 ans	20 ans	20 ans	*Institut Montaigne/ EWEA*
O&M* (pourcentage de l'investissement initial)	2,3 %	2,3 %	2,3 %	*Institut Montaigne*
Coût d'adaptation du réseau	3 milliards	0	1 milliard	*RTE*
Heures de fonctionnement	2 100 h	2 100 h	2 100 h	*Hypothèse CAS*
Substitution à la construction de centrales thermiques	20 %	20 %	25 %	*RTE*
Économies d'énergie : substitution aux *inputs* des centrales thermiques	1/3 nucléaire, 2/3 thermique	1/3 nucléaire, 2/3 thermique	21 % exportations, 17 % nucléaire, 54 % de gaz et 8 % de charbon	*Hypothèse CAS d'après le bilan RTE 2008*
Prise en compte de l'évolution du prix des énergies fossiles	Non	Non mais réévaluation des prix	Prix du gaz en 2008 : 6,5 $05/MBtu en 2020 : 7,9 $05/MBtu	*Commission européenne*
Coût de fonctionnement d'une centrale nucléaire	11 €/MWh	12 €/MWh	28,4 €/MWh	*DGEMP, 2004*
Coût de fonctionnement d'une centrale gaz	50 €/MWh	75 €/MWh	Achat d'énergies fossiles (rendement de centrale de 0,5)	*Hypothèse CAS d'après bilan RTE*
Réduction des émissions de CO_2 (tCO_2 évitée par MWh éolien)	Non pris en compte	0,3 t/MWh d'éolien	0,28 t/MWh	*Hypothèse CAS d'après bilan RTE*
Prix de la tonne de CO_2 en 2020	Non pris en compte	40 €/t	56 €/t	*Commission Quinet*

(*) O&M : opération et maintenance. *Source : Centre d'analyse stratégique*

Le CAS en tirait alors les conclusions suivantes :
« Si les chiffres de l'Institut Montaigne sont proches des résultats obtenus pour 2010, ces derniers s'en éloignent par la suite, en raison de la réactualisation de certaines variables, mais surtout de la prise en compte des évolutions de l'investissement, des prix de l'énergie, et de la considération de la vente des quotas de CO2 sur le marché européen. Malgré tout, l'éolien reste un coût pour la collectivité, à hauteur de 148 millions d'euros par an à l'horizon 2020. »[28]

Plus intéressant encore, le calcul de sensibilité de ces résultats à la modification de trois paramètre essentiels : coût d'investissement, recherche des meilleurs emplacements géographiques et prix des énergies fossiles.

[28] Centre d'Analyse Stratégique, *Le Pari de l'éolien*, 2009, page 21

Tableau n° 4 : Les scénarios alternatifs, étude de sensibilité

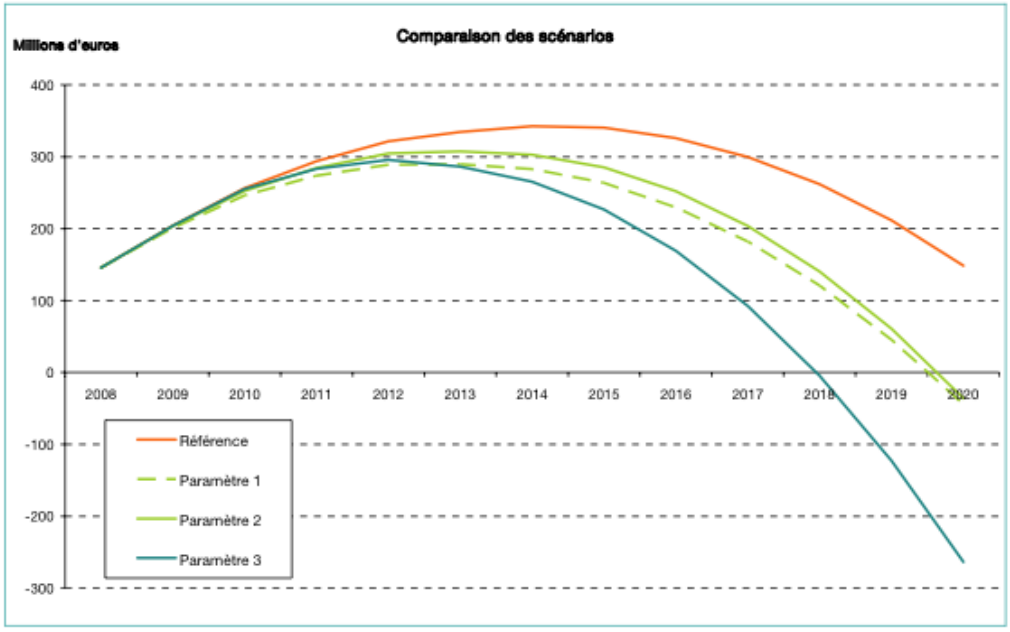
	Leviers	Variables	Scénario de référence	Scénarios alternatifs	*Sources*
Paramètre 1	Amélioration de la technologie	Coût d'investissement	1 020 €/kW en 2020	826 €/kW en 2020	*Commission européenne*
Paramètre 2	Recherche d'une optimisation des potentiels de vent	Heures de fonctionnement	2 100 h en 2020	2 300 h en 2020	*CAS*
Paramètre 3	Augmentation du prix des énergies fossiles	Prix du gaz	7,9 $/MBtu	11 $/MBtu	*Commission Énergie*
		Prix du charbon	72 $/t	90 $/t	
		Prix du pétrole	60 $/bep	125 $/bep	*CAS : régression*
		Prix de l'électricité	62 €/MWh	82 €/MWh	

Source : Centre d'analyse stratégique

Le premier paramètre met l'accent sur la recherche dans les technologies du vent, en s'appuyant sur les coûts envisagés par la Commission européenne pour 2020. Le deuxième illustre la problématique du choix de leur localisation, indiquant qu'une politique d'implantation rationnelle permettrait d'augmenter le temps de fonctionnement des éoliennes, dans le cas où elles seraient situées dans un régime de vent convenable. Le troisième quantifie l'impact du prix des énergies fossiles sur la rentabilité de l'énergie. Les valeurs retenues sont issues de l'exercice prospectif de la

Même en tenant compte du fait que ces estimations ont été faites en 2009 avec les chiffres fournis par la Commission Energie de 2007, la comparaison des 4 courbes obtenues (scénario de référence et variation des 3 paramètres) montre la forte sensibilité des résultats à la variation des paramètres et donc la difficulté s'en tenir à une position simple, dans la mesure où il est difficile d'agir sur certains paramètres exogènes (augmentation du prix des énergies fossiles) mais cependant possible de porter plus d'attention à d'autres, comme la localisation de l'implantation des éoliennes. Si le scénario de référence représente un fort surcoût pour la collectivité jusqu'en 2020, il est néanmoins possible d'envisager une situation inverse dans le cas à la fois de progrès technologiques et géophysiques, éléments sur lesquels les acteurs du secteur ont plus de marge de manœuvre que sur l'évolution des prix des énergies fossibles.

Graphique n° 1 : Impact de la variation de certains paramètres sur le coût complet pour la collectivité de 19 GW de capacités éoliennes *onshore* en millions d'euros



Source : Centre d'analyse stratégique

2 Bibliographie

Rapports institutionnels et documents de synthèse publics

Académie des Technologies Commission Energie et changement climatique : 10 questions à Gilbert Ruelle sur l'éolien, une énergie XXIè siècle ? – 9 juillet 2008

ADEME (2012) « Maîtrise de l'énergie et développement des énergies renouvelables : état des lieux des marchés et des emplois» *Stratégie & études*, n°34, 21 novembre.

ADEME (2010) «Marchés, emplois et enjeu énergétique des activités liées à l'amélioration de l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables : situation 2008-2009 – perspectives 2010» , Direction exécutive de la stratégie et de la recherche, octobre 2010

Cour des Comptes, 2012, *Les coûts de la filière électronucléaire*, Rapport public thématique

Centre d'Analyse Stratégique, 2009, *Le pari de l'éolien*, La documentation française, Paris.

Centre d'Analyse Stratégique (Groupe de travail présidé par Jacques Percebois), 2012, *Rapport énergies 2050*, Paris.

CEPOS (Center for Polistiske Studier), 2009, *Wind energy, the case of Danemark*. http://www.cepos.dk/fileadmin/user_upload/Arkiv/PDF/Wind_energy_-_the_case_of_Denmark.pdf

CEESA (Coherent Energy and Environmental System Analysis) Research project, 2010, *Danish wind power export and cost,* Department of Development and Planning, Aalborg University. http://www.windpower.org/download/541/DanishWindPower_Export_and_Cost.pdf

Commissariat Général au Développement Durable, 2012, « Chiffres clés de l'énergie : Edition 2012 », Paris.

EWEA, 2013, *Eastern winds : Emerging European wind power market*, Bruxelles.

EWEA, 2013, *Wind in power : 2012 European statistics*, Bruxelles.

EWEA, 2012, *Green growth : The impact of the wind energy on jobs and the economy*, Bruxelles.

EWEA, 2012, *Creating the Internal Energy Market*, Bruxelles.

EWEA, 2012, *The European Wind Initiative : Wind power research and development to 2020*, Bruxelles.

Gay, Aurélien et Glita, Marc « Réseaux et subventions : les coûts cachés de l'électricité issue d'énergies intermittentes» *Gazette de la société et des techniques*, n°69, novembre 2012

GWEC, 2011, *Annual market update*, Bruxelles.

IRENA & GWEC, 2012, *30 years of policies for wind energy*.

Le Biez Vincent, 2008, «Eoliennes : nouveau souffle ou vent de folie?», Institut Montaigne, Briefing paper.

Le Biez Vincent, 2008,, «Pour rétablir la vérité sur le coût de l'éolien», Institut Montaigne, Briefing paper.

Lascaud S., 2011, «Accumulateurs/piles à combustibles, applications réseaux », EDF R&D, http://www.college-de-france.fr/media/jean-marie-tarascon/UPL44315_Lascaud.pdf

Quirion P. et Demailly P. (2008) *-30% de CO_2 = + 684 000 emplois. L'équation gagnante pour la France.* Etude WWF France

Sénat, 2011, « Energies alternatives : gestion de l'intermittence et maturité des technologies », *Comptes rendus de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, Paris.

Syndicat des Energies Renouvelables, 2012, *Le livre blanc des énergies renouvelables*, Paris.

Wind4Future, 2013, « Entretien avec Emmanuel Schuddinck », http://www.windforfuture.com/

Articles de recherche

Åstrand, K., et L. Neij. 2006. « An assessment of governmental wind power programmes in Sweden—using a systems approach ». *Energy Policy* 34(3):277□296.

Garud, Raghu, et Peter Karnøe. 2003. « Bricolage versus breakthrough: distributed and embedded agency in technology entrepreneurship ». *Research Policy* 32(2):277□300.

Le, Ngoc Anh, et Subhes C. Bhattacharyya. 2011. « Integration of wind power into the British system in 2020 ». *Energy* 36(10):5975□5983.

Lewis, Joanna I., et Ryan H. Wiser. 2007. « Fostering a renewable energy technology industry: An international comparison of wind industry policy support mechanisms ». *Energy Policy* 35(3):1844□1857.

Kirkegaard, J. F., T. Hanemann et L. Weischer (2009) « It should be a breeze: Harnessing the potential of open trade and investment flows in the wind industry energy » *Working paper series*, World Resources Institute, Peterson Institute for International Economics, Washington

Mendonça, Miguel, Stephen Lacey, et Frede Hvelplund. 2009. « Stability, participation and transparency in renewable energy policy: Lessons from Denmark and the United States ». *Policy and Society* 27(4):379□398.

Meyer, Niels I. 2007. « Learning from wind energy policy in the EU: lessons from Denmark, Sweden and Spain ». *European Environment* 17(5):347–362.

Pettersson, Maria, Kristina Ek, Kristina Söderholm, et Patrik Söderholm. 2010. « Wind power planning and permitting: Comparative perspectives from the Nordic countries ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(9):3116□3123.

Söderholm, Patrik, Kristina Ek, et Maria Pettersson. 2007. « Wind power development in Sweden: Global policies and local obstacles ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11(3):365–400.

Söderholm, Patrik, et Maria Pettersson. 2011. « Offshore wind power policy and planning in Sweden ». *Energy Policy* 39(2):518□525.

Weitzman, Martin L. 1974. « Prices vs. Quantities ». *The Review of Economic Studies* 41(4):477□491.

Sites internet

Organisations, institutions publiques et think-tanks spécialisés dans l'énergie

www.ademe.fr

www.caissedesdepots.fr
www.connaissancedesenergies.org
www.cre.fr
www.developpement-durable.gouv.fr
www.enr.fr
www.ewea.org
www.ewea.org
www.fee.asso.fr
www.gwec.net
www.iea.org
http://www.navigantresearch.com/
www.rte-france.com
http://www.canalacademie.com/IMG/pdf/Academie-technologie-eolien-gilbert-ruelle.pdf

Sites de presse généraliste et spécialisée

www.enerzine.com
www.actu-environnement.com/