

L'industrie éolienne française

Par Alain LIGER*

Présente en France depuis les années 1990, la production d'énergie électrique par la force du vent représentait une puissance raccordée de 6 750 MW à la fin 2011.

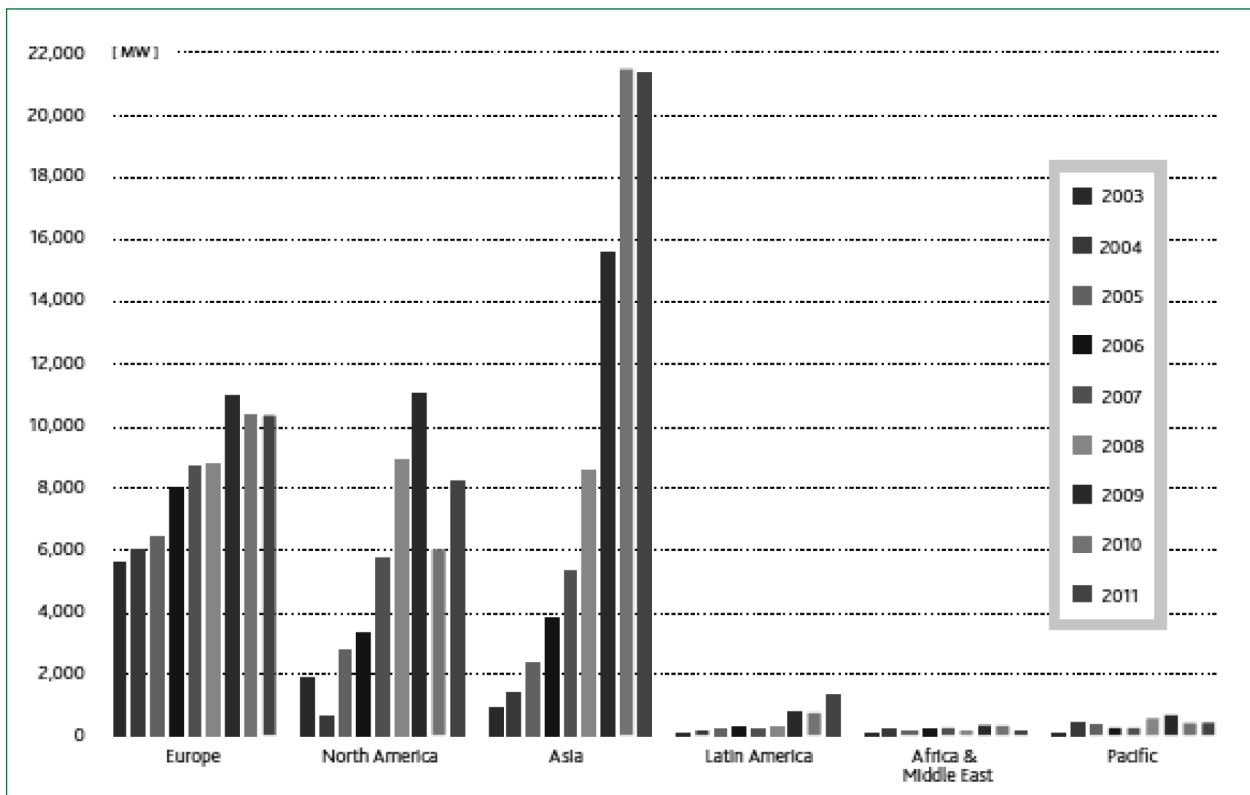
Si l'essentiel des mises en service récentes et du parc total de machines est le fait de constructeurs étrangers, l'industrie française a été, ces dernières années, présente sur le marché ; en effet, des PME françaises y occupent des marchés de niche, et par ailleurs, l'industrie européenne incorpore de nombreux composants français ; enfin, deux grandes entreprises françaises ont pris récemment des positions industrielles de niveau européen.

À ce titre, le développement actuel de l'éolien *offshore* représente pour les entreprises françaises une réelle opportunité stratégique, d'autant plus que la France, outre le fait qu'elle bénéficie de conditions géographiques favorables à l'implantation de tels parcs, dispose à travers son industrie parapétrolière d'un véritable savoir-faire en matière de travaux en mer.

Un très fort développement de l'éolien dans le monde entier...

La production d'énergie électrique par la force du vent fait l'objet dans un grand nombre de pays d'investissements en forte croissance tirés par les besoins énergétiques du développement, le besoin de diversification par rapport aux sources fossiles et nucléaire, la préoccupation de la réduction des émissions de CO₂ et le progrès technolo-

gique, qui rend l'équipement toujours plus performant. Ce mouvement est largement distribué : il existe des centrales éoliennes dans 75 pays, dont 22 disposent d'une puissance installée supérieure à 1 GW ; le mouvement lancé dans des pays développés de l'OCDE s'est élargi, et ce sont les investissements en Asie (en particulier en Chine, qui est le plus gros marché) qui tirent désormais la croissance mondiale de la capacité de production et du marché industriel afférent.



Graphique 1 : Capacités installées par zones géographiques sur la période 2003-2011.
Source : Global Wind Energy Council, statistics 2011.

En 2011, une puissance de 41 GW d'électricité éolienne a été installée dans le monde et la puissance installée cumulée totale atteindrait 238 GW (fin d'année 2011) ; l'investissement correspondant est évalué à environ 50 milliards d'euros et est en même temps un marché pour l'ensemble des acteurs de la chaîne des fournisseurs.

Comme pour les autres productions intermittentes, les chiffres de puissance installée cités ci-dessus ne peuvent être comparés directement aux puissances installées des modes de production capables de satisfaire les besoins des consommateurs à tout moment, comme la plupart des centrales thermiques ou l'hydraulique au fil de l'eau ; les producteurs permanents ont une puissance disponible équivalant pratiquement à 8 000 heures par an. La puissance des installations éoliennes en France est disponible pendant 2 000 à 2 500 heures de fonctionnement par an (une disponibilité plus proche des 4 000 heures pour les installations en mer). Les puissances installées doivent être lues à l'aune de cette disponibilité ; la capacité installée de 40 GW ne doit donc pas être comparée à 100 turbines à gaz d'une puissance de 0,4 GW chacune, mais sa production effective est probablement beaucoup plus proche de celle de 30 turbines à gaz.

Par ailleurs, dans la plupart des pays concernés, le développement de l'industrie éolienne est largement conditionné par des réglementations permettant à l'électricité produite par les champs éoliens d'accéder aux réseaux collectifs de transport et de distribution d'électricité à un tarif favorable (*feed-in tariffs*).

... y compris en France

Présente en France depuis les années 1990 à petite échelle, la production d'énergie électrique par la force du vent est une réalité d'une plus grande ampleur depuis une décennie. Les sources disponibles donnent des chiffres légèrement différents, mais cohérents dans leur ensemble. La puissance éolienne raccordée était de 6 750 MW fin 2011

(le graphique 2 ci-dessous illustre la progression de la puissance installée et celle du nombre des machines).

Cependant, les mises en production en 2012 seront bien inférieures à celles des années précédentes. Elles devraient être de l'ordre de 650 MW. Un débat juridique (non conclusif à ce jour) sur le caractère d'aide d'Etat de la Contribution au Service Public de l'Electricité (CSPE) qui, par le biais d'un tarif d'achat d'origine législative et réglementaire, amène les consommateurs à financer les surcoûts de l'énergie éolienne (comme ceux des autres énergies électriques renouvelables) a en effet démobilisé promoteurs et sources de financement en introduisant une incertitude temporaire dans les conditions financières de fonctionnement des sites.

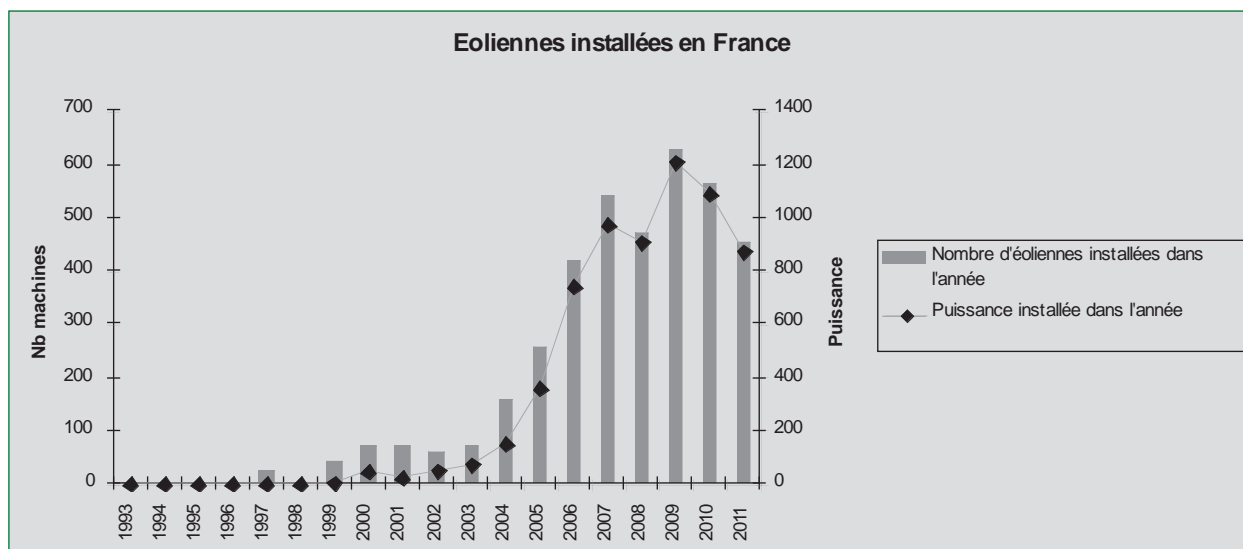
Le nombre des sites de production (parcs éoliens ou fermes éoliennes) était en France de l'ordre de 650 à la fin de l'année 2011. Les sites sont plutôt de petite taille, avec un très grand nombre de sites comprenant entre 3 et 7 machines (comme le montre le graphique 3 de la page suivante) ; des producteurs d'électricité français ou étrangers détiennent et opèrent les sites comportant plus de 20 éoliennes et une partie des sites plus petits.

Un marché sur lequel les constructeurs européens sont très présents...

Au niveau mondial, les constructeurs chinois, très présents sur leur marché national qui enregistre une croissance forte, sont au nombre de quatre parmi les dix premiers mondiaux (voir le tableau 1 de la page suivante) :

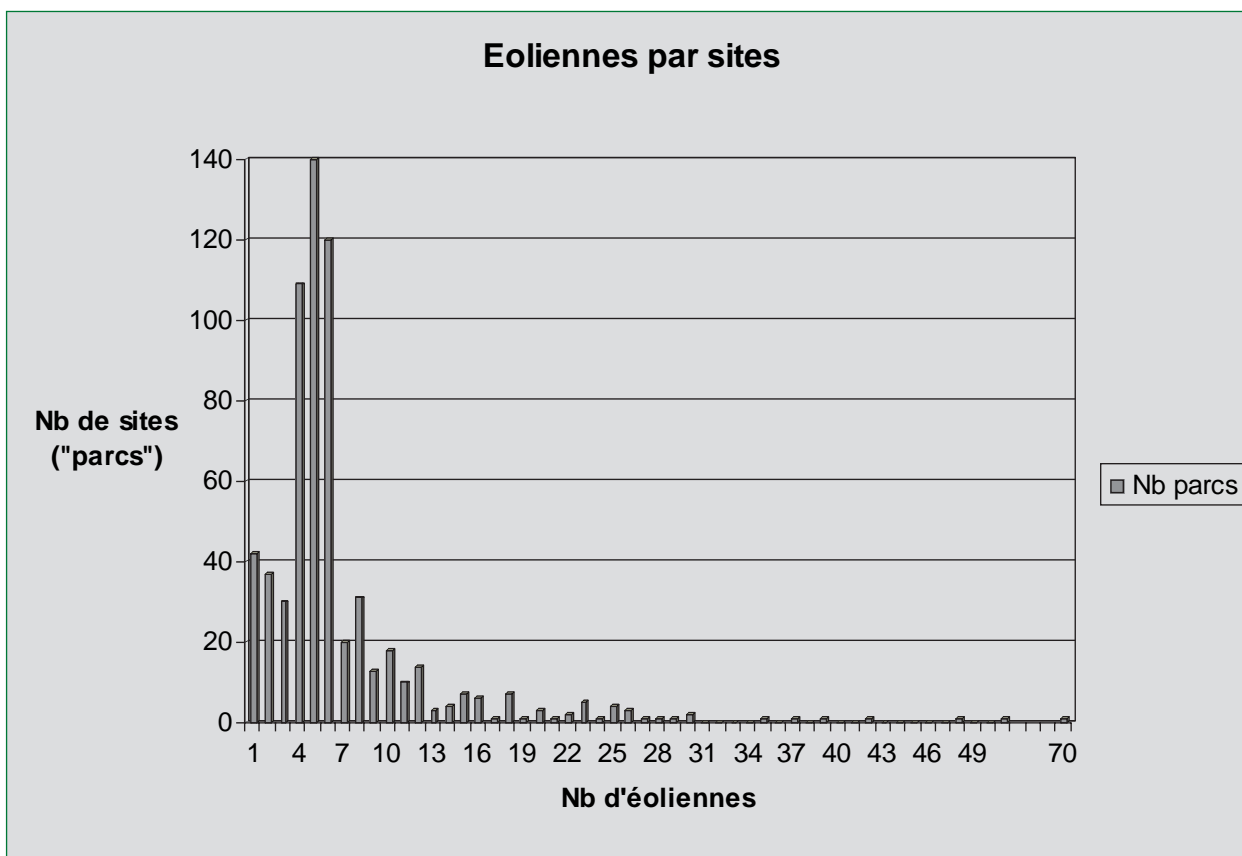
Un nombre réduit de constructeurs contribuent de manière significative à l'installation de nouvelles capacités de production en France (voir le tableau 2 de la page 113) :

Les trois premiers fournisseurs, Enercon, REpower et Vestas, dominent massivement le marché français, avec plus des trois quarts des éoliennes raccordées, et quelques autres fournisseurs étrangers s'y ajoutent. L'essentiel des mises en service récentes et du parc total de machines est donc le fait de constructeurs étrangers.



Graphique 2 : Eoliennes installées en France.

Source : auteur, d'après statistiques IFEN et SER.



Graphique 3 : Nombre d'éoliennes par sites.

Source : auteur d'après la base de données « thewindpower.net ».

Constructeur	Pays d'origine	% des installations mondiales en 2011
Vestas	Danemark	12,7 %
Sinovel	Chine	9,0 %
Goldwind	Chine	8,7 %
Gamesa	Espagne	8,0 %
Enercon	Allemagne	7,8 %
GE Wind Energy	Etats-Unis	7,7 %
Suzlon Group : comprend Suzlon Energy (India) et REpower (Allemagne)	Inde	7,6 %
Guodian United Power	Chine	7,4 %
Siemens	Allemagne	6,3 %
Ming Yang	Chine	3,6 %

Tableau 1.

Source : IHS Inc - Information Handling Services.

La production d'énergie électrique éolienne est soutenue depuis son lancement par des tarifs d'achat avantageux qui ont permis et permettent encore d'assurer la viabilité économique de la plupart des projets et donc d'alimenter le carnet de commandes des fabricants et des sous-traitants. Dans ce contexte, la domination du marché européen décrite ci-dessus est largement due au dynamisme entrepreneurial. Des chefs d'entreprise ont en effet orienté vers de nou-

velles activités des entreprises de secteurs variés comme la métallurgie (cas de Nordex), la mécanique agricole (cas de Vestas), l'aéronautique (cas de Gamesa), l'énergie (cas de REpower), ou ont créé des *start-up* spécialisées (comme par exemple Enercon) (voir le tableau 2 de la page suivante). Ces décisions entrepreneuriales ont été prises dans les années 1990-2000 à une époque où le climat général allemand, danois ou espagnol rendait le développement de la

Constructeurs	Siège social	Puissance installée en 2010 (MW)	Puissance raccordée en 2011 (MW)	Puissance raccordée Total au 31 décembre 2011 (MW)
Enercon	Allemagne	400	284	1 693
REpower	Allemagne	246	212	1 298
Vestas	Danemark	230	241	1 366
Nordex	Allemagne	130	78	1 017
Alstom	France	63	33	253
Gamesa	Espagne	42	39	664
Siemens	Allemagne	23	23	275
GE Energy	Etats-Unis	18	45	218
Vergnet	France		0	82
Autres				227
Total		1 152	955	7 092

Tableau 2.

Source : France Energie Eolienne.

production éolienne crédible – qu'il s'agisse du cadre réglementaire ou des objectifs assignés à la part de l'éolien dans le *mix* énergétique national. Au fur et à mesure de leur développement, certains de ces industriels ont ensuite essayé en construisant des usines ailleurs que dans leur pays d'origine.

Comme dans toute industrie, il existe des fusions-acquisitions et d'autres mouvements capitalistiques, qui relativisent la notion de « nationalité » des sociétés. Par exemple, depuis son rachat par le groupe indien Suzlon, en 2008, l'« allemand » REpower est devenu « indien » ; Alstom a développé sa présence sur ce segment de marché assez récemment par croissance externe en achetant en 2007 la société espagnole Ecotècnia ; AREVA (qui ne figure pas dans la liste ci-dessus) a eu une stratégie analogue en 2010 avec l'acquisition de la société allemande Multibrid.

La localisation du siège social n'emporte pas donc pas celle de toute la production. Cependant, aucun des grands constructeurs dominant le marché français ne dispose actuellement d'une usine de montage en France.

... mais avec une petite composante de l'industrie française

À l'époque du développement de l'industrie éolienne en Europe, aucun industriel français justifiant de compétences en mécanique, en électricité, etc. de même nature que les sociétés citées ci-dessus, n'a engagé une évolution similaire. Pour autant, la compétence est disponible en France ; l'industrie de fabrication des turbines et de nacelles d'éoliennes à terre repose en effet largement sur des compétences en mécanique, en électricité et en électronique bien présentes en France. Cependant, aucun entrepreneur français n'a encore réussi un développement d'envergure, à la différence de fabricants d'autres pays européens désormais

solidement implantés sur le marché. Mis à part la niche que représentent les éoliennes rabattables pour les pays soumis au risque de cyclones, le développement d'une machine française ne semble pas pouvoir reposer sur une originalité technique permettant de « faire la différence » sur le marché européen.

L'absence d'unité significative de construction d'éoliennes en France ne signifie pas pour autant que l'industrie française soit totalement absente du marché ni que les machines ne comportent pas de composants français.

Parmi les fabricants d'éoliennes, nous avons cité les acquisitions relativement récentes de fabricants espagnol et allemand respectivement par Alstom et AREVA. Il existe également deux fabricants de plus petite taille sur le marché de niche précité, les groupes Vergnet et Alizéo (ce dernier étant de création très récente) qui ont développé des éoliennes adaptées aux zones cycloniques (des zones où les éoliennes de grandes dimensions risquent d'être détruites par des vents violents). Ils complètent leur gamme d'éoliennes anticycloniques par des capacités de prévision de la production et des solutions de stockage de l'électricité indispensables aux gestionnaires de réseaux non interconnectés.

Ces deux fabricants français sont sur des niches technologiques très voisines et font face tous les deux à des difficultés dues notamment aux retards pris dans les appels à projets. Le marché de l'outre-mer français, qui ne leur est pas réservé, constitue une vitrine technologique de l'éolien rabattable pour zones cycloniques. Le marché potentiel est important puisque plus de cent pays et entre 1,5 et 2 milliards d'individus sont situés dans ces zones cycloniques. Le nucléaire y est peu présent, voire inexistant, les réseaux électriques y sont instables ou isolés, et la forte croissance de la demande d'énergie y est principalement couverte par le pétrole et le charbon. Toutefois, Vestas a installé plus de 250 MW d'éoliennes non rabattables dans les Caraïbes, soit

environ 7 fois plus que Vergnet, dans cette même zone. L'enjeu technologique reste donc à développer.

Par ailleurs, les capacités industrielles françaises fournissent les producteurs d'éoliennes, lesquelles comportent donc des composants français ; ces entreprises françaises contribuent à de la sous-traitance de rang 1 ou 2 avec des acteurs comme Converteam, récemment acheté par General Electric (équipement électrique), Rollix Defontaine (couronnes d'orientation), Leroy Somer, détenu par l'Américain Emerson (génératrices), Schneider-Electric (génie électrique), etc.

Enfin, pour le montage sur site et le raccordement électrique, les constructeurs ont habituellement recours aux capacités locales et un certain nombre d'entre elles sous-traitent localement une partie de la fabrication de certains sous-ensembles, par exemple, les mâts des éoliennes.

Au total, France Energie Éolienne identifie environ 150 équipementiers impliqués à des degrés divers avec les fournisseurs étrangers.

Le développement actuel de l'éolien *offshore* représente pour les entreprises françaises une opportunité stratégique. Avec le deuxième gisement éolien en Europe et plus de 3 500 km de côtes, la France bénéficie de conditions géographiques favorables pour l'implantation de parcs éoliens *offshore*. En outre, la France dispose d'un savoir-faire certain dans les travaux en mer avec son industrie parapétrolière et bénéficie d'infrastructures portuaires et de chantiers navals propres à la construction de machines de grande taille.

La méthode adoptée pour la création de parcs éoliens marins, en particulier l'introduction de critères de développement économique local et de développement industriel, devrait permettre la réalisation de premiers investissements. Elle a déjà amené Alstom à décider d'implanter des usines d'assemblage de nacelles et de fabrication d'alternateurs à Saint-Nazaire, des usines de production de pales et de fabrication de mâts à Cherbourg, ainsi qu'un centre d'ingénierie et de R&D dédié. Elle pourrait aussi amener des fabricants étrangers à investir en France et à essayer hors de leur pays d'origine dans des usines installées en France, comme ils l'ont déjà fait avec d'autres pays.

Il ne s'agit pas pour autant de simplement copier les fabricants existants. Les côtes françaises présentent des spécificités (comme une profondeur plus grande que celle de la Mer du Nord) qui devraient permettre des investissements dans des technologies nouvelles ; comme l'éolien flottant, qui est encore aujourd'hui une niche sur le marché de l'*offshore*, et dont les coûts restent élevés, est l'une de ces technologies en devenir ; on y note deux projets français d'éoliennes flottantes, Nenuphar Wind et Winflo, qui ont été sélectionnés par le Commissariat général aux Investissements.

Des difficultés d'acceptation par le grand public ont entraîné une forte réglementation

Les fermes éoliennes font l'objet d'oppositions parfois virulentes. Le législateur a pourtant mis en place une régle-

mentation très complète pour débattre des projets et limiter les impacts paysagers, les effets sur la biosphère et les risques industriels en interdisant certains types de localisation et en exigeant des études sérieuses pour les sites possibles pour une implantation. Les études et les processus d'autorisation qui sont nécessaires à la réalisation d'un projet éolien peuvent de ce fait durer plusieurs années. Sur un plan plus général, l'industrie investit en recherche et développement sur certaines de ces problématiques pour faire progresser la capacité de traiter les impacts.

Le développement de la réglementation a pu améliorer la qualité des études et de la localisation des sites éoliens. Mais il n'est pas certain que le renforcement des procédures ait amélioré l'acceptation des sites. Pourtant celle-ci est une condition du développement de l'électricité éolienne en France, et de l'industrie associée.

Des développements technologiques dans de nombreux domaines...

Au niveau mondial, les tendances principales du développement du marché des turbines, qui ont amené une baisse du coût d'investissement par kW, et donc du coût du kWh produit, sont :

- ✓ la course à la taille et à la hauteur. La puissance des machines est ainsi passée d'environ 200 kW dans les années 1990 à 1 MW au début des années 2000 pour atteindre aujourd'hui 2,5 MW pour des installations terrestres, et de 5 ou 6 MW pour des installations marines ;
- ✓ l'efficacité de la production de la turbine, ainsi que la productivité des autres éléments.

La R&D porte actuellement sur des prototypes de 10 à 20 MW et des pales de plus de 100 mètres de longueur. Les autres aspects de la recherche concernent les conditions extrêmes (vents faibles, climats extrêmes), la réduction du poids et la réduction des coûts de fonctionnement. Pour l'éolien *offshore*, des progrès sont attendus sur la fiabilité des turbines et sur leur installation afin de réduire les coûts de mise en place et de maintenance.

Un champ de recherche important porte sur la relation entre les éoliennes et les radars (de la météorologie ou de la circulation aérienne) dont la présence est l'une des limites à l'implantation géographique des éoliennes. Il s'agit, d'une part, d'évaluer plus précisément les perturbations occasionnées aux échos radars par les éoliennes et, d'autre part, de concevoir des pales furtives ne causant pas d'interférences avec les radars, en s'inspirant des technologies militaires.

Enfin, l'éolien flottant semble ouvrir de vastes perspectives énergétiques puisqu'il permettrait un plus grand développement de la production *offshore*. Cependant, les conditions climatiques et d'implantation conditionnent l'avenir de ces technologies à la levée d'importants verrous similaires à ceux qu'a connus l'industrie pétrolière. Les principaux défis à relever sont l'autonomie de fonctionnement (en limitant le besoin d'accéder aux éoliennes pour leur maintenance), la réduction des coûts, la géométrie des pales et l'acheminement de l'électricité sur le continent.

De nombreuses compétences françaises contribuent à la capacité d'innovation de l'industrie et de compétitivité des entreprises françaises ; elles cherchent à conforter les entreprises françaises sur leurs points forts (par exemple, les éoliennes dédiées aux zones cycloniques) et à combler les vides dans la chaîne de valeur (pales d'éolienne, turbines *onshore* de nouvelle génération,...). Il s'agit essentiellement des pôles de compétitivité Pôle Mer Bretagne et Pôle Mer PACA (deux pôles à vocation mondiale), de l'Institut d'Excellence en Energie Décarbonée (IEED) « France Energies Marines » (à Brest), ainsi que des pôles de rayonnement national Derbi, Cap énergie et S2E2.

Au-delà des thèmes spécifiques de l'industrie éolienne, le caractère intermittent de l'énergie éolienne et son déploiement posent, avec acuité, d'autres problématiques de recherche, de développement et d'industrie. Il s'agit essentiellement du stockage d'électricité, de la gestion à distance de l'acheminement et de la consommation (par exemple, grâce aux *smart grids*, ces réseaux électriques couplés à une circulation d'information et de communication), ou encore des outils de prévision de la production des énergies intermittentes (des outils cruciaux pour les gestionnaires de réseaux).

De fait, les énergies intermittentes fatales apportent des contraintes nouvelles liées à la variabilité de leur production et à sa faible prévisibilité. Plus la variabilité augmente et plus le réseau doit disposer de moyens de production complémentaires permettant de pallier ces

intermittences. Les énergies fatales n'économisent dès lors pas le besoin d'investissement dans des installations à puissance garantie pour compenser leurs variations de production et garantir l'alimentation des clients. Les contraintes liées à la variabilité des puissances injectées sur le réseau peuvent être gérées si elles sont anticipées grâce aux prévisions de production – qui sont donc également un enjeu important. Aujourd'hui, le niveau moyen d'erreur est inférieur à 4 % en Espagne et en Allemagne, ce qui permet par exemple au gestionnaire du réseau espagnol de gérer des taux de pénétration supérieurs à 30 % (et allant parfois jusqu'à 60 %).

... pour améliorer une économie très capitalistique....

Le coût d'1 MW éolien installé à terre s'élève, en moyenne, à 1,6 million d'euros, soit environ 3,2 millions d'euros pour une éolienne de 2 MW. Ce prix peut, bien entendu, varier quelque peu en fonction de circonstances locales et du nombre de machines dans un parc (les grands parcs permettant des économies d'échelle). En mer, les sources disponibles citent un montant allant de 2 à 2,2 M€ par MW installé pour les fermes éoliennes *offshore* dans les conditions techniques les plus faciles (installation pas trop loin de la côte, en eaux peu profondes).

La structure des coûts d'un projet éolien peut être résumée comme suit :

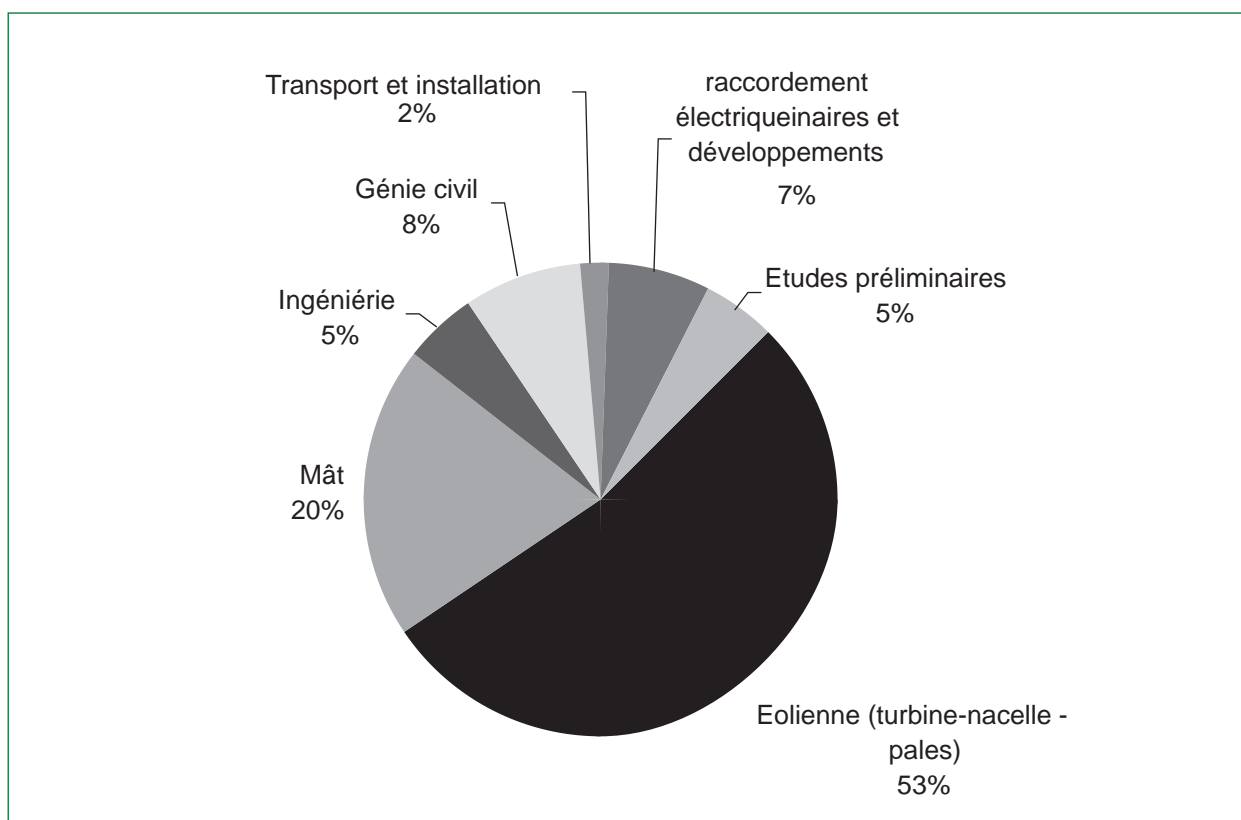


Schéma 4 : Structure du coût d'un investissement éolien.

Le coût d'exploitation annuel moyen (maintenance, gestion, assurance, loyer, divers) se situe autour de 20 euros/MWh, soit 80 000 euros par an pour une éolienne de 2 MW.

Il s'agit donc d'une industrie très capitalistique.

Le secteur éolien représente en France 8 100 emplois ETP (6 900 en investissement et 1 200 en exploitation-maintenance). Ce chiffre est à apprécier en regard de la puissance installée à entretenir, soit 6 700 MW, mais surtout de la puissance ou du nombre d'éoliennes installées dans l'année. Par comparaison, en Allemagne, le secteur emploie 60 000 personnes, pour une puissance installée de 29 000 MW à la fin 2011 ; de plus, les constructeurs allemands ont investi à l'international et participent de ce fait au rayonnement technologique de leur pays.

Près de la moitié des emplois créés sont le fait d'emplois directs liés à la fabrication des turbines ; la création d'usines en France, soit par des industriels français, soit par des fabricants étrangers, est donc bien une voie significative de création d'emplois directs.

Le marché de l'investissement éolien français a représenté en 2011 1,3 milliard d'euros, dont la moitié (52 %) représentait une valeur ajoutée française. Même si l'on déduit les exportations éoliennes nettes d'import (193 M€) des importations du marché domestique (618 M€), le solde commercial de l'éolien français est nettement négatif à - 425 M€.

... et assurer la compétitivité de l'énergie éolienne

En France métropolitaine, la compétitivité de l'énergie éolienne, comme celle des autres énergies renouvelables, est souvent évaluée à partir de la « parité réseau » avec la source principale qu'est l'électricité nucléaire. Une étude de mai 2012 de l'Institut Fraunhofer portant sur les systèmes énergétiques de Fribourg-en-Brigau évalue le prix de

revient total de l'électricité d'un champ éolien pour un régime de 2 000 heures de vent par an de 60 à 80 €/MWh, ce qui le situe donc légèrement au-dessus du coût de la source principale nucléaire française, mais probablement dans la fourchette des centrales à charbon (cela avant résultats des efforts de R&D en cours). Rappelons toutefois que le service rendu est différent, un type de source étant capable de produire pratiquement en permanence, l'autre étant par nature intermittent et non commandable.

La situation est plus favorable dans les réseaux non interconnectés (ou peu interconnectés), dont les plus importants sont ceux des départements d'outre-mer et la Corse. Les coûts de production de l'électricité y sont en effet plus élevés que sur les réseaux continentaux principalement en raison de la nature des productions de base (souvent à base de carburants fossiles) et de la plus petite taille des moyens de production. Sur ces réseaux, le coût de production électrique éolienne se compare favorablement au coût du mix global, avec un éolien produisant à environ 110 €/MWh (170 €/MWh en y ajoutant des solutions de stockage) et un mix énergétique global se situant à environ 200 €/MWh.

Il en va de même dans les systèmes continentaux où le pétrole et le charbon sont les sources de base de l'électricité et où les prix de vente de l'électricité au public peuvent être, comme en Allemagne, supérieurs aux prix que connaît le consommateur français.

La compétitivité de la production éolienne est donc un sujet de grande actualité ; l'industrie et la recherche françaises ont un rôle à jouer dans cette émergence d'un nouveau mode économique de production d'électricité.

Note

* Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie, de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies (CGEIET), ministère de l'Économie et des Finances et ministère du Redressement productif.