

1.2 Transformer une ressource inépuisable en énergie propre et compétitive

L'éolien en mer est capable de fournir, sous certaines conditions, une énergie facilement exploitable, pour un coût global mesuré. Cette source d'énergie est à même d'assurer un développement économique et social important pour la France, à condition de structurer rapidement une filière industrielle incluant tous les acteurs du secteur.



Parc éolien en mer,
Hornsrev, Danemark

1.2.1 L'éolien en mer, la plus mature des énergies marines

La mer est un espace privilégié pour le développement des énergies renouvelables. Elle dispose d'un fort potentiel énergétique, de grands espaces, et bénéficie de la proximité des populations et des activités qui se développent sur les littoraux.

La mer est un formidable réservoir à énergie. Recouvrant les deux tiers de la surface du globe, elle recèle des quantités d'énergie bien supérieures aux besoins énergétiques de l'humanité. Cinq ressources potentielles existent en effet : le vent, le mouvement de l'eau (énergie des courants, vagues et marées), la température de l'eau (différentiel entre les eaux froides profondes et les eaux superficielles chaudes), la biomasse (végétaux marins) et la pression osmotique (mélange eau douce/eau salée). Toutes ces ressources sont capables de produire de l'électricité¹. Pour autant, toutes ne sont pas exploitables de la même manière et de multiples contraintes rendent le « potentiel techniquement exploitable » bien moindre que le potentiel théorique de ces ressources naturelles.

1. IFREMER, Synthèse d'une étude prospective à l'horizon 2030

Cinq ressources potentielles existent théoriquement mais ne sont pas toutes techniquement exploitables à ce jour

Une avance certaine pour l'éolien

Le potentiel techniquement exploitable de l'éolien en mer en Europe est estimé à 313 TWh/an², en considérant seulement les sites situés à moins de 20 km des côtes et à moins de 20 m de profondeur, chiffre à comparer à la consommation totale de la France qui est d'environ 440 TWh actuellement. D'autres ressources sont théoriquement susceptibles de fournir autant d'énergie, voire davantage, mais les conditions de leur exploitation ne sont pas encore réunies à ce jour.

L'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) a ainsi dressé quatre scénarios pour évaluer le potentiel réel de chacune d'elles à l'horizon 2030. Ces quatre hypothèses prennent en compte le niveau de développement des technologies, le contexte concurrentiel, le soutien politique éventuel, les efforts en matière de recherche...



Projet « Pelamis », basé sur l'énergie fournie par les vagues

2. Agence Internationale de l'Énergie, 2000

Le scénario 1 correspond à un marché dérégulé dans un contexte de crise énergétique et de compétition économique, le scénario 2 à une politique mondiale pour la durabilité et une extension régulière des accords de lutte contre le changement climatique, le scénario 3 à l'intérêt national et à la sécurité énergétique avec une faible coopération mondiale, le dernier donne priorité au développement local dans un contexte de montée des tensions liées aux modifications du climat.

ÉNERGIE (en TWh/an)	SCÉNARIO 1 CRISE, URGENCE ÉNERGÉTIQUE	SCÉNARIO 2 COOPÉRATION VERTUEUSE PAR NÉCESSITÉ	SCÉNARIO 3 PEU D'ÉVOLUTION, CHACUN POUR SOI	SCÉNARIO 4 DÉVELOP- PEMENT LOCAL AUTONOME
Éolien en mer	12	30	6	12
Énergie thermique marine	1,8	5,8	1	5,8
Courants	0,3	3	0,6	0,2
Marémoteur	1	1,5	0,6	0,6
Vagues	0,3	6	0,3	0,5
Biomasse	-	-	-	-
Osmotique	0	0	0	0
BILAN	15,4	46,3	8,4	19,1
dont électricité	14	41,2	7,7	14

Source : Ifremer

Selon les objectifs du Grenelle de l'Environnement, en 2020, ce sont un peu plus de 1 000 éoliennes qui seront installées en mer dans notre pays. Elles produiront près de 18 TWh d'électricité chaque année, soit l'équivalent de la consommation domestique d'environ 8 millions de personnes.

Dans tous les scénarios, l'éolien devance largement toutes les autres formes de ressources marines, contribuant pour une part comprise entre 62 et 78 % du total selon les scénarios, voire 73 à 85 % si l'on ne considère que la production d'électricité.

L'éolien est aujourd'hui la plus mature des énergies marines et notre pays détient des caractéristiques très favorables à l'implantation de parcs éoliens en mer, sur les trois façades maritimes. L'IFREMER estime que l'éolien en mer serait capable à lui seul de fournir 5,2 % des objectifs du Grenelle de l'Environnement, contre au mieux 2,5 % pour l'ensemble des autres ressources marines.

LE POINT DES TECHNOLOGIES

À l'heure actuelle et à brève échéance (moins de 5 ans), seul l'éolien en mer fait l'objet d'une véritable exploitation, notamment en Europe du Nord où les investissements (sociétés d'énergies, fabricants de matériels, sociétés de service) sont réels. Ce n'est qu'à une échéance plus lointaine à 10 ans, que les premiers projets basés sur d'autres formes de ressources (hydroliennes, houlo-moteurs) constitueront de réels moyens de production d'électricité³.

Une énergie facile à acheminer, produite localement

L'éolien en mer conforte l'une des autres priorités du Grenelle de l'Environnement : renforcer notre indépendance énergétique et rapprocher la production de la consommation. Directement implantés en face des bassins de vie, les parcs éoliens en mer ne nécessitent pas de transformation particulière de l'énergie : un câble sous-marin ensoufflé et relié à un poste de transformation à terre injecte sur le réseau électrique national le courant produit par les éoliennes. Cette proximité réduit les pertes électriques liées au transport sur de longues distances.

3. Source : IPANEMA (Initiative partenariale nationale pour l'émergence des énergies marines), rapport d'étape 2009

L'ÉOLIEN FLOTTANT

Afin de s'affranchir de la contrainte de profondeur, la technologie d'éolien flottant est aujourd'hui envisagée. La différence principale entre les éoliennes en mer flottantes et les éoliennes en mer « posées » se situe au niveau de la fondation sur laquelle repose l'éolienne.

Dans le cas de l'éolienne flottante, l'éolienne est fixée sur une imposante structure ne reposant pas sur le fond de la mer, mais maintenue par des lignes d'ancrage reliées au fond marin afin de limiter les mouvements. Les enjeux de stabilité de la plate-forme requièrent des avancées technologiques importantes. Différentes technologies de flotteurs sont en cours de développement, permettant une installation dans des profondeurs allant de 50 à 700 mètres.

Aujourd'hui encore très onéreuses, ces éoliennes font l'objet de plusieurs projets de R&D en France, Norvège, Angleterre, Italie, Allemagne et États-Unis. Il restera toujours la nécessité d'un raccordement électrique entre ces éoliennes et la côte.



Terminal pétrolier d'Antifer, France

1.2.2 L'éolien en mer, une électricité compétitive

En mer, les parcs éoliens ont une efficacité comparable aux meilleures sources d'énergie si leurs coûts respectifs sont comparés en intégrant l'ensemble des paramètres.

Le développement d'une ressource énergétique nouvelle comme l'électricité éolienne est largement conditionné par son coût de production au regard de l'évolution des coûts de production des autres énergies disponibles. Or, la comparaison des coûts des différentes énergies est loin d'être évidente.

MESURER L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

En électricité, le watt est l'unité de puissance d'un système débitant une intensité de 1 ampère sous une tension de 1 volt. En intégrant cette puissance sur un temps de 1 heure, on obtient une quantité d'énergie dont l'unité pratique courante est le kilowattheure.

Une génératrice de 1 kW qui a tourné 1 heure a produit 1 kWh.

1 Kilowatt (kW) = mille watts

1 kW à 2 kW : puissance d'une bouilloire électrique domestique.

1 Mégawatt (MW) = 1 million de watts

La capacité productive des générateurs électriques commandés par les entreprises de service public est souvent mesurée en MW. Environ 10000 ampoules de 100 watts ou 5000 systèmes informatiques seraient nécessaires pour représenter 1 mégawatt. 1 MWh (ou mégawattheure) représente la quantité d'énergie produite par une installation de 1 MW fonctionnant pendant 1 heure.

1 Gigawatt (GW) = 1 milliard de watts

• 2,1 GW : puissance générée par le barrage d'Assouan. • 3 GW : puissance thermique générée approximative du plus grand réacteur nucléaire du monde. • 18,2 GW : puissance électrique générée du barrage des Trois Gorges en Chine.

1 Téravatt (TW) = mille milliards de watts

Un tarif d'achat temporairement garanti

Toute nouvelle énergie doit faire l'objet d'un accompagnement à son lancement, afin qu'elle puisse faire sa place parmi les énergies déjà existantes et amorties depuis longtemps. C'est le cas aujourd'hui pour les énergies renouvelables, et en particulier pour l'éolien en mer. À l'heure actuelle, le prix d'achat pour l'électricité éolienne en mer est fixé à 0,13 euro (référence arrêté tarifaire 2008) par kilowattheure produit pendant les 10 premières années. Il est fixé entre 0,03 et 0,13 euro par kilowattheure les 10 années suivantes, en fonction de la productivité et de la performance constatées : plus le parc a produit pendant les 10 premières années, plus faible sera le tarif d'achat des 10 années suivantes.

Pour pouvoir comparer le tarif de l'éolien en mer à d'autres énergies, il convient d'intégrer tous les paramètres.

Plus le parc a produit pendant les 10 premières années, plus faible sera le tarif d'achat des 10 années suivantes

Tarif applicable à l'éolien en mer tel que publié dans l'arrêté de décembre 2008

NOMBRE D'HEURES DE FONCTIONNEMENT ÉQUIVALENT PLEINE PUISSANCE	TARIF POUR LES 10 PREMIÈRES ANNÉES (€/kWh)	TARIF POUR LES 10 ANNÉES SUIVANTES (€/kWh)
2800 heures et moins	0,13	0,13
Entre 2800 et 3200 heures	0,13	Interpolation linéaire
3200 heures	0,13	0,09
Entre 3200 et 3900 heures	0,13	Interpolation linéaire
3900 heures et plus	0,13	0,03

L'éolien est
l'énergie
renouvelable la
plus compétitive

Ainsi, une fois passées ses 10 premières années de production, le projet de parc éolien en mer devrait produire une électricité achetée en moyenne 9 centimes d'euro (référence arrêté tarifaire 2008) par kWh.

Tarifs d'achat de l'électricité produit à partir des énergies renouvelables en France

FILIERE	ARRÊTÉS	DURÉE DES CONTRATS	EXEMPLE DE TARIFS POUR LES NOUVELLES INSTALLATIONS (EN CENTIMES D'EUROS)
Hydraulique	1 ^{er} mars 2007	20 ans	entre 6,07 et 10,25
Biogaz et méthanisation	10 juil. 2006	15 ans	entre 7,5 et 14
Énergie éolienne	13 déc. 2008	15 ans (terrestre)	- éolien à terre : entre 5,5 et 8,2
		20 ans (en mer)	- éolien en mer : entre 8 et 13
Solaire photovoltaïque	12 jan. 2010	20 ans	- entre 31,4 et 58 (métropole)
Géothermie	10 juil. 2006	15 ans	- entre 12 et 15 (métropole)

Le tarif d'achat de l'électricité produite par l'éolien en mer sera revu par le législateur pour les nouveaux contrats signés dans les prochaines années, au fur et à mesure de la montée en maturité de cette énergie. L'objectif à terme est de rejoindre progressivement le prix du marché libre.

L'ÉQUILIBRE DES COÛTS ENTRE ÉOLIEN MARITIME ET TERRESTRE

Le coût d'installation des éoliennes en mer est supérieur à celui de leurs homologues terrestres. Ceci est principalement dû aux fondations propres aux mâts immergés : les fondations terrestres représentent en moyenne 5 à 9 % de l'investissement total, contre 21 % pour l'éolien en mer¹, mais également à la « marinisation » des éoliennes, et plus généralement aux surcoûts des travaux en mer.

Ce surcoût est également lié aux coûts de maintenance nettement plus élevés en mer.

En revanche, ces surcoûts sont en grande partie compensés par une capacité de production deux fois supérieure. 3 000 à 4 000 h/an en moyenne pour l'éolien maritime, contre 2 000 à 3 000 h/an en moyenne pour l'éolien terrestre. De plus, ces coûts baisseront avec le développement de la capacité installée en Europe et dans le monde (effet « d'échelle » ou de « série »).

1. EWEA (European wind energy association)



Une électricité dont les coûts «cachés» sont parmi les plus faibles

Quel que soit le mode de production d'électricité, il existe des « coûts cachés », qui correspondent aux impacts négatifs du mode de production sur l'environnement, la santé, etc.

La somme des coûts cachés et des coûts économiques facturés constitue les coûts globaux d'un mode de production (ou d'une filière...), qui sont les seuls susceptibles d'être vraiment comparés. Ainsi, la production d'électricité à partir de charbon ou de tourbe induit des coûts sociaux et environnementaux, en particulier ceux liés à l'émission de CO₂. Quant à la production d'électricité à partir de centrales nucléaires, la gestion des déchets et le démantèlement sont des paramètres à prendre en compte.

Le caractère épuisable des énergies fossiles et de l'uranium, avec comme conséquence les spéculations financières ou les risques d'embargos, peut avoir des effets plus ou moins forts sur les coûts facturés du kWh.

Une partie des fonds consacrés par les États aux énergies n'est pas répercutée sur le prix facturé du kWh. Il en est ainsi des coûts de la recherche publique en France particulièrement élevés pour l'énergie nucléaire³ ou de la reconversion de certaines industries extractives, comme le charbon...

Le programme Externe de la Commission Européenne (Externalities of Energy. A Research Project of the European Commission) a établi en 2003 une synthèse des coûts externes (des « coûts cachés ») pour 9 filières de production d'électricité pour les 15 pays que comptait alors l'Union Européenne. Le tableau ci-dessous résume ces coûts, de la filière la plus coûteuse à la moins coûteuse, en précisant le nombre de pays concernés par filière.

Cette compétitivité n'est effective que si les parcs éoliens en mer sont installés dans certaines conditions

3. Edgar Morin, rapport du Comité des Sages, Débat national sur les énergies 2003 : « La recherche sur les énergies renouvelables dispose de moyens 50 fois plus faibles que le nucléaire »

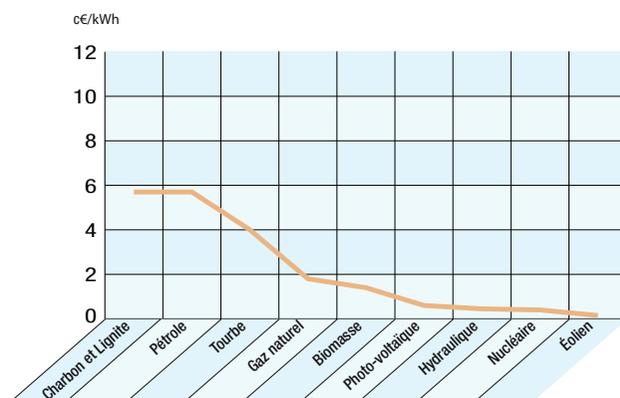
Le saviez-vous ?

La facture énergétique de la France

En 2008, la France a importé pour 59 milliards d'Euros de pétrole et de gaz, et cette facture ne cesse d'augmenter depuis le début des années 2000.

Le vent étant une source d'énergie gratuite, il n'y a aucune fluctuation à craindre sur son prix

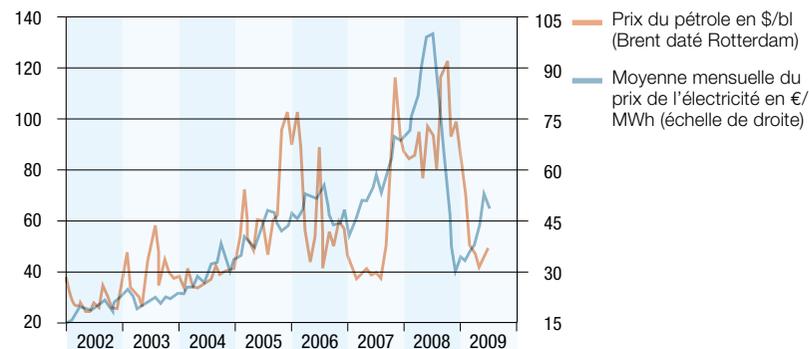
Coûts cachés par filière de production d'électricité



La production d'électricité éolienne présente les coûts cachés les plus faibles de toutes les filières de production d'électricité.

Le vent étant une source d'énergie gratuite, il n'y a aucune fluctuation à craindre sur son prix, contrairement aux énergies basées sur les cours des ressources fossiles.

Fluctuations du prix du pétrole et de l'électricité



Source: MEEDDEM

Un bilan neutre pour la collectivité

En partant de l'objectif de production d'électricité éolienne fixé par le Grenelle de l'Environnement (59 TWh à l'horizon 2020), l'institut d'études économiques COE Rexecode a dressé le bilan prévisionnel du programme d'investissement de 36 milliards d'euros qu'il serait nécessaire d'engager pour atteindre cet objectif.

Ce bilan fait ressortir un coût de production de l'électricité éolienne de 8,2 centimes d'euros par kWh en moyenne jusqu'en 2020 (6,3 centimes d'euros pour l'éolien terrestre, 10,3 centimes pour l'éolien en mer), comparable au prix d'achat de gros de l'électricité qui augmenterait jusqu'à 8,5 centimes par kWh dans la même période⁴. Le surcoût constaté de 4,9 milliards d'euros, qui résulterait des obligations d'achat d'électricité, serait atténué par un avantage économique (non-dépendance au coût des énergies fossiles) et environnemental (valorisation des émissions de CO₂ évitées) de 3,9 milliards d'euros. Le bilan global, compte tenu des incertitudes du chiffrage⁵, est considéré par l'Institut comme atteignant l'équilibre vers 2020, ce qui rendra acceptable le coût de production de l'électricité d'origine éolienne et corrélé avec le coût du pétrole. Après 2020, l'éolien devrait devenir moins cher que le coût moyen du marché si les investissements commencent dès aujourd'hui.

L'ensemble de ces données démontre l'efficacité économique de l'éolien en mer. Contrairement à d'autres sources d'énergies, son prix tient compte de l'ensemble des paramètres : fabrication, construction, traitement des déchets, démantèlement, assurance, impacts sur la santé et l'environnement, etc. Il n'y aura ni surprise ni surcoût majeurs à envisager pour l'avenir. Toutefois, cette compétitivité n'est effective que si les parcs éoliens en mer sont installés dans certaines conditions, notamment de profondeur d'eau et de distance à la côte, comme nous le verrons par la suite.

4. Coe-Rexecode – Évaluation socio-économique du programme de production d'électricité éolienne

5. chiffre calculé par la somme actualisée des émissions de CO₂ évitées grâce au développement de l'éolien et du photovoltaïque pondéré par la valeur tutélaire du CO₂

Comprendre la productivité de l'éolien

Les éoliennes font partie des installations de production d'électricité les plus fiables. Le facteur de disponibilité des éoliennes, qui mesure le pourcentage de temps pendant lequel une installation est techniquement en état de fonctionner, s'établit à près de 95 %, chiffre supérieur à celui des centrales conventionnelles (de l'ordre de 80 à 90 % pour une centrale nucléaire, 70 à 95 % pour les centrales utilisant d'autres énergies). Par ailleurs, un parc éolien est une somme d'unités de production individuelles et autonomes. Lorsqu'une éolienne cesse de produire, le reste des éoliennes du même parc éolien continue en général de fonctionner, assurant ainsi la continuité de la production de ce parc, ce qui est un avantage par rapport à des centrales électriques constituées de seulement quelques unités de production.

Quand l'éolienne fournit-elle de l'électricité ?

Une éolienne fournit de l'électricité 80 à 85 % du temps selon la vitesse du vent, et même jusqu'à 90 % en mer comme ce serait le cas sur le projet des Deux Côtes :

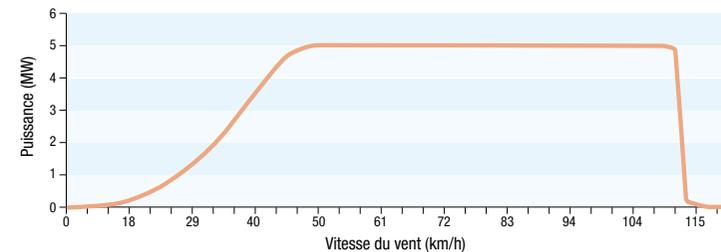


- Lorsque la vitesse du vent est inférieure à 10 km/h (de l'ordre de 10 % du temps sur le site des Deux Côtes), l'éolienne ne produit pas d'électricité. Cependant à partir de 5 km/h, un automate, informé par une girouette, commande aux moteurs d'orientation de placer l'éolienne face au vent. Les trois pales sont alors mises en mouvement par la seule force du vent pour être prêtes à capter des vents plus puissants.

- Lorsque la vitesse du vent est comprise entre 10 et environ 50 km/h (de l'ordre de 75 % du temps sur le site des Deux Côtes), l'éolienne produit de l'électricité directement en fonction de cette vitesse de vent. À partir de 35 km/h, les pales se mettent progressivement à tourner sur elles-mêmes afin de réguler la production.
- Lorsque la vitesse du vent est comprise entre 50 et 110 km/h (de l'ordre de 15 % du temps sur le site des Deux Côtes), l'éolienne produit à pleine puissance quelle que soit la vitesse du vent. Les pales sont orientées en fonction de la vitesse du vent.
- Lorsque le vent est supérieur à 110 km/h (au maximum de l'ordre de quelques heures en moyenne par an sur le site des Deux Côtes), ou pendant les fortes tempêtes, l'éolienne est arrêtée progressivement pour des raisons de sécurité et les pales sont mises en drapeau, c'est-à-dire sans prise au vent, l'éolienne ne produit plus.

Une éolienne en mer fournit de l'électricité plus de 90 % du temps

Courbe de puissance classique d'une éolienne en mer de 5 MW de puissance



Quelle est la capacité réelle d'une éolienne ?

Si elle fournit de l'électricité entre 80 et plus de 90 % du temps, l'éolienne ne produit pas à pleine puissance en permanence. On calcule donc le facteur de capacité qui permet la comparaison avec

L'ensemble du parc éolien français n'est jamais en panne de vent

d'autres moyens de production. Le facteur de capacité est le rapport entre la production effective d'une éolienne pendant une durée définie et la production maximale de l'éolienne si celle-ci avait fonctionné à pleine puissance pendant la même période considérée. Autrement dit, à l'échelle d'une année (soit 8 760 heures), une éolienne a une production équivalente à ce qu'elle aurait produit pendant environ 2 200 (25 % de 8 760) à 2 600 heures (30 % de 8 760) à pleine puissance.

Si ce facteur oscille donc autour de 25 à 30 % sur terre, il atteint en mer entre 35 et 45 % car les vents y sont plus forts et plus constants.

Il est intéressant de comparer ce chiffre avec celui des autres énergies renouvelables, dites « flux » :

NOMBRE ANNUEL D'HEURES ÉQUIVALENT DE FONCTIONNEMENT (PLEINE PUISSANCE) ET FACTEUR DE CAPACITÉ ASSOCIÉ		
Éolien en mer	3 000 à 4 000	35 à 45 %
Éolien terrestre	2 000 à 3 000	23 à 35 %
Photovoltaïque	1 000 à 2 000	12 à 23 %
Hydroélectricité	2 000 à 5 000	23 à 57 %
Hydrolien	3 000 à 4 000	35 à 45 %
Houlomoteur	2 500 à 4 500	29 à 51 %

Pour comparaison, avec un facteur de capacité moyen de 78 % en 2008, le parc électronucléaire français a fonctionné 6 830 heures équivalent pleine puissance.

La production est-elle constante ?

La production d'une éolienne varie avec la vitesse du vent. Néanmoins, la répartition géographique des parcs éoliens sur les trois zones de régimes de vent majeurs en France (façade Manche-Mer du Nord, front atlantique et zone méditerranéenne) compense cette variable. En effet, ces régimes de vent sont indépendants, on parle ainsi de décorrélation des gisements de vent. Cette décorrélation entraîne ce qu'on appelle un foisonnement de la production : en répartissant des parcs éoliens sur ces différents gisements, on parvient à ce qu'il y ait, à l'échelle du pays, toujours des éoliennes en production. Pour résumer : l'ensemble du parc éolien français n'est jamais « en panne » de vent.

VERS UN RÉSEAU D'ÉLECTRICITÉ INTELLIGENT

La mise en place de compteurs intelligents appelés « Smart Meters » ou « Smart Grids » est le premier pas d'une révolution technologique vers un réseau intelligent. Ce réseau, « Smart Grid Observer », permettra de mieux comprendre et contrôler à distance les consommations d'électricité.

En Europe et notamment en France, les réseaux de transport et de distribution de l'électricité ont été conçus de manière centralisée pour maintenir l'offre face à la demande. Le réseau intelligent devrait permettre un meilleur ajustement de la production et de la consommation d'électricité. En améliorant la gestion de la consommation électrique à l'aide de compteurs intelligents il serait plus facile d'éviter les pics de consommation et les pannes dues à une surcharge. Par exemple, pendant les horaires où la consommation est réduite, le consommateur informé pourrait profiter de l'électricité produite pour charger sa voiture électrique. La production variable d'énergie est parfois difficile à intégrer au réseau classique, l'électricité produite non consommée peut alors être perdue, ne pouvant être stockée. Les nouveaux réseaux d'électricité intelligents pourraient redistribuer habilement l'énergie aux consommateurs en fonction de la production et des besoins. Il permettrait d'intégrer les énergies renouvelables, de les autogérer et de renseigner producteur, distributeur et consommateur sur l'utilisation de l'énergie produite.

Le gestionnaire du Réseau de Transport d'Électricité a ainsi montré qu'un parc éolien de 10 000 mégawatts bien réparti sur le territoire national aurait une disponibilité équivalente à celle d'une centrale de 2 800 MW. Autrement dit, 5 000 éoliennes de 2 MW peuvent remplacer une centrale (au charbon, au gaz ou nucléaire) de 2 800 MW.

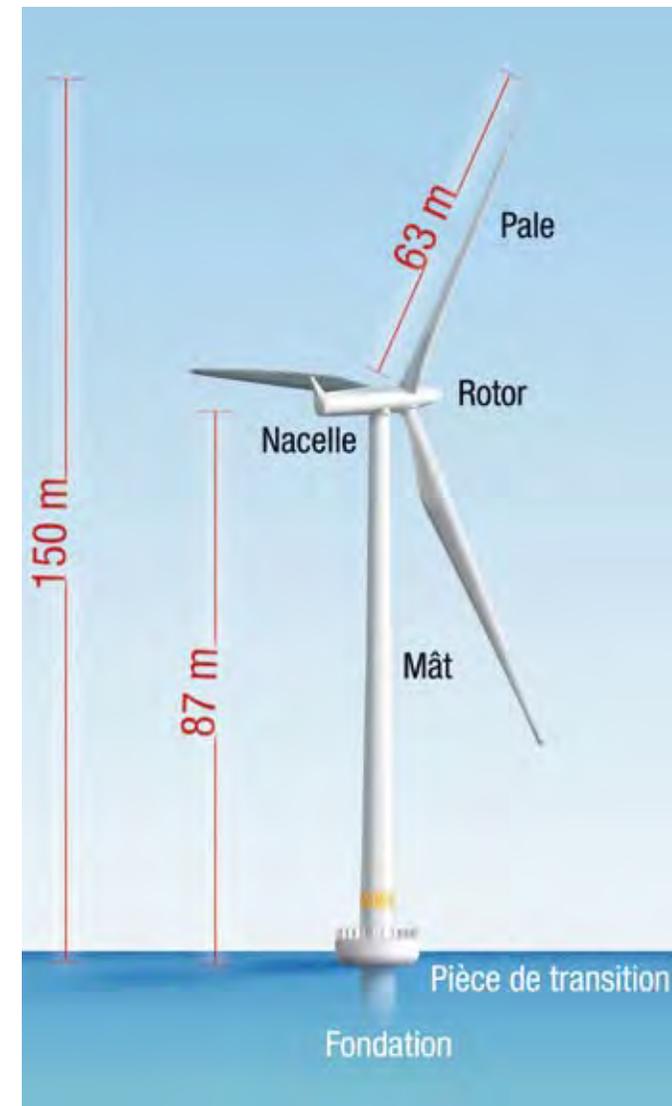
Quelle place pour la France ?

La France dispose du deuxième gisement éolien en Europe après le Royaume-Uni. Celui-ci est réparti majoritairement sur trois zones géographiques : la façade Manche-Mer du Nord, le front atlantique et la zone méditerranéenne.

L'énergie éolienne se développe de façon constante en France.

ANNÉE	PUISSANCE ANNUELLE INSTALLÉE (MW)	PUISSANCE CUMULÉE (MW)	ÉNERGIE PRODUITE GWh	ESTIMATION DE LA POPULATION ALIMENTÉE (CONSOMMATION DOMESTIQUE Y COMPRIS CHAUFFAGE ÉLECTRIQUE)
2000	40	61	70	29 000
2001	31	92	131	54 000
2002	52	144	245	100 600
2003	100	244	363	150 000
2004	146	390	577	237 000
2005	367	757	963	395 000
2006	810	1 567	2 169	890 000
2007	888	2 455	4 140	1 725 000
2008	949	3 404	5 653	2 500 000
2009	996	4 400	7 307	3 231 500

Dimensions d'une éolienne en mer d'une puissance de 5 MW

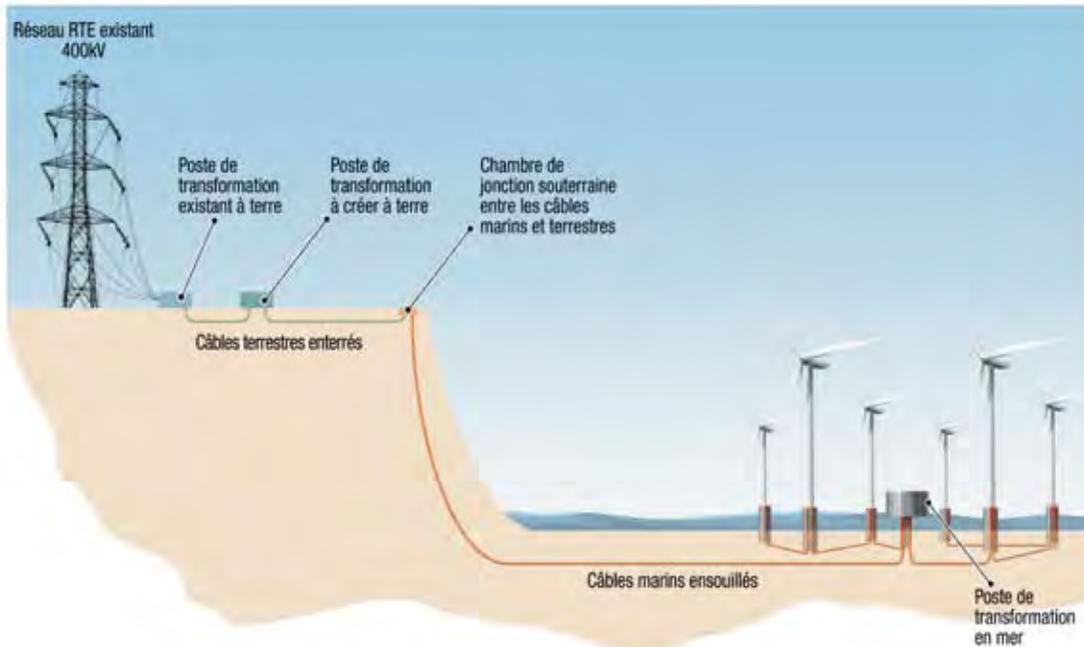


Comment fonctionnent une éolienne et un parc éolien en mer?

Écorché d'une nacelle



Grâce à la girouette (1) située à l'arrière de la nacelle, l'automate (2) commande aux moteurs d'orientation de placer l'éolienne face au vent dès que celui-ci se lève. Les trois pales (3) sont mises en mouvement par la seule force du vent. Elles entraînent avec elles l'axe lent (4), le multiplicateur (5), l'axe rapide (6) et la génératrice (7).



Les éoliennes produisent du courant électrique à une tension inférieure à celle du réseau électrique national. Il est donc nécessaire d'élever cette tension entre les éoliennes en mer et le réseau à terre, au moyen d'un poste électrique de transformation situé au plus proche du réseau national. Dans la plupart des cas, il est nécessaire d'ajouter un ou plusieurs postes électriques de transformation en mer, afin de limiter le nombre de câbles électriques entre le parc et la terre, ainsi que les pertes électriques associées. L'électricité est ainsi acheminée depuis les éoliennes jusqu'au réseau national, via les postes de transformation, à l'aide de câbles électriques généralement ensouillés (enterrés dans le fond marin).

Dans l'hypothèse où le projet « Large » serait réalisé (nom donné au projet privilégié par le maître d'ouvrage – se reporter à la partie 2.1) cette transformation électrique s'effectue en deux temps : en mer, au moyen de 3 postes de transformation intermédiaires et sur terre avec 1 poste de transformation. La construction du projet étant prévue sur 3 années, 3 tranches indépendantes sont envisagées afin de faciliter la construction et d'assurer une qualité de service maximale.

À l'intérieur du parc, les éoliennes sont connectées entre elles puis reliées à l'un des 3 postes de transformation situés en mer. Chacun de ces postes sera connecté au transformateur situé à terre via 1 à 2 câbles. L'ensemble des câbles électriques situés en mer seront ensouillés et regroupés entre eux, du parc éolien à la terre, et ceux situés à terre seront enterrés (invisibles). Le poste de transformation créé à terre élèvera la tension au niveau de celle du réseau électrique existant et assurera la connexion avec le réseau RTE via le poste source existant de Penly. La technologie utilisée pour les postes électriques sera celle utilisée en centres urbains. Quoique plus onéreuse, cette technologie permet d'intégrer les installations électriques dans un bâtiment de taille 5 fois moins importante qu'avec une technologie classique, ce qui limite la visibilité de l'ensemble.

1.2.3 L'éolien en mer, une filière en pleine croissance en Europe

Les projets en cours et les investissements programmés en Europe font de l'éolien en mer l'énergie renouvelable des années à venir. Une activité nouvelle fortement créatrice d'emplois qualifiés et non délocalisables.

L'éolien en mer a été désigné par la Commission Européenne comme étant l'énergie-clé pour le futur

33 emplois nouveaux par jour. C'est la moyenne établie par l'EWEA (*Association Européenne de l'Énergie Éolienne*) concernant les créations d'emplois dans le secteur de l'éolien depuis 5 ans en Europe¹. Cela correspond à 160 000 emplois, à l'heure actuelle, avec des projections portant ce chiffre à 325 000 en 2020 et 375 000 en 2030. En France, ce secteur emploie plus de 7 000 personnes en 2007 et les projections tablent sur 18 000 emplois dès 2012 et 60 000 à l'horizon 2020 pour un chiffre d'affaires estimé à 6,3 milliards d'euros².

Dans ce contexte de forte croissance, l'éolien en mer a été désigné, par la Commission Européenne, comme étant l'énergie-clé pour le futur³. Cela a une double signification. La première confirme qu'une filière industrielle de l'éolien en mer est en train de se structurer. La seconde est que l'Europe se positionne aujourd'hui comme le leader mondial des technologies liées à l'éolien en mer.

C'est donc l'ensemble des métiers de l'éolien en mer qui s'apprêtent à connaître une forte croissance : conception et fabrication des éoliennes, infrastructures électriques, de génie civil et maritime, installation, maintenance...

2010, année clé

En 2008, l'Europe a vu l'installation d'éoliennes en mer pour une capacité de 366 MW. L'Angleterre, à cette occasion, est devenue la première nation productrice, dépassant le Danemark. En 2009, les projets construits ont encore été plus nombreux, avec une capacité supplémentaire de 577 MW, portant les capacités en mer européennes à 2000 MW. Un nouveau palier devrait être franchi en 2010 : plus d'1 GW (1 000 MW) devraient être installés cette année, l'éolien en mer fournissant dès lors environ 10 % des capacités d'énergie éolienne installée en Europe. L'éolien en mer est en train de devenir un instrument fondamental de la politique énergétique globale.

L'ÉOLIEN EN MER EN 2010

- capacité totale installée en Europe : 3 000 mégawatts
- nouvelles installations annuelles : 1 100 mégawatts soit 2,5 milliards d'euros d'investissements annuels
- production électrique prévisionnelle totale : 11 térawattheures soit
 - 0,3 % de la demande électrique européenne totale
 - 7 millions de tonnes de CO₂ évitées annuellement

La croissance va encore s'accélérer durant la période 2010-2020, avec un marché en mer passant de 1,5 GW/an à 6,9 GW/an installés, soit un cumul de 40 GW à la fin de la période. Les investissements, quant à eux, suivront une courbe identique avec près de 9 milliards d'euros/an à l'horizon 2020 et des dépenses cumulées de près de

1. EWEA — Wind at work, wind energy and job creation in the EU
 2. ADEME — Maîtrise de l'énergie et développement des énergies renouvelables
 3. Commission Européenne — Blueprint for a North Sea Grid

Selon
European
Wind Energy
Association,
la production
de l'éolien
en mer
dépassera
l'éolien
terrestre à
l'horizon
2030

60 milliards d'euros. Dans le même temps, la production électrique annuelle d'origine éolienne marine sera passée de 20 à 150 TWh, soit 4 % de la consommation en électricité européenne estimée à cet horizon. L'Europe entre donc pleinement dans l'ère de l'éolien marin, avec des bénéfices importants pour le climat : l'éolien en mer devrait permettre, dans cette perspective, d'économiser 85 Mt de CO₂ par an en 2020.

Pour atteindre cet objectif, le marché de l'éolien en mer doit progresser au rythme de 28 % par an, toujours d'ici 2020. Cette prévision peut être considérée comme plausible, puisque le marché de l'éolien terrestre a progressé de 32 % par an en Europe entre 1992 et 2004. L'éolien en mer emploiera alors environ 150 000 personnes à travers l'Europe.

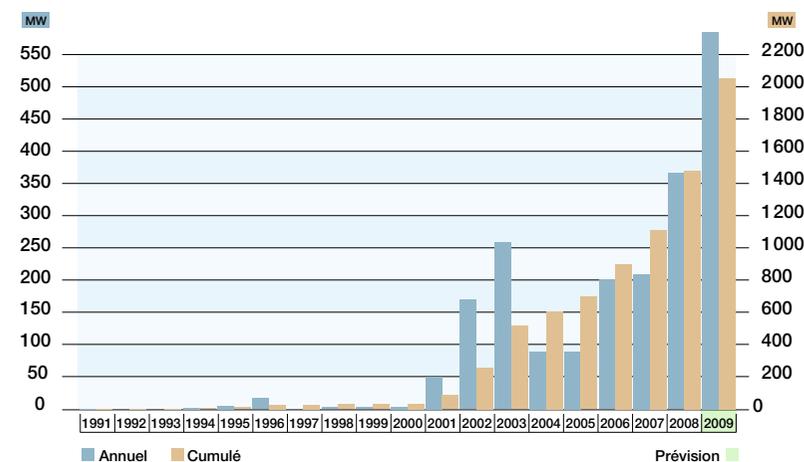
Des infrastructures complémentaires

Le développement du marché de l'éolien en mer va s'accompagner d'une forte progression de l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement pour la construction des parcs : de nouveaux bateaux spécialisés sont par exemple en cours de développement ou déjà construits, les ports concernés devront être aménagés, des sociétés de maintenance créées... C'est ainsi toute une filière qui se structure à l'échelle européenne, incluant construction, installation, formation, services et exploitation.

La France en retard ?

Sur le plan des fabricants d'éoliennes, le constat national est amer : aucun français dans les premiers fabricants mondiaux. Pour autant, les sous-traitants français de l'industrie de l'énergie éolienne sont nombreux, bien implantés au niveau international, et leur expertise peut inciter certains secteurs partenaires à investir dans l'éolien, comme EADS qui s'est lancé dans la construction de pales. De nombreux bureaux d'études, entreprises de génie civil, construction ou transport profitent de cette croissance. Les grands acteurs de l'énergie se lancent aussi sur ce marché, et l'arrivée d'AREVA (via Multibrid, sa filiale spécialisée dans la construction d'éolienne en mer de grande puissance) et

Progression exponentielle de l'éolien en mer en Europe (1991-2009)



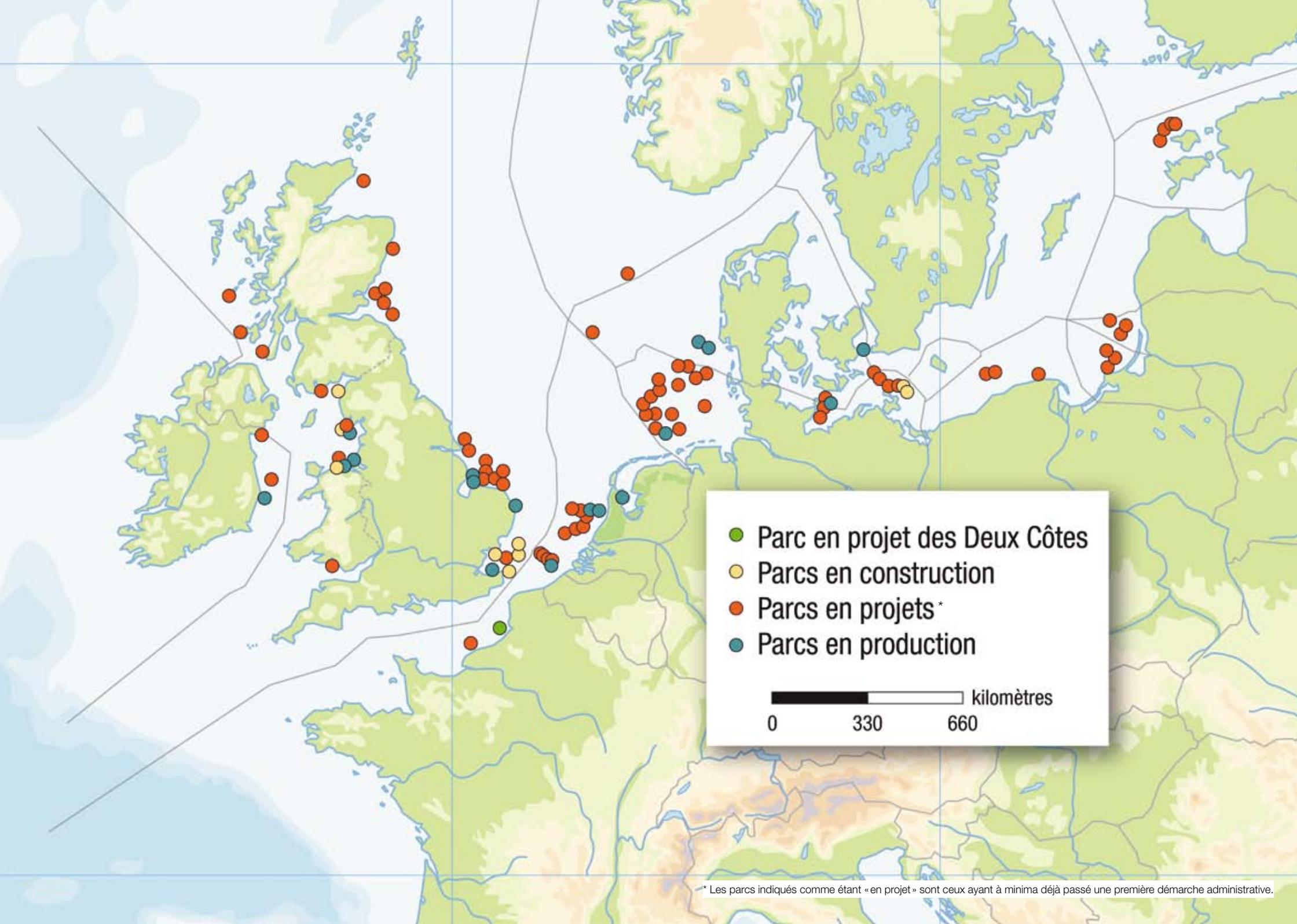
Source : EWEA

d'ALSTOM (via sa filiale Ecotecnia, spécialiste de la construction d'éoliennes) marque une première grande phase de prise de position.

Mais avec 90 % des emplois de l'éolien en France concentrés dans la distribution et l'installation et seulement 10 % dans le secteur industriel (3 % dans la fabrication et 7 % dans la maintenance⁴), le développement attendu de la filière pourrait profiter essentiellement aux industries étrangères.

La France devra structurer sa propre chaîne industrielle pour continuer à créer des « emplois éoliens » allant de la fabrication des aérogénérateurs à leur maintenance. De fait, des pays comme l'Allemagne, le Danemark, les États-Unis, la Chine et l'Espagne ont décollé plus vite que la France. Pourtant, deux facteurs clés militent en faveur du fort développement de cette filière française : les perspectives mondiales en termes d'éolien sont très importantes, et la France dispose de savoir-faire à exporter.

4. Centre d'analyse stratégique



- Parc en projet des Deux Côtes
- Parcs en construction
- Parcs en projets*
- Parcs en production

0 330 660 kilomètres

* Les parcs indiqués comme étant « en projet » sont ceux ayant à minima déjà passé une première démarche administrative.

1.2.4 Le littoral français, des sites favorables et encadrés

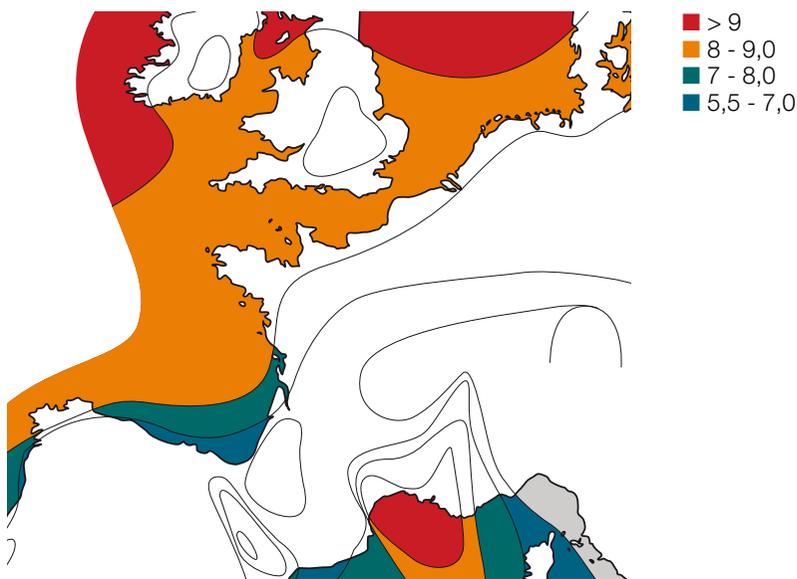
La France métropolitaine dispose d'une des plus longue façade maritime d'Europe. Tous les secteurs littoraux ne se prêtent pas à l'implantation de parcs éoliens en mer. Les atouts du littoral de la Manche Mer du Nord sont considérables. Le Grenelle de la Mer et les Schémas de Façade posent les bases des choix à faire sur le futur de l'éolien en mer et des secteurs où il pourra se développer.

« L'océan est un formidable réservoir d'énergie »

François Fillon,
Premier ministre

L'État français a décidé, par la voix du président de la République, de doter la France d'une grande plate-forme technologique sur les énergies marines. Cette plate-forme sera installée à Brest, sous la houlette de l'IFREMER. Ce choix confirme l'importance stratégique et le potentiel national de recherche en sciences et technologies marines. Le Premier

Vitesse moyenne annuelle à 50 mètres, en mètres par seconde



Source : European Wind Atlas

ministre, François Fillon, a confirmé l'urgence de développer activement l'éolien en mer, « technologie déjà mature¹ ».

Cette double décision s'appuie notamment sur les conclusions du « Grenelle de la Mer », transcrites sous la forme d'un « Livre Bleu ». En effet, la France dispose de deux atouts majeurs pour développer efficacement une filière éolienne en mer :

- des zones maritimes de l'ordre de 11 millions de km², faisant de la France l'un des pays au monde disposant du plus fort potentiel énergétique exploitable ;
- des acteurs nombreux – laboratoires, organismes scientifiques et industriels... – possédant les compétences et l'expertise nécessaire pour développer ces ressources.

Fort de ces constats, le Grenelle de la Mer a décidé la mise en œuvre de plusieurs axes de développement :

- réserver une place aux énergies marines dans le bouquet énergétique
- clarifier la réglementation applicable aux énergies marines renouvelables
- lancer un « Plan Énergies Bleues », afin de mettre sur pied une politique industrielle volontariste et incitative en adaptant notamment les infrastructures existantes pour l'installation d'une filière industrielle française des énergies marines.

1. Discours du Premier ministre, clôture des 5^e Assises « Économie de la mer » – Brest-Le Quartz, 2 décembre 2009

Des choix à opérer

La France métropolitaine bénéficie d'une des plus longues façades maritimes d'Europe et dispose ainsi d'un potentiel majeur pour l'installation de parcs éoliens en mer. Pour autant, les zones bien ventées, susceptibles d'accueillir de tels parcs dans de bonnes conditions, ne couvrent pas tout le littoral :

Ainsi, la façade atlantique au sud de la Rochelle et la façade méditerranéenne à l'est de Marseille, avec des vitesses de vent insuffisantes, ne présentent pas de conditions suffisamment favorables. Mais les conditions de vent ne sont pas les seules à prendre en compte pour l'implantation de parcs. Quatre critères complémentaires ont également une grande importance :

- **la proximité d'un réseau de transport d'électricité :** pour limiter le coût des ouvrages de raccordement et éviter les impacts paysagers et environnementaux liés à la construction de nouvelles lignes, il vaut mieux disposer d'installations de transport d'électricité à proximité. En outre, la capacité d'accueil de ces installations doit être suffisante pour que le projet ne nécessite pas le renforcement² de celles-ci, conduisant à privilégier les réseaux électriques très haute tension (225 voire 400 kilovolts).
- **la profondeur d'eau :** les coûts d'implantation des éoliennes en mer, au-delà de 20 à 30 m de profondeur, augmentent fortement et ne sont pas compatibles avec les recommandations du ministère de l'Industrie concernant l'éolien en mer et visant à limiter son coût pour la collectivité³.

2. Les renforcements de réseaux peuvent également impliquer la construction de nouveaux ouvrages électriques en « amont » du secteur concerné.

3. Communiqué de presse du ministère à l'occasion de l'annonce des résultats de l'Appel d'Offres « Centrales éoliennes en mer »

- **l'éloignement des côtes :** afin de réduire au maximum l'impact paysager, le critère d'éloignement des côtes est le plus important, dans la limite des 20 m, voire 30 m, de profondeur et des autres contraintes, la navigation maritime en particulier ;
- **les contraintes environnementales et réglementaires :** certains sites ne peuvent pas accueillir de parc éolien en mer, en raison de contraintes réglementaires (navigation maritime, aéronautique, concessions existantes...), socio-économiques (usages) et environnementales (zones/espèces protégées, paysages emblématiques...). Les sites présentant le moins d'impact environnemental et des impacts les plus faibles sur les activités de pêche sont naturellement à privilégier.

4 critères :

- proximité d'un réseau de transport d'électricité
- profondeur d'eau
- éloignement des côtes
- contraintes environnementales

UN « PLAN ÉNERGIES BLEUES » POUR LA FRANCE

Les travaux du Grenelle ont établi que l'exploitation des énergies marines ne pourra se faire que dans le cadre d'une politique industrielle volontariste et incitative. Dans ce cadre, le « Plan énergies bleues » vise à planifier cette exploitation, notamment :

- en favorisant le déploiement précoce de ces technologies
- en mettant en place des financements pour des démonstrateurs et des structures logistiques pour accélérer la maturation des technologies
- en investissant dans des infrastructures de raccordement mutualisables et en assurant l'adaptation d'un certain nombre de capacités industrielles...

Choisir les sites les plus propices au regard du potentiel éolien français

La Compagnie du Vent a lancé dès 2001 une étude visant à déterminer les sites les plus propices, au regard du potentiel éolien, de la profondeur d'eau et la distance à la côte, le long des côtes métropolitaines françaises. Plusieurs sites sont ainsi ressortis puis ont été étudiés plus précisément à l'aide des critères cités précédemment. Parmi l'ensemble des sites étudiés par la Compagnie du Vent, la synthèse de ces quatre critères de sélection aboutit au classement suivant :

RÉGION MARITIME	NOM DU SITE	LOCALISATION	AVIS
Atlantique	Pays de la Loire	Au large de Saint-Nazaire	Favorable réservé
	Côte vendéenne	Au large de Noirmoutier	non retenu
Bretagne	Sud Golfe de Gascogne	Ensemble de la côte	non retenu
	Plateau de Birvideaux	entre île de Groix et Belle-Ile	non retenu
	Le Grand Léjon	au large baie de St-Brieuc	défavorable
Cotentin	Sud-Ouest Cotentin	au large de Granville	non retenu
	Nord-Ouest Cotentin	entre Flamanville et Carteret	non retenu
	Est Cotentin	en face d'Utah Beach	favorable réservé
Manche	Baie de Seine	Au large du Havre	favorable réservé
	Somme / Seine-Maritime	Au large de la limite Seine-Maritime / Somme	favorable
	Dunkerque Est	au large à l'est de Dunkerque	non retenu

1.2 Rappel des enjeux

- Une ressource inépuisable
- Une énergie compétitive
 - Des capacités de production remarquables
- Une filière en pleine croissance
- Des sites favorables en France

En fonction de l'ensemble des contraintes liées à l'implantation des centrales éoliennes en mer, la Manche et plus particulièrement le site au large des départements de la Somme et de la Seine-Maritime a été retenu par La Compagnie du Vent pour élaborer son projet de parc éolien des Deux Côtes.