

Énergie éolienne

L'**énergie éolienne** est l'énergie du vent dont la force motrice est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou dans un moulin à vent en une énergie diversement utilisable. C'est une des formes d'énergie renouvelable.

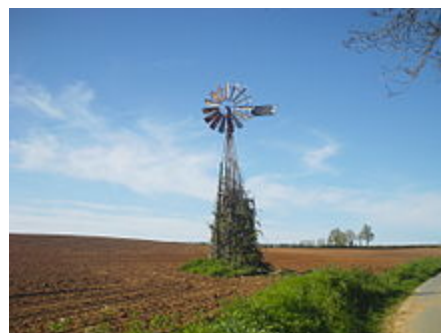
Elle tire son nom d'Éole (en grec ancien Αἴολος, Aiolos), le dieu des vents dans la Grèce antique.

L'énergie éolienne est utilisée de trois manières :

- Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...)
- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage de l'énergie.



Éolienne dans un paysage rural.



Éolienne de pompage à La Chapelle-Bâton (Deux-Sèvres)



Éoliennes en pleine mer au large du Danemark.

Sommaire

- 1 Histoire
- 2 Techniques
- 3 Caractéristiques de fonctionnement des éoliennes
 - 3.1 Plage de fonctionnement
 - 3.2 Potentiel théorique
 - 3.3 Puissance unitaire des éoliennes comparée à celle d'autres moyens de production
 - 3.4 Facteur de charge
 - 3.5 Adaptabilité de la production éolienne
 - 3.6 Variabilité de la production éolienne
 - 3.7 Prévisibilité de la production éolienne
 - 3.8 Saisonnalité de la production éolienne
 - 3.9 Foisonnement
 - 3.10 Répartition géographique et problèmes de réseaux
 - 3.11 Surface occupée
 - 3.12 Démantèlement
 - 3.13 Utilisation de l'énergie éolienne en site isolé
- 4 Économie : valeur, prix, coût
 - 4.1 Valeur économique
 - 4.2 Prix et mécanismes de soutien
 - 4.3 Coût
- 5 Puissance installée et production
 - 5.1 Données de synthèse mondiale
 - 5.1.1 Production éolienne
 - 5.1.2 Puissance installée
 - 5.2 Europe
 - 5.3 Amérique
 - 5.4 Asie
 - 5.5 Afrique
 - 5.6 Océanie
- 6 Sociétés
 - 6.1 Producteurs d'énergie éolienne
 - 6.2 Fabricants d'éoliennes
- 7 Avenir : projets et perspectives
 - 7.1 La technologie
 - 7.1.1 Rendement des éoliennes
 - 7.2 L'éolien en mer
 - 7.3 L'éolien urbain
 - 7.4 Projection des productions électriques mondiales éoliennes
- 8 Réglementation
- 9 Débats et critiques
 - 9.1 Aspect environnemental
 - 9.1.1 Bilan environnemental global
 - 9.1.2 Éléments polluants contenus dans l'alternateur
 - 9.1.3 Impact sonore
 - 9.1.4 Impact visuel
 - 9.1.5 Impact sur les oiseaux et les chauves-souris
 - 9.1.6 Impact sur la propagation des ondes
 - 9.1.7 Impact sanitaires dus aux infrasons
 - 9.1.8 Encombrement au sol
 - 9.1.9 L'impact du démantèlement
 - 9.1.10 Sécurité physique autour des éoliennes
 - 9.1.11 Impact sur la dynamique terrestre naturelle
 - 9.2 Aspect énergétique
 - 9.2.1 Raccordement au réseau électrique

- 9.2.2 Exigence du réseau à l'égard des producteurs
- 9.2.3 Intermittence du vent
- 9.2.4 Transformation et stockage de l'énergie éolienne
 - 9.2.4.1 Stockage par hydrogène
 - 9.2.4.2 Stockage par batteries
 - 9.2.4.3 Stockage hydraulique
 - 9.2.4.4 Stockage par transformation
- 9.3 Aspect formation
- 9.4 Aspects économiques
 - 9.4.1 Coût au kWh
 - 9.4.2 Intégration au réseau
 - 9.4.3 Construction
- 9.5 Acteurs du débat
 - 9.5.1 Organismes publics traitant des énergies renouvelables
 - 9.5.2 Associations professionnelles traitant des énergies renouvelables
 - 9.5.3 Laboratoires de recherche
 - 9.5.4 Associations spécialisées
 - 9.5.4.1 Pro-éoliennes
 - 9.5.4.2 Anti-éoliennes
 - 9.5.5 Opinion publique
- 10 Notes et références
 - 10.1 Notes
 - 10.2 Références
- 11 Voir aussi
 - 11.1 Articles connexes
 - 11.1.1 Articles généraux
 - 11.1.2 Articles connexes
 - 11.2 Bibliographie
 - 11.3 Liens externes

Histoire

Jusqu'au ^{xix}^e siècle, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique.

La plus ancienne utilisation de l'énergie éolienne est la marine à voile : des indices permettent de penser qu'elle aurait été employée en mer Égée dès le ^{XI}^e millénaire av. J.-C. (voir Navigation dans l'Antiquité). Le peuplement de l'Océanie s'est vraisemblablement fait par des déplacements à la voile, pour les longues traversées de centaines ou milliers de kilomètres en pleine mer¹.

Vers 1600, l'Europe dispose de 600 000 à 700 000 tonneaux^{n 1} de navires marchands ; selon une statistique française plus précise vers 1786-87, la flotte européenne atteignait 3,4 millions de tonneaux ; son volume aurait donc quintuplé en deux siècles. La puissance éolienne dépensée dans la propulsion de ces navires peut être estimée entre 150 000 et 230 000 HP^{n 2}, sans tenir compte des flottes de guerre^{F 1}.

L'autre utilisation principale de cette énergie était le moulin à vent utilisé par le meunier pour transformer les céréales en farine ou pour écraser les olives afin d'en extraire l'huile ; on peut aussi citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande. Le moulin à vent est apparu sur le territoire de l'Afghanistan d'aujourd'hui ; il était utilisé en Perse pour l'irrigation dès l'an 600. Selon l'historien Fernand Braudel, « Le moulin à vent apparaît bien plus tard que



L'utilisation de l'énergie éolienne par l'homme est ancienne. Moulins dans la région de *La Mancha*, Espagne.

la roue hydraulique. Hier, on le croyait originaire de Chine ; plus vraisemblablement, il est venu des hauts pays d'Iran ou du Tibet. En Iran, des moulins tournent probablement dès le VII^e siècle apr. J.-C., sûrement au IX^e siècle », animés par des voiles verticales dressées sur une roue qui, elle, se meut à l'horizontale (...) Les musulmans auraient propagé ces moulins vers la Chine et la Méditerranée. Tarragone, à la limite Nord de l'Espagne musulmane, posséderait des moulins à vent dès le X^e siècle^{F 2}.

Fernand Braudel qualifie de « première révolution mécanique » l'introduction progressive, du XI^e siècle au XIII^e siècle, des moulins eau et à vent : « ces « moteurs primaires » sont sans doute de modique puissance, de 2 à 5 HP^{n 2} pour une roue à eau, parfois 5, au plus 10 pour les ailes d'un moulin à vent. Mais, dans une économie mal fournie en énergie, ils représentent un surcroît de puissance considérable. Plus ancien, le moulin à eau a une importance bien supérieure à celle de l'éolienne. Il ne dépend pas des irrégularités du vent, mais de l'eau, en gros moins capricieuse. Il est plus largement diffusé, en raison de son ancienneté, de la multiplicité des fleuves et rivières, ... »^{F 3}. « La grande aventure en Occident, à la différence de ce qu'il advint en Chine où le moulin va tourner, des siècles durant, à l'horizontale, c'est la transformation de l'éolienne en une roue redressée dans le plan vertical, à l'image de ce qui s'est passé pour les moulins à eau. Les ingénieurs disent que la modification a été géniale, la puissance fortement augmentée. C'est ce moulin nouveau modèle qui se propage en Chrétienté. Les statuts d'Arles enregistrent sa présence au XII^e siècle. À la même époque, il est en Angleterre et dans les Flandres. Au XIII^e siècle, la France entière l'a accueilli. Au XIV^e siècle, il est en Pologne et déjà en Moscovie, car déjà l'Allemagne le leur a transmis »^{F 4}.

Le moulin à vent, plus coûteux d'entretien que le moulin à eau, est plus onéreux à travail égal, notamment pour la meunerie. Mais il a d'autres emplois : le rôle majeur des *Wipmolen* aux Pays-Bas, dès le XV^e siècle et plus encore après 1600, est d'actionner des chaînes à godets qui épuisent l'eau du sol et la rejettent dans des canaux. Ils seront ainsi l'un des outils de la reconquête patiente des sols des Pays-Bas. L'autre raison pour que la Hollande soit la patrie des moulins à vent est sa situation au centre de la grande nappe des vents permanents d'ouest, de l'Atlantique à la Baltique^{F 4}.

À la fin du XVIII^e siècle, à la veille de la révolution industrielle, la quasi-totalité des besoins d'énergie de l'humanité était assurée par des énergies renouvelables et l'énergie éolienne avait une part importante dans le bilan énergétique, assurant l'essentiel des besoins des transports internationaux (marine à voile) et une partie des transports intérieurs (cabotage et navigation fluviale) ainsi que des besoins de l'industrie alimentaire (moulins à vent). Dans un essai d'évaluation de la répartition des consommations par source d'énergie, Fernand Braudel estime à un peu plus de 1 % la part de la voile, contre plus de 50 % pour la traction animale, environ 25 % pour le bois et 10 à 15 % pour les moulins à eau ; il renonce à chiffrer la part des moulins à vent, faute de données, tout en précisant : « les éoliennes, moins nombreuses que les roues hydrauliques, ne peuvent représenter que le quart ou le tiers de la puissance des eaux disciplinées »^{F 5}. On peut donc évaluer la part totale de l'énergie éolienne (voile + moulins à vent) entre 3 et 5 %.

L'apparition de la machine à vapeur, puis du moteur Diesel, ont entraîné le déclin de l'énergie éolienne au XIX^e siècle ; les moulins à vent ont disparu, remplacés par les minoteries industrielles. Au milieu du XX^e siècle, l'énergie éolienne n'était plus utilisée que pour la navigation de plaisance et pour le pompage (agriculture, polders).

Par la suite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi également à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non-connectés à un réseau électrique (maisons, fermes, phares, navires en mer, etc.). Des installations sans stockage de l'énergie impliquaient que le besoin en énergie et la présence d'énergie éolienne soient simultanés. La maîtrise du stockage de l'énergie par batteries a permis de stocker cette énergie et ainsi de l'utiliser hors présence du vent, ce type d'installation ne concernant que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

Depuis les années 1990, l'amélioration technologique des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW² et le développement d'éoliennes de 10 MW est en cours. Les subventions accordées par des gouvernements ont permis leur développement dans un grand nombre de pays. Ces éoliennes servent

aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances produites, les coûts de production et les impacts sur l'environnement sont très différents.

Techniques

Caractéristiques de fonctionnement des éoliennes

Plage de fonctionnement

Le rendement énergétique de même que la puissance développée des éoliennes sont fonction de la vitesse du vent ; dans la plage de fonctionnement de l'éolienne, la puissance est approximativement proportionnelle au cube de cette vitesse. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 11 et 90 km/h (3 à 25 m/s). Au-delà, elles sont progressivement arrêtées pour sécuriser les équipements et minimiser leur usure¹. Les éoliennes actuellement commercialisées ont besoin d'un vent dans la plage de 11 à 90 km/h (3 à 25 m/s), que ce soit celles d'Enercon³, celles d'AREVA pour l'offshore⁴, ou celles d'ALSTOM, pour les éoliennes terrestres⁵ comme en offshore⁶. La Chine a émis une référence technique pour les turbines terrestres dans les zones cycloniques, standard applicable à partir de février 2016, mais non obligatoire, mis au point par le fabricant chinois Windey, qui a développé des turbines pouvant faire face à des vents extrêmement puissants grâce à leur structure mécanique renforcée et à un algorithme de contrôle qui stoppe les éoliennes au-delà d'une vitesse de 70 m/s. Ces turbines ont ainsi résisté au cyclone Haiku le 8 août 2012, avec des vents de plus de 60 m/s⁷.



Un mât de mesure permet de connaître le potentiel éolien.

Comme l'énergie solaire et d'autres énergies renouvelables, l'utilisation massive d'éolien nécessite, soit une énergie d'appoint pour les périodes moins ventées, soit des moyens de stockage de l'énergie produite (batteries, stockage hydraulique ou plus récemment, hydrogène, méthanation ou air comprimé).

Potentiel théorique

Comme presque toutes les énergies renouvelables (exceptées les énergies géothermique profonde et marémotrice), l'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. Or, la Terre reçoit en 30 minutes l'équivalent en énergie solaire de la consommation annuelle de l'humanité, tous types d'énergie confondus. De 1 à 2 % de cette énergie provenant du soleil est convertie en vent, soit 50 à 100 fois plus que l'énergie convertie en biomasse par la photosynthèse⁸.

Puissance unitaire des éoliennes comparée à celle d'autres moyens de production

- Un aérogénérateur : de quelques kW à 7,5 MW³ ; la plupart des grandes éoliennes installées aujourd'hui en France ont une puissance de 1 à 3 MW. En général, elles sont rassemblées en fermes éoliennes de 6 à 210 MW⁹. La compagnie danoise Vestas a mis à l'essai en janvier 2014 sa nouvelle turbine V164 de 8 MW, dont le mât de 140 mètres de haut et le rotor de 164 mètres de diamètre atteint une hauteur totale de 220 mètres.
- Une centrale thermique à flamme : 120 à 790 MW (en France : centrale DK6 de Engie à Dunkerque) en 2010.
- Une centrale solaire photovoltaïque : de quelques centaines de watts à 250 MW (record fin 2012 : 247 MW : centrale solaire d'Agua Caliente aux



Éolienne au premier plan d'une centrale thermique à Amsterdam, Pays-Bas.

États-Unis)¹⁰.

- Une centrale solaire thermodynamique : de 2 à 350 MW (record : 354 MW avec la centrale SEGS de Luz Solar Energy dans le désert de Mojave en Californie, États-Unis).
- Une centrale hydro-électrique : de quelques kW à plus de 10 000 MW (record : 32 turbines de 700 MW soit 22 400 MW au barrage des Trois-Gorges en Chine) en 2006.
- Un réacteur nucléaire : de l'ordre de 900 à 1 500 MW (centrales nucléaires de Chooz dans les Ardennes et de Civaux au sud de Poitiers) et 1 650 MW pour l'EPR en construction à Flamanville.

Facteur de charge

La puissance est représentative du pic de production possible, mais l'énergie produite dépend de nombreux autres paramètres comme la météo ou les opérations de maintenance nécessaires. Le facteur de charge, rapport entre la production effective et la production maximale théorique, est couramment utilisé comme indicateur de l'énergie produite par une installation électrique. Alors qu'une éolienne a, en moyenne, un facteur de charge de 20 %¹¹, celui du solaire photovoltaïque est situé autour des 10 %¹¹ à comparer avec celui du nucléaire : 80 % en moyenne, 73 % en France en 2012 (76 % en 2011)^{R 1}.

Plus précisément, le facteur de charge moyen de l'éolien a été en 2012 de :

- 24 % en France métropolitaine (contre 21,7 % en 2011, ce qui montre que la ressource éolienne est assez fluctuante d'une année sur l'autre) ; ce facteur de charge varie très fortement au cours de l'année : il a été inférieur à 7 % pendant 10 % de l'année ; on peut noter que, parmi les productions éoliennes relevées à 19 h, heure la plus chargée de la journée, 10 % sont inférieures à 440 MW et 10 % supérieures à 3 700 MW, pour une puissance installée totale de 7 449 MW au 31 décembre 2012^{R 2}.
- 18 % en Allemagne (19,4 % en 2011)¹².
- 29 % au Royaume-Uni (29,9 % en 2011 ; 23,7 % en 2010), dont 26,2 % pour l'éolien terrestre et 35,2 % pour l'éolien offshore¹³.
- 29,8 % aux États-Unis (moyenne des 7 dernières années : 29,3 %)^{n 3}.

Les anglo-saxons utilisent parfois un concept légèrement différent du facteur de charge (*capacity factor*) : le *load factor* qui est le rapport pmoy/pmax (puissance moyenne /puissance maximale observée) ; la puissance maximale étant toujours inférieure à la puissance installée (ne serait-ce qu'à cause des arrêts pour entretien), le *load factor* est toujours supérieur au facteur de charge. Voici ses valeurs en 2012 pour 6 pays européens^{B 1} :

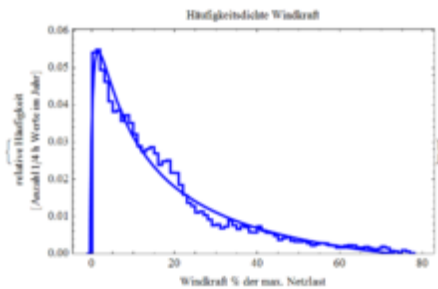
- Espagne : 0,33
- Danemark : 0,31
- Irlande : 0,31
- Royaume-Uni : 0,29
- France : 0,27
- Allemagne : 0,22

Les pays dotés de parcs éoliens offshore ont un facteur de charge plus élevé : au Danemark en 2012, le facteur de charge de l'éolien offshore atteignait 45 % contre 25 % pour le parc éolien terrestre^{B 2}.

Adaptabilité de la production éolienne

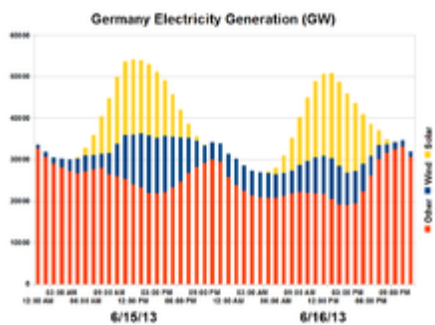
La production des éoliennes ne peut pas être modulée à volonté pour l'adapter aux besoins des consommateurs (dans le jargon technique : elle n'est pas *dispatchable*) ; elle partage cette caractéristique avec les autres énergies produites directement par des sources d'énergie naturelles fluctuantes : solaire, hydraulique au fil de l'eau (c'est-à-dire sans réservoir) ; d'autres sources telles que les centrales nucléaires et les centrales au charbon peuvent être rangées dans une catégorie intermédiaire, car leurs capacités de modulation sont peu utilisées pour des raisons économiques, sauf dans les pays où elles sont appelées à fonctionner en suivi de charge en heures creuses. Il est nécessaire de disposer en complément de ces centrales d'autres moyens de production, beaucoup plus modulables, pour assurer l'ajustement offre-demande d'électricité.

Variabilité de la production éolienne

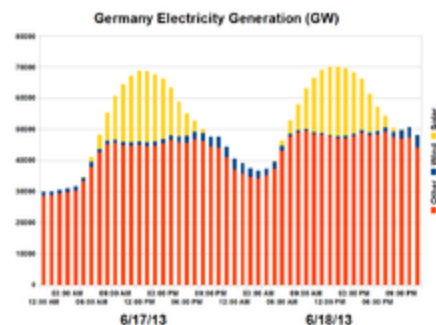


Distribution de probabilité de la production éolienne en Allemagne, 2010.

La production éolienne dépendant directement de la force du vent, elle est très fluctuante (on dit aussi intermittente ou volatile) : le graphique ci-contre montre la distribution de probabilité de la production éolienne en Allemagne [en abscisse : production éolienne en % de la charge maximale du réseau ; en ordonnée : fréquence relative (nombre de valeurs au 1/4 h dans l'année)] : on note la concentration des fréquences sur les faibles valeurs de production. RTE publie un graphique similaire dans son rapport sur le Bilan électrique 2012^{R 2}.



Production d'électricité allemande les 15 et 16 juin 2013.



Production d'électricité allemande les 17 et 18 juin 2013.

Les deux graphiques ci-dessus présentent la production d'électricité allemande sur 4 jours de juin 2013 (juin est le mois où le solaire atteint son rendement maximal) : solaire en jaune, éolien en bleu, le reste en rouge. On note la forte irrégularité de l'éolien, qui disparaît presque pendant les journées des 17 et 18 juin.

En France, le facteur de charge des éoliennes (puissance moyenne réalisée/puissance nominale) a été en moyenne de 21,7 % en 2011 et 24 % en 2012 ; pour illustrer la variabilité de cette production, RTE indique que parmi les productions relevées à 19 h, 10 % sont inférieures à 440 MW et 10 % supérieures à 3 700 MW^{R 3}. Il est nécessaire de disposer de moyens de production modulables (cycles combinés gaz, hydraulique de lac, etc.), en plus de ceux destinés à compenser les variations de la demande, pour compenser la baisse de puissance des éoliennes lorsque le vent faiblit.

Les données détaillées de RTE (eCO2mix)¹⁴ permettent de constater qu'en 2012, la puissance produite par le parc éolien français varie de 50 MW (0,7 % de sa puissance installée totale) à 6 198 MW (87 %) ; 21,3 % des puissances instantanées observées sont inférieures à 10 % de la puissance installée ; les moyennes journalières varient de 199 MW (15 novembre), soit 2,7 % du total installé, à 5 207 MW (27 décembre), soit 69,5 % du total installé ; les moyennes hebdomadaires varient de 741 MW (semaine 9 - 11 %) à 4 341 MW (semaine 52 - 58 %).

Production éolienne et nucléaire (facteur de charge)



Production éolienne et nucléaire française (facteur de charge)
 semaine la moins ventée (du 27/02 au 04/03/2012) et semaine la plus
 ventée (du 24/12 au 30/12/2012)
 source données : base eCO2mix RTE)¹⁴

Les graphiques ci-dessus présentent les productions éoliennes et nucléaires (en % de leur puissance installée respective, afin de faciliter la comparaison des profils de ces 2 énergies) sur ces deux semaines extrêmes :

Graphique de gauche : semaine 9, celle de la plus faible production éolienne en 2012¹⁴ ; faits marquants :

- faiblesse de la production éolienne (moyenne hebdomadaire : 11 % de la puissance installée ; moyennes journalières entre 4,5 % et 6,4 % sur les 4 jours les moins ventés) ;
- dynamique très forte de la remontée du dernier jour : l'éolien passe de 817 MW à 3 h à 4 050 MW à 21 h, soit +3 233 MW en 18 h, à peu près l'équivalent de la puissance des 3 principales centrales de pompage-turbinage françaises.
- constance de la production nucléaire : le taux d'utilisation fluctue très peu, à part un léger fléchissement sur les derniers jours du fait de l'arrêt d'une tranche (Blayais 1) et de légères modulations pour suivi de charge en heures creuses de week-end ; le taux d'utilisation global de 82,5 %¹⁴ s'explique par les arrêts de tranches^{n 4, 15}.

Graphique de droite : semaine 52, celle de la plus forte production éolienne en 2012¹⁴ ; faits marquants :

- niveau élevé de la production éolienne (moyenne hebdomadaire : 57,9 % de la puissance installée ; la moyenne journalière du jour de Noël atteint même 62,8 %, presque égale à celle du nucléaire : 65,3 % ;
- très forte irrégularité de cette production, qui varie de 1 889 MW (28/12 à 6 h 30) à 6 198 MW (27/12 à 15 h 30) ; entre ces 2 extrêmes, la production chute de 4 309 MW (-70 %) en 15 heures ;
- profil beaucoup plus régulier de la production nucléaire, bien qu'il soit nettement plus fluctuant que dans le graphique de gauche, du fait que, cette semaine de fêtes de fin d'année étant une période de faible demande^{n 5}, le nucléaire et les énergies fatales (hydraulique au fil de l'eau, éolien et solaire) suffisent à couvrir la consommation, si bien que le nucléaire est contraint à effectuer un suivi de charge (modulation de sa puissance en fonction de la demande, d'où le faible taux d'utilisation moyen hebdomadaire : 74,5 %^{14, n 6, 15}).

Les variations de puissance dues aux sautes de vent ne sont pas seulement caractérisées par leur fréquence et leur amplitude, mais aussi par leur pente souvent abrupte, comme on le voit sur les graphiques ci-dessus ; les automatismes de régulation du réseau doivent faire appel, pour compenser ces variations, à la réserve tournante et aux moyens de production les plus souples : centrales de pompage-turbinage et turbines à combustion. Les échanges internationaux apportent également des opportunités de régulation, à condition que les excédents ou déficits ne se produisent pas simultanément dans la plupart des pays voisins. En dernier recours, il arrive que la seule solution en cas de trop forte production éolienne soit d'arrêter une partie des éoliennes : l'ADEME explique que les technologies récentes de contrôle des centrales éoliennes permettent de réguler la puissance injectée sur le réseau afin d'en assurer l'équilibre ; lorsqu'on voit dans un parc éolien un ou plusieurs aérogénérateurs à l'arrêt, il ne s'agit pas toujours d'une panne ou d'un arrêt pour entretien, mais éventuellement d'un arrêt volontaire pour raison de gestion du réseau^{A 2}.

Une étude rédigée en 2013 par deux chercheurs du Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) pour le débat sur la transition énergétique relate que « dans les petits systèmes comme le Danemark ou l'Irlande, les chroniques de vent montrent que la variation peut dépasser occasionnellement 15–20 % de la puissance installée en 1 h et atteindre 90 % de la puissance installée en 12 h. C'est en particulier le cas lors des épisodes de vent très fort, qui impliquent un arrêt de sécurité des éoliennes, mais dont on sait mal prédire l'heure d'arrivée et l'ampleur sur le territoire. » Ainsi, le 11 novembre 2010 la production éolienne danoise s'est arrêtée complètement en moins d'une heure et n'a redémarré que deux heures plus tard¹⁶.

Une étude de Hervé Nifenecker montre que, pour résoudre le problème des excédents de production éolienne en période de vent fort, une solution pourrait être de les utiliser à produire de l'hydrogène par électrolyse ; cependant, pour atteindre une durée annuelle de fonctionnement des électrolyseurs suffisante pour obtenir un coût de production d'hydrogène compétitif, il faudrait combiner ces excédents éoliens avec ceux du nucléaire en heures creuses (nuits, week-ends) ; on obtiendrait alors un coût de l'hydrogène de l'ordre de 120 €/MWh, équivalent à 60 c€/litre d'essence pour des voitures équipées de pile à combustible, coût très compétitif par rapport à celui de l'hydrogène produit en Allemagne par de l'électricité à base de charbon et d'éolien¹⁷.

Le métier du stockage d'électricité, qui était jusqu'ici représenté presque uniquement par les propriétaires de barrages hydroélectriques, commence à s'élargir : ainsi, l'électricien japonais Tepco a annoncé le 26 juin 2014 sa décision d'entrer sur le marché de la revente d'électricité en Europe, en commençant par la Grande-Bretagne en 2015, puis la France et l'Allemagne ; la société locale, que Tepco va créer avec le japonais NGK Insulators, installera des ensembles de batteries de grande capacité pour stocker les surplus d'électricité produits par les éoliennes ou de nuit par les centrales à charbon ou nucléaires, et les revendre pendant les heures de forte demande¹⁸.

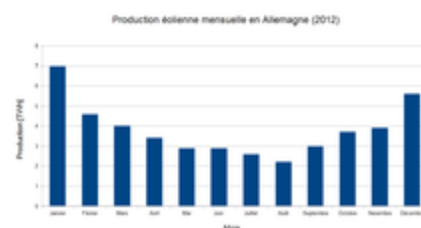
Prévisibilité de la production éolienne

La production éolienne peut être prévue avec une assez bonne précision (écart-type de 3 % à l'échéance d'une heure et de 7 % à l'échéance de 72 heures sur l'ensemble de la France ; à la maille d'un parc éolien, l'écart-type atteint 15 % en moyenne, avec une disparité importante selon la topographie locale) grâce à des modèles informatiques croisant les prévisions météorologiques détaillées par régions avec la localisation des parcs éoliens : en France, le modèle Préole de RTE effectue ces calculs à partir des prévisions de Météo France à 3 jours ; cela permet d'anticiper les mesures d'adaptation à prendre pour compenser les variations de la production éolienne¹⁹.

Saisonnalité de la production éolienne

L'ADEME fait remarquer : « les vents sont plus fréquents en hiver lorsque la demande d'électricité est la plus forte »^{A 3}.

Les données détaillées fournies par le gestionnaire du réseau de transport RTE dans la base de données eCO2mix¹⁴ permettent effectivement de constater qu'en 2012, la puissance moyenne produite en hiver (décembre à février) est de 2 286 MW (32 % de la puissance installée) contre 1 220 MW (17,2 %) en été (juillet-août) : la saisonnalité est donc bien réelle, mais le facteur de charge atteint en hiver reste modeste et il arrive que la production éolienne reste proche de zéro pendant plusieurs jours de suite (cf graphique ci-dessus).



Production éolienne mensuelle en Allemagne pour l'année 2012. Le graphique illustre la saisonnalité de la production éolienne : la production mensuelle est plus élevée pendant les mois d'hiver que les mois d'été.

Foisonnement

L'ADEME affirme que la variabilité des vents au niveau local « peut être en partie atténuée : vu les régimes climatiques différents des régions de France les plus ventées, la production éolienne n'y est pas nulle au même moment »^{A 3} ; elle fournit une carte de ces régions : façade nord-ouest du pays, de la Vendée au Pas-de-Calais, Vallée du Rhône et côte languedocienne^{A 4}, mais ne donne aucun chiffre sur ce foisonnement.

Les données détaillées de RTE (eCO2mix)¹⁴ permettent de constater qu'en 2012, la puissance produite par le parc éolien français n'est jamais négative ; cependant, elle tombe fréquemment à des valeurs très basses : la production la plus basse de l'année est de 50 MW, soit 0,7 % de la puissance installée totale, et la puissance réelle observée est inférieure à 10 % de la puissance installée totale pendant 21,3 % de l'année : le foisonnement existe donc, mais ses effets sont minimes. Une raison probable en est que les gisements éoliens méridionaux sont peu exploités : les parcs éoliens sont concentrés dans la moitié nord de la France, ils sont beaucoup moins nombreux en Languedoc et encore moins dans la vallée du Rhône.

Un foisonnement existe de façon évidente entre les régions touchées successivement par le passage d'une même perturbation : ainsi, le jour du passage de la tempête Xynthia (28/02/2010), les éoliennes vendéennes se sont arrêtées en début de nuit^{n 7}, celles de la Beauce en début de matinée et celles de Champagne en milieu de matinée ; au total, à l'échelle de la France, le profil de production pour le système entier est resté relativement plat¹⁶.

Une bonne mesure du foisonnement de l'éolien français est donnée par la comparaison entre le ratio "production minimale / production maximale" de l'éolien français en 2011 : 3,6 %, alors qu'il est inférieur à 1 % pour les cinq principaux pays européens, et même nul en Grande-Bretagne^{B 3}.

Au niveau européen, le foisonnement entre les divers pays disposant d'une production éolienne est plus significatif : en 2012, les taux de corrélation entre les productions éoliennes horaires des 6 principaux pays étaient les suivants :

Coefficients de corrélation entre les productions éoliennes horaires 2012 de 6 pays européens^{B 4}

Pays	Espagne	France	Gde-Bretagne	Irlande	Allemagne
Danemark	-0,048	0,157	0,301	0,096	0,663
Allemagne	0,022	0,418	0,353	0,178	
Irlande	-0,074	0,251	0,608		
Grande-Bretagne	-0,149	0,379			
France	0,410				

On observe une corrélation élevée entre l'Allemagne et le Danemark ainsi qu'entre la Grande-Bretagne et l'Irlande ; d'une façon générale, plus 2 pays sont éloignés, plus la corrélation est faible, donc le potentiel de foisonnement important. Un calcul d'agrégation des données des 6 pays montre que la puissance minimale moyenne sur 12 heures consécutives atteint 6,7 % de la puissance maximale alors que pour les pays pris individuellement elle va de 0 % en Grande-Bretagne à 3,6 % en France, et sur 96 heures elle atteint 14,2 % pour les 6 pays agrégés^{B 5} contre 3 % (GB) à 10 % (Espagne) en individuel^{B 6}.

Cependant, du fait des longues distances entre la France et le Danemark, l'Espagne et l'Allemagne ou l'Irlande, exploiter ce potentiel nécessiterait la construction de lignes à très haute tension en courant continu, seules capables de transporter l'électricité à plusieurs milliers de km sans pertes en ligne excessives (cf l'exemple du Québec ou de la Chine) ; cependant, ce foisonnement est déjà en partie exploité, par exemple entre la France et l'Allemagne : la forte progression des importations d'électricité de la France en provenance d'Allemagne pendant la décennie 2000^{n 8} est en grande partie due aux excédents éoliens allemands (et plus récemment, aux excédents solaires en été).

On peut aussi mentionner la complémentarité entre le solaire et l'éolien :

- le solaire produit le jour, pas la nuit ; l'éolien produit un peu plus la nuit que le jour^{R 3} ;
- le solaire produit surtout en été et très peu en hiver : l'éolien produit nettement plus en hiver qu'en été (cf *infra* : Saisonnalité de la production éolienne) ;
- le solaire peut contribuer à atténuer le problème de l'absence quasi totale de vent lors des épisodes anticycloniques, du moins en été.

Le graphique ci-contre illustre la complémentarité saisonnière entre l'éolien et le solaire photovoltaïque.

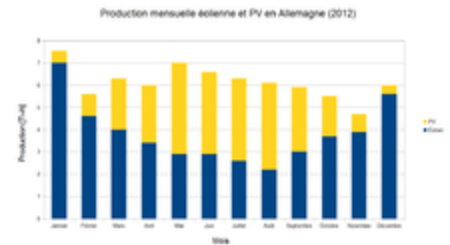
Répartition géographique et problèmes de réseaux

Il existe des « gisements » éoliens, plus précisément des régions plus favorables que d'autres à la production éolienne, parce qu'elles bénéficient de régimes de vent plus constants et plus réguliers ; c'est en général le cas des régions côtières, et *a fortiori* des zones du plateau continental proches des côtes, mais avec de faibles profondeurs d'eau, favorables à la construction de parcs éoliens en mer ; mais les particularités du relief jouent aussi un rôle : ainsi, en France, la vallée du Rhône et le Languedoc-Roussillon ont des vents très avantageux (mistral et tramontane) ; aux États-Unis, le versant est des Rocheuses est très favorable à l'éolien grâce au chinook, et en Chine la province de Mongolie-Intérieure a des vents très constants.

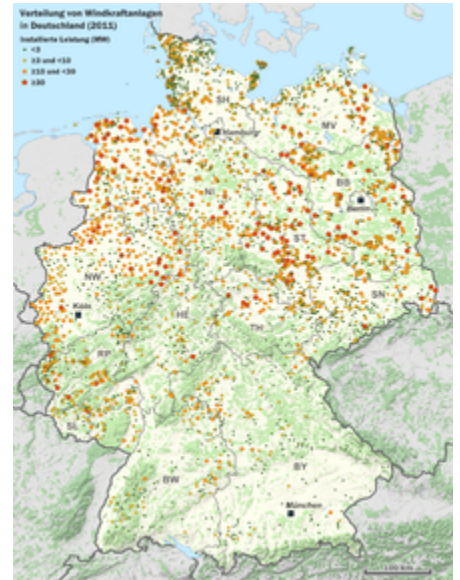
Les parcs éoliens ont tendance à se concentrer dans ces zones qui permettent d'obtenir des prix de revient plus avantageux ; la contrepartie est une répartition inégale de la production éolienne, qui pose des problèmes de réseaux dès lors que la puissance installée éolienne devient importante ; la construction de nouvelles lignes à très haute tension devient nécessaire pour transporter les excédents de production éolienne (par rapport à la consommation locale) vers les zones de consommation, par exemple en Allemagne des parcs éoliens du nord vers les zones de consommation du sud (Bavière, Bade-Wurtemberg, Hesse...), ou encore en Chine où le principal obstacle au développement de l'éolien réside dans la difficulté de coordonner la construction des parcs avec celle des lignes THT d'évacuation de leur production ; devant l'ampleur prise par ce problème en 2011, le gouvernement chinois a mis en place en 2012 une nouvelle législation destinée à mieux contrôler le développement de la filière à la suite des excès constatés dans certaines régions riches en vent et désertiques qui avaient multiplié les parcs éoliens sans mettre en place les réseaux de transport nécessaires à l'évacuation de leur production ; la progression de l'éolien en a été nettement ralentie en 2012 ; en 2013, la puissance non raccordée est tombée au-dessous de 20 %, ce qui dénote un net assainissement après le coup de frein donné en 2012²⁰.

Le rapport de la Cour des Comptes française sur la mise en œuvre par la France du Paquet énergie-climat, publié le 16 janvier 2014, fournit un exemple des difficultés posées par l'insuffisance du réseau allemand de très haute tension (THT) pour transporter l'électricité éolienne du nord vers les centres de consommation du sud : cette électricité éolienne en provenance du nord du pays doit emprunter les réseaux polonais et tchèque, exportant ainsi le trop-plein d'énergie intermittente ; en 2011, cette situation a failli entraîner la saturation du réseau électrique tchèque, déclenchant depuis une réelle tension entre les deux pays ; pour éviter le risque d'un « blackout », la République tchèque a averti qu'elle envisageait de pouvoir bloquer tout nouvel afflux d'électricité renouvelable qui ferait courir le risque d'une panne à son réseau ; pour ce faire, l'opérateur du réseau tchèque a décidé la construction d'un transformateur géant près de la frontière, destiné à ne laisser entrer que la quantité de courant que le réseau national peut supporter ; ce transformateur doit entrer en service d'ici 2017 ; la Pologne compte installer des déphaseurs à la frontière avec l'Allemagne, pour ne recevoir que l'électricité qui lui est nécessaire ; le gouvernement allemand a nommé un ambassadeur chargé de ce seul dossier, et le parlement allemand a voté en juillet 2011 une loi sur l'accélération du développement des réseaux, censée ramener de dix à quatre ans le délai de mise en place des nouvelles lignes THT Nord-Sud²¹.

Surface occupée



Production mensuelle éolienne et PV en Allemagne en 2012 : complémentarité saisonnière entre les deux énergies.



Carte des parcs éoliens allemands en 2011 (cercles rouges : >30 MW, orange : 10 à 30 MW ; jaunes : 3 à 10 MW ; noirs : moins de 3 MW).

En France, les éoliennes doivent se situer à 500 m des habitations et des zones destinées à l'habitation²² ; la distance entre éoliennes doit être de 400 m environ dans une direction perpendiculaire aux vents dominants ; leur emprise au sol (fondations, aire de retournement, postes de transformation, routes) est d'environ 3 % de la superficie du parc ; les 97 % restants sont disponibles pour un usage agricole ; un parc éolien de 10 machines est installé sur environ 10 hectares^{A 5}.

Démantèlement

La durée de vie d'un parc éolien est estimée à 20 ans ; la réglementation française précise, dans l'article L553-3 du Code de l'environnement, que l'exploitant d'une éolienne est responsable de son démantèlement et de la remise en état du site à la fin de l'exploitation²³. Constituée d'acier et de matières plastiques, une éolienne est démontable en fin de vie et presque totalement recyclable (en moyenne, 90 % des matériaux sont recyclés, et 10 % sont mis en décharge²⁴). Elle ne laisse pas de polluant sur son site d'implantation^{A 6}, en dehors de ses fondations en béton (entre 250 et 400 m³²⁵).

Utilisation de l'énergie éolienne en site isolé

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel.

Économie : valeur, prix, coût

Valeur économique

La valeur économique d'un bien découle de l'utilité que les consommateurs en retirent (valeur d'usage). Dans le cas de l'énergie éolienne, en l'absence de marché, la valeur de cette énergie ne peut être évaluée qu'en étudiant les coûts qu'elle permet d'éviter.

La valeur d'usage de l'électricité éolienne découle pour l'essentiel de trois services rendus :

- contribution à la satisfaction de la demande d'électricité, valorisée sur la base de l'économie de combustibles fossiles qu'elle permet, qui dépend du coût de ces combustibles, voué à augmenter avec la raréfaction des ressources ;
- contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui dépend de l'estimation des coûts de réparation des dégâts causés par le changement climatique ; c'est probablement la composante la plus importante de la valeur de l'éolien, mais elle est très mal connue et sujette à controverses ;
- contribution à la réduction des émissions de polluants : particules fines (centrales à charbon), oxydes d'azote et de soufre, etc.

Ces deux dernières composantes de la valeur de l'électricité éolienne constituent des externalités (dommages causés à autrui sans compensation) : en effet, ces coûts ne sont que très partiellement intégrés dans la formation des prix de marché : les coûts des polluants sont en partie pris en compte par les normes d'émissions de plus en plus sévères qui obligent les producteurs à dépolluer leurs effluents, mais les émissions de GES ne sont quasiment pas prises en compte ; des tentatives ont été faites pour corriger ce biais du marché, en particulier par le marché du carbone où s'échangent des droits d'émission de GES, mais les résultats du marché du carbone européen n'ont guère été convaincants jusqu'ici²⁶. La taxe carbone s'est montrée plus efficace dans les pays où elle a été mise en place (Suède^{n 9, 27, 28}, Danemark, Finlande).

Par ailleurs, dans le secteur électrique, une part importante de la valeur des sources d'énergie dépend des services rendus au réseau : une source d'énergie modulable (cycle combiné, turbine à combustion, hydraulique de lac) a beaucoup plus de valeur qu'une source d'énergie à fonctionnement peu modulable (centrale nucléaire ou centrale au charbon), car la possibilité de moduler la puissance d'une centrale en fonction de la demande est essentielle pour réaliser l'équilibrage offre-demande ; *a fortiori*, une énergie fluctuante au gré des aléas

climatiques (éolienne, solaire, hydraulique au fil de l'eau) a beaucoup moins de valeur qu'une énergie à fonctionnement constant, car ses fluctuations devront être compensées par des moyens de stockage coûteux (batteries, réservoirs hydrauliques, etc) ou par des énergies modulables elles aussi coûteuses ; il faudra donc, pour assurer la couverture de la demande, doubler l'investissement en éoliennes par un investissement de taille presque équivalente en centrales modulables - un peu moins cependant si les fluctuations laissent subsister un minimum de puissance garantie^{n 10}.

Les services rendus au réseau par les éoliennes sont faibles :

- pas de capacité de suivi de charge ;
- très peu de contribution à la pointe : leur puissance garantie est estimée par RTE à 5 % de la puissance installée des éoliennes ; les données détaillées de RTE (eCO2mix)¹⁴ pour 2012 permettent de confirmer ce chiffre : la puissance dépassée dans 95 % des cas par le parc éolien est égale à 4,7 % de sa puissance installée.

La valeur de l'éolien est bien plus élevée dans les pays dont la production est pour l'essentiel à base de combustibles fossiles (Chine : 80,3 % en 2011^{n 11}, Inde : 80,6 % en 2011^{n 12}, États-Unis : 68 % en 2012^{n 13}, Allemagne : 57,6 % en 2012^{n 14}) que dans des pays où les énergies dé-carbonées sont largement majoritaires (Suède : 89 % en 2011^{n 15}, France : 90,4 % en 2012^{n 16}, Québec : 99 % en 2009^{n 17}, etc) ; dans ces derniers pays, la production des éoliennes ne peut pas se substituer aux énergies fossiles en-dehors des périodes de forte demande ; pendant les heures creuses, elle peut au mieux permettre de stocker de l'eau dans les barrages en réduisant la production des centrales hydroélectriques, sinon elle est vendue à l'étranger, à bas prix puisque la demande est faible (il arrive même que le Danemark et l'Allemagne vendent leurs surplus éoliens à des prix négatifs sur les marchés spot)^{B 2}, et à condition que les pays voisins n'aient pas eux aussi des surplus éoliens au même moment.

La valeur économique des éoliennes est fortement conditionnée par la qualité du site, en particulier de la force et surtout de la régularité du vent : ainsi, la France qui n'a encore équipé que ses meilleurs sites obtient de ses éoliennes un facteur de charge moyen de 21 à 24 % selon les années^{n 16}, alors que l'Allemagne, qui a déjà équipé de nombreux sites de second choix, n'a qu'un facteur de charge moyen de 18 à 19 %^{n 14} ; les éoliennes espagnoles, dont le facteur de charge dépasse 30 %, ont encore plus de valeur, et plus encore les éoliennes offshore, avec 35 à 45 %.

Prix et mécanismes de soutien

Coût

Le rapport publié par la CRE en avril 2014 sur les coûts et la rentabilité des énergies renouvelables²⁹ donne les éléments de coûts suivants :

- le coût d'investissement dans l'éolien terrestre : 1400 à 1 600 k€/MW entre 2008 et 2012, sans tendance claire à la baisse ;
- répartition de ces investissements : 72 % pour les éoliennes, 8 % pour les études, 10 % pour le génie civil, 4 % pour le raccordement, 3 % d'autres coûts de construction, 1 % de provisions pour démantèlement, 2 % de coûts financiers
- coûts d'exploitation : environ 45 k€/MW/an, dont la moitié pour la maintenance ;
- coût de production : entre 50 et 110 €/MWh (pour un taux d'actualisation de 8 %), en forte corrélation avec la durée annuelle de fonctionnement (50 € pour 4000 h, 100 € au-dessous de 2000 h).

La Cour des Comptes fournit, dans son rapport de juillet 2013 sur la politique de développement des énergies renouvelables, quelques éléments sur les coûts actualisés de l'éolien^{C 1} :

- parcs éoliens terrestres à implantations géographiques favorables : 60 à 68 €/MWh ; la Cour note que cet exemple, tiré de données fournies par un exploitant, montrent que les estimations de l'État sont souvent surévaluées (l'ADEME chiffre le coût de l'éolien terrestre entre 62 et 102 €/MWh) ;
- parcs éoliens en mer (côtes françaises) : 1,8 à 2,4 Mds € par parc, plus un milliard € de coût de raccordement pour l'ensemble des projets, soit un coût de production de 105 à 164 €/MWh, avec une forte incertitude.

L'EWEA (Association Européenne de l'Énergie Éolienne), qui regroupe les producteurs d'éoliennes européens, a publié en 2009 un rapport sur l'économie de l'énergie éolienne³⁰, dont voici les principaux résultats :

- structure du coût d'investissement d'une éolienne de 2 MW en 2006 : 1 227 €/kW dont 75,6 % pour la turbine, 9 % pour le raccordement au réseau, 6,5 % pour les fondations, etc ;
- comparaison avec les prix tirés des données de l'IEA pour divers pays : 1000 à 1 350 €/kW, le moins cher étant le Danemark ; la part de la turbine est de 68 % à 84 % du total ; les autres coûts sont très faibles au Danemark (16 %) ;
- évolution de ce coût : prévue en baisse de 1 300 €/kW à environ 800 €/kW en 2020 ;
- coûts d'exploitation (entretien, assurance, loyer du terrain, frais généraux, etc) : estimés à 1,2 à 1,5 c€/kWh ; ils baissent fortement en fonction de la taille des éoliennes ;
- coût total de production (actualisé sur 20 ans) : 11 c€/kWh à 5 €/kWh selon le coût d'investissement et les caractéristiques du site (vitesse moyenne du vent) ;
- part du coût d'investissement initial : 75 à 80 % du coût de production ;
- pour les sites de vent moyen (cas français), la fourchette de coût est de 6 à 8 c€/kWh, nettement inférieure au tarif d'achat français ;
- le coût décroît avec l'accroissement de la taille des éoliennes : pour un site côtier, de 9,2 c€/kWh pour les éoliennes de 95 kW des années 1980 à 5,3 c€/kWh pour les éoliennes récentes de 2 MW ; mais il a connu une hausse de 2006 à 2008 du fait de la saturation du marché (explosion des commandes) ;
- coût d'investissement des éoliennes offshore : 2000-2 200 €/kW (près du rivage, en eaux peu profondes) ;
- part de la turbine : 49 % du total, station de transformation et câble sous-marin jusqu'à la côte : 16 %, fondations : 21 %, etc ;
- coût de production : 6 à 9 c€/kWh.

Des comparaisons avec les coûts de production des centrales au charbon et au gaz danoises montrent que l'éolien terrestre devient moins cher si les prix des combustibles fossiles augmentent fortement (ce qui a été le cas) et si le coût de la tonne de CO₂ augmente également (hypothèse qui ne s'est pas réalisée).

Un rapport sur le coût des technologies de production à bas carbone, commandé par le Comité britannique sur le changement climatique, publié en mai 2011, fournit des estimations plus récentes : coût d'investissement : 1400 à 1 500 £/kW (1650 à 1 750 €/kW) pour l'éolien terrestre, 3 100 £/kW (3 650 €/kW) pour l'offshore ; coût actualisé de production : 83 à 90 £/MWh (9,8 à 10,6 c€/kWh) pour le terrestre et 169 £/MWh (19,9 c€/kWh) pour l'offshore ; prévision pour 2040 : 1200 à 1 300 €/kW (terrestre) et 2 100 €/kW (offshore) ; coût de production : 6 à 6,5 c€/kWh (terrestre) et 12 à 15 c€/kWh (offshore, avec des éoliennes de 20 MW) ; les coûts prévus pour le nucléaire (6 à 8 c€/kWh) et pour les cycles combinés gaz avec capture du CO₂ (12 c€/kWh) sont très proches de ceux des éoliennes³¹.

Toute comparaison entre le coût de l'électricité éolienne et celui des autres sources d'électricité devrait prendre en compte les moyens de production nécessaires pour compenser ses lacunes, en particulier ses fluctuations. Ce coût additionnel est peu élevé dans les pays qui disposaient déjà en abondance de barrages hydroélectriques (Suède, Islande, Québec, Brésil, etc) ; il est déjà plus élevé pour un pays comme le Danemark qui avait la chance d'être voisin de deux pays très bien dotés en barrages hydroélectrique (Suède et Norvège), mais a dû pour en profiter installer plusieurs câbles sous-marins à haute tension sous les détroits qui le sépare desdits pays¹⁸ ; il est encore plus élevé dans les pays qui sont obligés de construire des installations telles que des centrales de pompage-turbinage : ainsi, l'Allemagne a mis en service en 2004 la Centrale de Goldisthal (1 060 MW), qui a coûté 600 millions €, et 16 projets de centrales du même type et de tailles diverses sont répertoriés par l'article allemand Liste de centrales de pompage-turbinage - projets (de).

Le danois DONG Energy a emporté en juillet 2016 l'appel d'offres sur les champs de Borssele 1 et 2 (700 MW) aux Pays-Bas en proposant un prix de 72,70 €/MWh produit (hors raccordement) ; compte tenu du coût du raccordement au réseau à terre (câbles et sous-stations électriques), évalué entre 15 et 20 €/MWh, l'appel d'offres néerlandais passe très significativement sous la barre des 100 €/MWh qui constituait l'objectif que s'était fixé la profession pour 2020. En France, les premiers appels d'offres d'éoliennes en mer (six champs d'environ 500 MW chacun) ont été attribués autour de 200 €/MWh³².

En août 2016 au Chili, lors d'un appel d'offres portant sur 20 % de la consommation d'électricité du pays, le prix de l'éolien est tombé à 38,1 €/MWh, prix inférieur à ceux des centrales à charbon et à gaz. La baisse des coûts de financement a largement contribué à ce record de baisse des prix³³.

Au Maroc, grâce aux conditions exceptionnelles de la côte atlantique, Nareva a pu offrir en 2016 un tarif record inférieur à 30 €/MWh pour l'appel d'offres éolien d'une puissance totale de 850 MW, dont il est lauréat aux côtés de Siemens et Enel³⁴.

En Allemagne, le premier appel d'offres pour les parcs éoliens en mer (1 550 MW) a donné le 13 avril 2017 un résultat inattendu : trois projets sur les quatre attribués se passeront totalement de subventions, les attributaires Dong et EnBW vendront au prix du marché la production des parcs OWP West, Borkum Riffgrund West 2 et He Dreiht ; le quatrième parc, Gode Wind 3, a été attribué à Dong avec une prime de 60 €/MWh. Le prix du marché s'est élevé en moyenne à 29 €/MWh en 2016. Ces prix très bas, qui n'incluent pas les coûts de raccordement au réseau, s'expliquent par l'échéance lointaine de la mise en service des parcs : 2024, qui laisse aux fournisseurs le temps de développer la prochaine génération de turbines dont la puissance devrait être de 13 à 15 MW contre 8 à 9 MW pour les turbines actuelles ; de plus, le régime des vents est particulièrement favorable pour ces parcs, qui bénéficieront de surcroît de synergies avec les parcs voisins exploités par Dong ; enfin, l'Allemagne a planifié ses appels d'offres jusqu'à 2030, assurant aux candidats un volume d'affaires qui leur permet de baisser leur prix ; l'État prend en charge les études de risques techniques³⁵.

Puissance installée et production

Données de synthèse mondiale















Production éolienne

En 2014, la production mondiale d'électricité éolienne s'élevait à 717,8 TWh, en augmentation de 11,1 % par rapport à 2013 après +21,8 % de 2012 à 2013 ; elle représentait 3,0 % de la production totale d'électricité³⁶. Selon les estimations de BP, elle atteignait 959,5 TWh en 2016, soit 3,9 % de la production mondiale d'électricité³⁷.

En 2012, la production mondiale avait augmenté de 18,3 % par rapport à 2011 ; son taux moyen annuel d'accroissement depuis 10 ans a été de 26,1 % ; elle représentait 11,4 % de la production totale d'électricité renouvelable et 2,4 % de la production mondiale d'électricité³⁸.

L'énergie éolienne est la deuxième source d'électricité renouvelable après l'hydraulique. L'Europe de l'Ouest est en 2012 la première région productrice avec 36,8 %, devant l'Amérique du Nord (28,6 %) et l'Asie de l'Est et du Sud-Est (23,3 %) ; l'Asie du Sud (5,6 %), l'Europe Centrale (2,1 %) et l'Océanie (1,5 %) ont amorcé leur démarrage depuis quelques années ; l'Amérique centrale (0,7 %), l'Afrique du Nord (0,4 %), l'Afrique Subsaharienne (0,04 %) et le Moyen-Orient (0,04 %) sont encore peu impliqués. La production a été multipliée par dix en une décennie ; les taux moyen de croissance sur 10 ans sont particulièrement élevés en Asie de l'Est et du Sud-Est (+57,5 % par an) et en Amérique du Nord (+30,4 %), qui rattrapent rapidement l'Europe de l'Ouest (+18,4 %). En 2012, la filière éolienne a été, après l'hydraulique, la seconde par sa contribution à la croissance de la production d'électricité renouvelable (30 %)³⁹.

Évolution de la production d'électricité éolienne (TWh)

Pays	1990	2000	2010	2011	2012	2013	2014	% 2014*	2016p**
 Chine	0,002	0,6	44,6	70,3	96,0	141,2	156,1	21,8	241,0
 États-Unis	3,1	5,6	95,1	120,9	141,9	169,7	183,9	25,6	226,5
 Allemagne	0,07	9,4	37,8	48,9	50,7	51,7	57,4	8,0	79,8
 Espagne	0,014	4,7	44,3	42,9	49,5	55,6	52,0	7,3	50,2
 Inde	0,03	1,7	19,7	24,5	30,1	33,6	37,2	5,2	44,8
 Royaume-Uni	0,01	0,9	10,2	15,5	19,7	28,4	32,0	4,5	37,3
 Brésil	-	0,002	2,2	2,7	5,1	6,6	12,2	1,7	32,9
 Canada	-	0,3	8,7	10,2	11,3	18,0	22,5	3,1	27,2
 France	-	0,08	9,9	12,2	15,0	16,0	17,2	2,4	20,7
 Italie	0,002	0,6	9,1	9,9	13,4	14,9	15,2	2,1	17,5
 Suède	0,006	0,5	3,5	6,1	7,2	9,8	11,2	1,6	14,2
 Danemark	0,6	4,2	7,8	9,8	10,3	11,1	13,1	1,8	12,8
 Portugal	0,001	0,17	9,2	9,2	10,3	12,0	12,1	1,7	12,6
 Pologne	0	0,005	1,7	3,2	4,7	6,0	7,7	1,1	11,6
Total mondial	3,9	31,4	341,3	435,3	522,7	636,8	717,3	100	959,5
% prod.élec.*	0,03	0,2	1,6	2,0	2,3	2,7	3,0		3,9

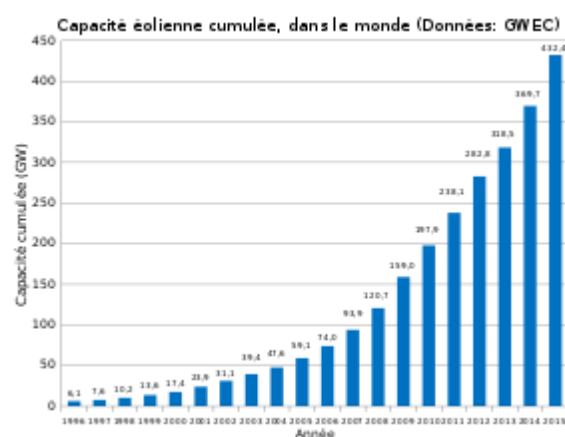
* part dans la production mondiale d'électricité ; ** 2016 : estimation

Sources : 1990-2014 : Agence internationale de l'énergie³⁶ ; 2016 : EurObserv'ER^{e 1} pour l'Europe, Energy Information Administration⁴⁰ pour les États-Unis, BP³⁷ pour le reste du monde.

Puissance installée

La puissance installée n'est pas un indicateur fiable pour les comparaisons entre les diverses filières énergétiques ou entre pays, car un MW utilisé en continu dans une centrale nucléaire, à charbon ou à gaz produit deux à cinq fois plus qu'un MW d'éoliennes, qui ne fonctionne que lorsque le vent souffle suffisamment fort ; les pays qui n'utilisent pour l'éolien que les sites les plus ventés, tels que les États-Unis, ont un ratio production/puissance installée deux fois plus élevé que ceux qui installent des éoliennes même sur des sites peu ventés, comme l'Allemagne ; enfin, certains pays tels que la Chine incluent dans leurs statistiques de puissance installée des éoliennes terminées mais non encore raccordées au réseau.

À la fin 2016, le total mondial de la puissance installée éolienne atteignait 486,7 GW (432,7 GW fin 2015), en augmentation de 54,6 GW en un an contre +63,0 GW en 2015, soit +12,6 % après +17 % en 2015, +16,2 % en 2014 et +12,4 % en 2013). La Chine a installé à elle seule 23,3 GW, soit 42,7 % du total 2016 (48,4 % en 2015, 45,2 % en 2014), et représente 34,7 % du parc mondial fin 2016 contre 33,6 % fin 2015 et 31 % fin 2014^{g 1}. En 2016, le marché éolien mondial a ralenti sa croissance avec 54 GW installés dans l'année ; la Chine est restée en tête avec 23,3 GW contre 30 GW en 2015, année marquée par un rush avant la mise en place de réductions des tarifs garantis ; aux États-Unis, les 8,2 GW mis en service portent le parc à 82 GW ; l'Union européenne a installé 12,5 GW, dont 5,4 GW en Allemagne et 1,5 GW en France⁴¹.



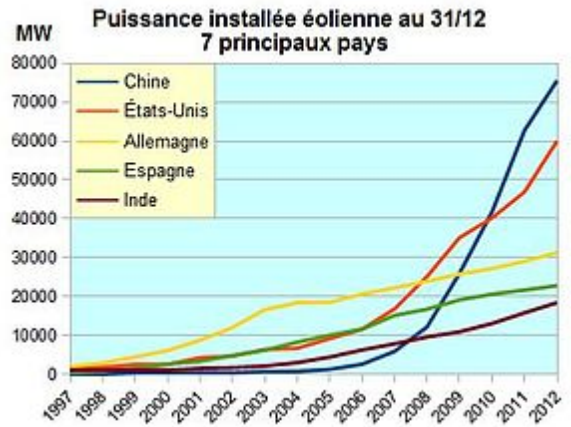
Capacité (puissance installée en MW) éolienne cumulée, de 1995 à 2015 dans le monde.

EurObserv'ER donne des estimations un peu plus précises : 62,73 GW de nouvelles installations en 2015 moins 0,27 GW de mises hors service. La puissance installée dans l'Union européenne durant l'année 2015 a été de 12,52 GW contre 33,61 GW en Asie, 10,82 GW en Amérique du Nord et 3,65 GW en Amérique latine. L'Asie a représenté 53,6 % du marché, l'Europe 21,6 % et l'Amérique du Nord 17,2 %^{e 2}.

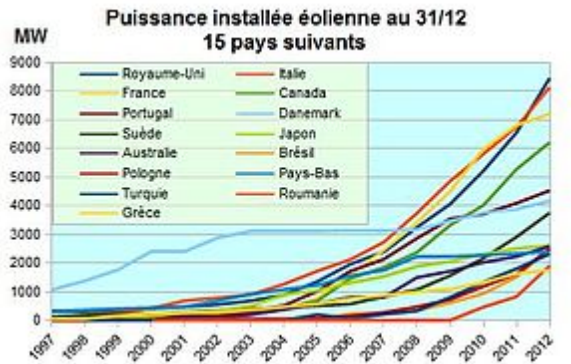
En 2014 : (52,13 GW de mises en service moins 0,56 GW de mises hors service ; en 2013, les mises en service avaient été de près de 37 GW ; le marché a donc fait un bond de 41 % ; la puissance installée dans l'Union européenne durant l'année 2014 a été de 12,44 GW. L'Asie a représenté 50,2 % du marché, l'Europe 25,8 % et l'Amérique du Nord 13,9 % ; les autres régions montent en puissance avec 10,1 % au total. La puissance cumulée de l'Asie dépasse pour la première fois celle de l'Europe avec 142,1 GW (38,3 %) contre 135,6 GW (36,5 %), l'Amérique du Nord totalisant 77,95 GW (21 %). La Chine à elle seule a installé 23,35 GW, soit 45 % du marché mondial, suivie de très loin par l'Allemagne : 6,2 GW et les États-Unis : 4,85 GW⁴².

À la fin 2013, la puissance installée éolienne mondiale atteignait 318,6 GW, en augmentation de 35,6 GW en un an (+12,4 %), dont 11,3 GW pour l'Union européenne ; le marché a connu un net ralentissement, pour la première fois dans l'histoire de l'ère industrielle de l'éolien : les installations en 2012 avaient totalisé 44,2 GW, dont 11,8 GW pour l'UE ; cette baisse du marché est due surtout à l'écroulement du marché des États-Unis (1 084 MW contre 13 078 MW en 2012), à cause de la reconduction très tardive du système d'incitation fédéral ; le marché européen a légèrement fléchi en raison de l'adoption par plusieurs gouvernements de nouvelles politiques moins favorables ; par contre, la Chine a représenté à elle seule près de la moitié du marché mondial : 16,1 GW. L'Europe a eu en 2013 une part de marché de 34,1 %, derrière le marché asiatique (51,2 % contre 35,6 % en 2012), et loin devant le marché nord-américain qui a chuté à 9,3 % contre 31,4 % en 2012. L'Europe reste cependant en tête pour la puissance totale en fonctionnement : 38,3 % contre 36,4 % pour l'Asie et 22,3 % pour l'Amérique du Nord⁴³.

Les fermes éoliennes en mer (éolien offshore) prennent une part grandissante dans cet essor, en particulier en Europe. Fin 2016, la puissance installée d'éolien offshore atteignait 14 384 MW (12 167 MW en 2015, 8 771 MW en 2014), dont 5 156 MW au Royaume-Uni, 4 108 MW en Allemagne, 1 627 MW en Chine, 1 271 MW au Danemark, 1 118 MW aux Pays-Bas, 712 MW en Belgique et 202 MW en Suède ; la progression du parc en 2016 a été de 2 219 MW (3 392 MW en 2015), dont 813 MW en Allemagne, 691 MW aux Pays-Bas, 592 MW en Chine, 56 MW au Royaume-Uni, 30 MW aux États-Unis et 30 MW en Corée du Sud^{8 2}.



Évolution de la puissance installée éolienne au 31/12/n en MW (5 principaux pays).
Source : The Wind Power

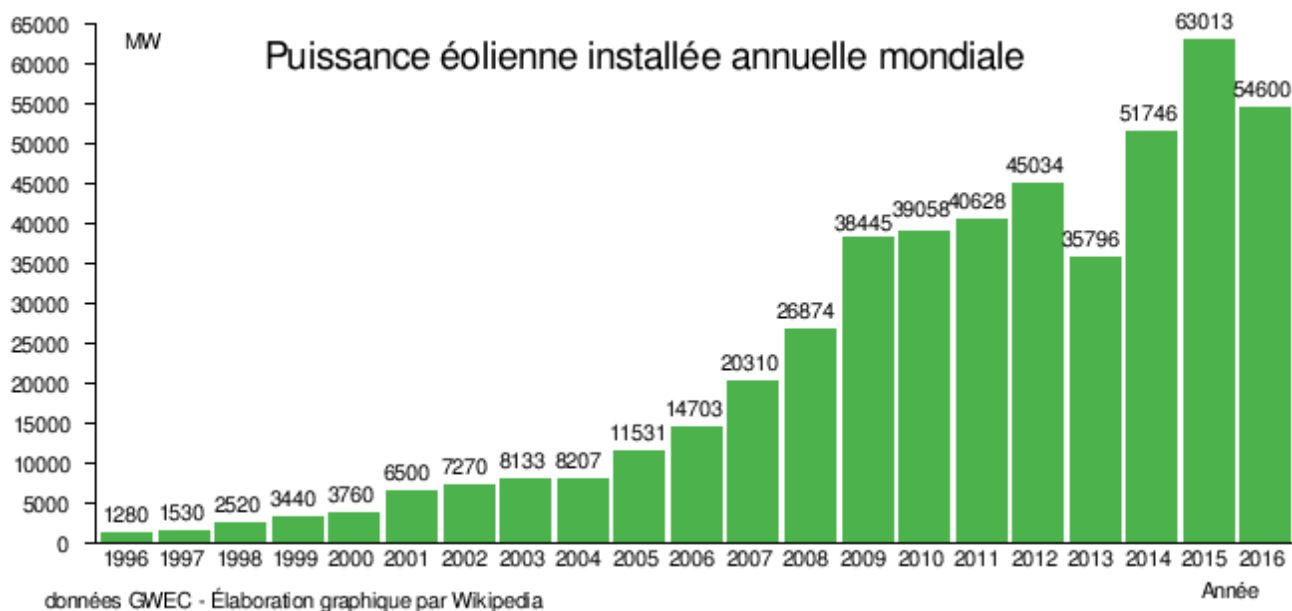


Évolution de la puissance installée éolienne au 31/12/n en MW : 15 pays suivants.
Source : The Wind Power

Puissance éolienne installée - évolution de 1997 à 2016

Pays	1997	2000⁴⁴	2005⁴⁵	2010	2011⁴⁶	2012	2013⁴⁷	2014⁴⁸	2015	2016^{g 1}
 Chine	146	352	1 266	41 800	62 733	75 564	91 412	114 604	145 362	168 690
 États-Unis	1 673	2 564	9 149	40 200	46 919	60 007	61 110	65 877	73 991	82 184
 Allemagne	2 081	6 095	18 500	27 191	29 060	31 332	34 250	39 128	44 941	50 018
 Inde	940	1 267	4 430	13 065	15 800	18 421	20 150	22 465	25 088	28 700
 Espagne	427	2 535	10 028	20 623	21 674	22 796	22 959	23 025	23 025	23 074
 Royaume-Uni	319	409	1 353	5 204	6 540	8 445	10 711	12 633	13 809	14 543
 France	10	68	757	5 970	6 800	7 196	8 243	9 285	10 505	12 066
 Canada	25	137	683	4 008	5 265	6 200	7 823	9 694	11 219	11 900
 Brésil	3	22	29	931	1 509	2 508	3 466	5 962	8 726	10 740
 Italie	103	427	1 718	5 797	6 737	8 124	8 558	8 663	8 975	9 257
 Suède	127	241	509	2 163	2 907	3 745	4 382	5 425	6 029	6 520
 Turquie		19	201	1 329	1 799	2 312	2 958	3 738	4 694	6 081
 Pologne	2	5	73	1 180	1 616	2 497	3 390	3 834	5 100	5 782
 Portugal	38	83	1 022	3 706	4 083	4 525	4 730	4 947	5 050	5 316
 Danemark	1 066	2 417	3 128	3 749	3 871	4 162	4 807	4 881	5 064	5 228
 Pays-Bas	319	440	1 224	2 269	2 328	2 391	2 671	2 865	3 443	4 328
 Australie	4	30	579	2 020	2 224	2 584	3 239	3 807	4 187	4 327
 Mexique							1 859	2 359	3 073	3 527
 Japon	18	142	1 040	2 304	2 501	2 614	2 669	2 794	3 038	3 234
 Roumanie		0	1	462	826	1 905	2 600	2 953	2 976	3 028
 Irlande	53	119	495	1 428	1 631	1 738	2 049	2 262	2 446	2 830
 Autriche							1 684	2 089	2 404	2 632
 Belgique						1 375	1 722	1 959	2 229	2 386
Total mondial	7 482	18 040	59 135	194 680	237 502	282 398	318 596	369 695	432 680	486 749

Voici l'historique des installations annuelles de 1996 à 2016^{g 1} :



En 2010 la Chine a détrôné les États-Unis avec 42 GW de puissance installée contre 40 GW.

En 2008, les États-Unis sont devenus le premier pays pour la capacité d'énergie éolienne avec 25 170 MW installés devant l'Allemagne (23 902 MW⁴⁹). Ce secteur employait alors environ 85 000 Américains⁴⁹.

Europe

Le parc éolien installé en Europe représente en 2016 153,7 GW, qui fournissent cette année-là 10,4 % de la consommation électrique du continent^{50,51}.

Amérique

En 2016, l'Amérique est placée au 3^e rang du classement des continents par puissance éolienne installée avec 112 907 MW, soit 23,2 % du total mondial, dont 97 611 MW pour l'Amérique du Nord et 15 296 MW pour l'Amérique Latine ; au cours de l'année, cette puissance installée s'est accrue de 12 438 MW (Amérique du Nord : 9 359 MW, Amérique Latine : 3 079 MW), soit +12,4 % et 26,5 % du total mondial des mises en services de l'année. Les États-Unis restent largement en tête avec 82 184 MW, soit 72,8 % du total du continent américain ; les 8 203 MW qu'ils ont mis en service en 2016 représentent 66 % du total américain^{g 1}.

États-Unis :

Canada :

Brésil :

Les autres pays ayant un parc éolien significatif sont^{g 1} :

- le Mexique : 3 527 MW, en progression de 454 MW en 2016 ;
- le Chili : 1 424 MW, en progression de 513 MW en 2016 ;
- l'Uruguay : 1 210 MW, en progression de 365 MW en 2016 ;
- l'Argentine : 279 MW ;
- le Costa Rica : 298 MW ;
- le Panama : 270 MW ;
- le Pérou : 241 MW ;
- le Honduras : 176 MW ;
- la République Dominicaine : 135 MW.

Asie

En 2016, l'Asie a conforté son rang en tête du classement des continents par puissance éolienne installée avec 203 643 MW, soit 41,8 % du total mondial ; au cours de l'année, cette puissance installée s'est accrue de 27 680 MW, soit +15,7 % et 50,7 % du total mondial des mises en services de l'année. La Chine a elle seule représente 82,8 % du total installé en Asie fin 2016 et 84,3 % des installations de l'année. L'Inde suit loin derrière avec 28 700 MW (14,1 % du cumul et 13 % de l'accroissement)^{g 1}.

Chine :

Inde :

Les autres pays ayant un parc éolien significatif sont^{g 1} :

- le Japon : 3 234 MW ;
- la Corée du Sud : 1 031 MW ;
- Taïwan : 682 MW ;
- le Pakistan : 591 MW ;
- la Thaïlande : 223 MW ;
- les Philippines : 216 MW.

Le premier parc du Pakistan a été mis en service en 2012, avec 33 turbines Nordex fournissant 49,5 MW, le second en 2013 : 28 machines Vestas, 56,4 MW. Trois autres sont nés en 2014, totalisant 149,5 MW (100 MW pour Nordex et 49,5 MW pour Goldwind). Fin 2014, le pays comptait donc 256 MW, en progression de 141,6 % par rapport à 2013. Depuis, plusieurs nouveaux contrats ont été signés : deux parcs situés dans la région de Sindh avec 40 éoliennes Nordex de 2,5 MW, mis en service à l'été 2016 ; un autre de 30 MW de turbines Goldwind prévu pour fin 2016 ; Vestas a signé un protocole d'accord pour développer entre 100 et 300 MW dans le pays⁵².

Afrique

La puissance éolienne installée en Afrique a progressé de 12 % en 2016 (30 % en 2015, 58 % en 2014), passant de 1 612 MW fin 2013 à 2 536 MW fin 2014, 3 488 MW fin 2015 et 3 906 MW en 2016 ; plus de la moitié du bond en avant de 934 MW en 2014 s'est produit en Afrique du Sud : +560 MW et près d'un tiers au Maroc : +300 MW ; en 2015, l'Afrique du Sud a encore contribué pour 64 % à la progression du parc africain avec +483 MW, suivie par l'Éthiopie : +153 MW ; en 2016, la totalité des mises en service ont été effectuées en Afrique du Sud : +418 MW^{g 1}.

L'**Afrique du Sud** se place au 1^{er} rang avec 1 471 MW installés fin 2016 contre 1 053 MW fin 2015, 570 MW fin 2014 et 10 MW fin 2013^{g 1} ; après avoir mis une décennie pour installer ces premiers 10 MW d'éoliennes, elle était en 2013 en train de développer 3 000 MW à 5 000 MW de projets éoliens, dont 636 MW en construction et 562 MW proches de leur bouclage financier ; le plan directeur énergétique (*Power Sector Integrated Resource Plan 2010-2030*) prévoit 9 000 MW éoliens d'ici 2030⁵³.

Le projet le plus avancé est le parc éolien de Sere, construit par la compagnie électrique nationale Eskom sur la côte ouest à 300 km au nord de la ville du Cap ; sa puissance de 106 MW (46 turbines Siemens de 2,3 MW) lui permettra de produire 240 à 300 GWh par an (facteur de charge : 26 à 32 %)^{54,55}.

L'**Égypte** se place au second rang en Afrique avec 810 MW fin 2016, suivie du **Maroc** avec 787 MW ; au 4^e rang arrive l'**Éthiopie** avec 324 MW, suivie de la **Tunisie** avec 245 MW^{g 1}.

Le Maroc avait en (2007) 140 MW de puissance installée ; 280 MW en 2009⁵⁶ ; 291 MW en 2012 (sans changement par rapport à 2011), 487 MW fin 2013 et 787 MW fin 2014, soit un bond de 62 % en un an^{g 1} ; la production d'électricité éolienne atteignait 1 356 GWh en 2013 contre 728 GWh en 2012⁵⁷.



Parc éolien d'Amogdoul près d'Essaouira au Maroc.

Le Parc de Tarfaya, en production concessionnelle, avec 131 éoliennes d'une puissance totale de 300 MW, est en cours de mise en service progressive jusqu'à octobre 2014 par une joint-venture entre le société marocaine Nareva et GDF Suez⁵⁸. Il devient ainsi le plus grand parc éolien marocain et africain, reléguant à la deuxième place au niveau national celui de Tanger, composé de 165 aérogénérateurs d'une puissance de 140 MW⁵⁹.

L'initiative 1 000 MW⁶⁰ est un programme qui consiste en la sélection d'un portefeuille de sites qualifiés pour la réalisation de futurs parcs éoliens. Les sites du projet sont situés dans les régions nord et sud du pays : Tinguir, Boujdour, Tarfaya, Tarfaya sud (Tah), Laayoune (Tiskrad et Foum Al Wad), Bouzerktoun, Sendouk, Nouinouich, Fardiwa, Aïn Armel, Haouma, Fnideq et le site de Midelt.

Le Maroc prévoit pour 2020 des parcs éoliens fournissant 12 % de sa consommation d'électricité, soit environ 2 000 MW.

L'**Éthiopie**, a inauguré le 26 octobre 2013 la ferme éolienne d'Ashegoda dans le nord du pays : avec 84 turbines installées sur 100 km² d'une puissance de 120 MW, soit 400 GWh distribués par an (soit 8 % de la production d'électricité éthiopienne), c'est le plus grand parc éolien d'Afrique sub-saharienne ; il a été installé par l'entreprise française Vergnet, qui a sous-traité au géant français Alstom, pour 54 turbines d'une puissance de 1,67 MW s'ajoutant aux 30 éoliennes Vergnet de 1 MW installées en 2011⁶¹. Le gouvernement éthiopien a décidé de privilégier les énergies renouvelables (solaire, géothermique et hydraulique notamment) pour développer le secteur énergétique tout en respectant l'environnement. Une firme chinoise installe notamment un autre parc éolien d'une capacité deux fois supérieure au site d'Ashegoda dans le sud du pays. Actuellement, la capacité de production du pays est d'environ 2 200 MW, le gouvernement espère atteindre les 10 000 MW pour 2015 grâce à la mise en service prochaine de nouvelles installations⁶². Le parc d'Ashegoda, situé à 2 200 mètres, sur des hauts plateaux où le vent souffle toute l'année, représente un investissement de 210 millions d'euros, financés en partie par l'Agence française de développement (AFD). En 2011, l'Éthiopie avait déjà inauguré la ferme éolienne d'Adama, financée par des investisseurs chinois, avec une puissance de 51 mégawatts⁶³.

Océanie

La puissance éolienne installée en Océanie a progressé de 2,9 % en 2016 ; elle est passée de 3 874 MW fin 2013 à 4 442 MW fin 2014, 4 823 MW fin 2015 et 4 963 MW fin 2016 ; la totalité de la progression de 140 MW en 2016 revient à l'Australie, qui détient 4 327 MW, soit 87,2 % du total ; la Nouvelle-Zélande a 623 MW installés^{g 1}.

Sociétés

Producteurs d'énergie éolienne

Les principaux producteurs d'énergie éolienne dans le monde étaient à la fin 2007⁶⁴ :

- Iberdrola (Espagne) (plus de 5 000 mégawatts installés)
- NextEra Energy Resources (États-Unis) (4 000 MW)
- Acciona (Espagne) (plus de 2 000 MW)
- Babcock & Brown (Australie) (1 500 MW)
- EDF Énergies Nouvelles (France) (1 218 MW)
- Endesa (Espagne) (plus de 1 000 MW)
- EDP (Portugal) (plus de 1 000 MW)

Au 30 juin 2013 :

- Iberdrola annonce 17 355 MW de puissance installée terrestre, dont : 5 735 MW en Espagne, 5 443 MW aux États-Unis, 1 267 MW au Royaume-Uni et 1 310 MW dans le reste du monde ; en offshore : 6 110 MW en développement, dont 79 % au Royaume-Uni, 13 % en Allemagne et 8 % en France⁶⁵.

- NextEra Energy Resources annonce plus de 10 000 MW sur 100 parcs éoliens dans 19 états des États-Unis et au Canada⁶⁶.
- Acciona annonce 6 291 MW de puissance installée (plus 1 472 MW installés pour des clients), dont 4 073 MW en Espagne, et une part de marché de 3 % de la puissance installée dans le monde⁶⁷.
- Babcock & Brown a fait faillite en 2009 ; sa liquidation est en cours de finalisation en 2013⁶⁸.
- EDF Énergies Nouvelles annonce 5 525 MW de puissance installée, dont : 1 767 MW aux États-Unis, 769 MW en France (+40 MW en construction), 432 MW au Royaume-Uni (+62 MW en construction), 548 MW en Italie, 496 MW au Portugal, 334 MW en Turquie (+170 MW en construction), 325 MW en Belgique, 316 MW en Grèce (+69 MW en construction), 255 MW au Canada (+775 MW en construction), 231,5 MW au Mexique (+160 MW en construction)⁶⁹.
- Endesa a été racheté en 2007 par l'italien ENEL, qui annonce 3 573 MW dont 1 640 MW en Espagne, 623 MW en Italie, 605 MW en Amérique du Nord, 265 MW en Roumanie, 172 MW en Grèce, 166 MW en France et 102 MW en Amérique latine⁷⁰.
- EDP a regroupé ses activités dans les énergies renouvelables dans une filiale EDP Renewables qui annonce 3 637 MW installés aux États-Unis (plus 8 393 MW en projet), 2 310 MW installés en Espagne (plus 3 689 MW en projet), 1 005 MW au Portugal, 350 MW en Roumanie, 314 MW en France, et des parcs plus petits en Pologne, Belgique, Brésil, Italie, Royaume-Uni et au Canada⁷¹.
- en Chine, la compagnie China Power Investment Corporation, un des cinq « Gencos » (producteurs d'électricité), annonce 3 186 MW d'éoliennes à fin 2012 (4 % de sa puissance installée totale)⁷².

Fabricants d'éoliennes

Avenir : projets et perspectives

La technologie

La montée du prix des énergies fossiles a rendu les recherches dans le domaine de l'éolien plus attirantes pour les investisseurs.

La technologie actuellement la plus utilisée pour capter l'énergie éolienne utilise une hélice sur un axe horizontal. Certains prototypes utilisent un axe de rotation vertical : une nouvelle technologie à axe vertical est celle du *Kite wind generator* (inspirée du kitesurf) qui, pour capter un vent le plus fort possible, utilise des câbles et des ailes qui peuvent arriver à 800/1 000 m de hauteur⁷³.

La technologie à axe horizontal présente certains inconvénients :

- L'encombrement spatial est important, il correspond à une sphère d'un diamètre égal à celui de l'hélice, reposant sur un cylindre de même diamètre. Un mât de hauteur importante est nécessaire pour capter un vent le plus fort possible.
- Le vent doit être le plus régulier possible, et donc interdit des implantations en milieu urbain ou dans un relief très accidenté.
- La vitesse de l'extrémité d'une pale croît rapidement avec sa taille, au risque de causer défauts de fonctionnement et bruits pour le voisinage. Dans la pratique, les pales des grandes éoliennes ne dépassent jamais une vitesse de l'ordre de 100 m/s à leur extrémité. En fait, plus l'éolienne est grande, et moins le rotor tourne vite (moins de 10 tours par minute pour les grandes éoliennes offshore).

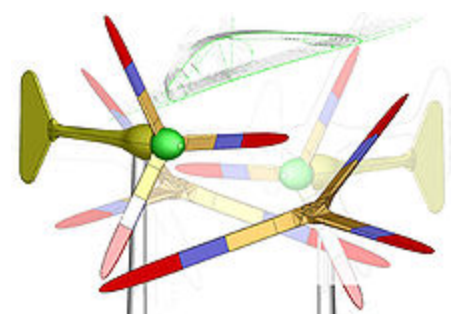


Schéma des pales d'une petite éolienne

Les nouvelles éoliennes en cours de développement visent à aboutir à une technologie qui s'affranchit du bruit, de l'encombrement et de la fragilité des éoliennes à pales, tout en étant capables d'utiliser le vent quelle que soit sa direction et sa force. De nombreuses variantes sont étudiées par des essais réels en grandeur nature. Certaines éoliennes sont de petite taille (3 à 8 mètres de large, 1 à 2 mètres de haut), avec pour objectif de pouvoir les installer sur les toitures terrasses des immeubles d'habitation dans les villes, ou sur les toitures des immeubles industriels et commerciaux, dans des gammes de puissances allant de quelques kW à quelques dizaines de kW de puissance moyenne. Leur vitesse de rotation est faible et indépendante de la vitesse du vent. Leur puissance

varie avec le cube de la vitesse du vent (la vitesse du vent élevée à la puissance 3) : quand la vitesse du vent double, la puissance est multipliée par 8. La vitesse du vent peut varier de 5 km/h à plus de 200 km/h sans nécessiter la « mise en drapeau » des pales.

Rendement des éoliennes

Les éoliennes sont caractérisées par leur rendement en fonction de la vitesse du vent. Les éoliennes actuelles présentent une courbe plafonnée et limitée à des vents de moins de 90 km/h.

L'Ademe a commandé un rapport à la société Climpect. Les résultats de ce rapport indiquent que sous l'effet du réchauffement climatique, les vents servant à la production éolienne d'énergie devraient diminuer de près de 10 % d'ici à 2100.

L'éolien en mer

L'installation de fermes éoliennes en mer est l'une des voies de développement de l'éolien, car elle s'affranchit en grande partie du problème des nuisances esthétiques et de voisinage. D'autre part le vent est beaucoup plus fort et constant qu'à terre : un site en Mer du Nord⁷⁴ a montré par exemple un fonctionnement sur 96 % du temps, permettant un facteur de charge moyen de 0,37. Cette solution permet le développement technique progressif d'éoliennes de très grande puissance.

Ainsi, la production d'électricité éolienne en mer est plus importante qu'à terre à puissance nominale équivalente. On donne couramment comme moyenne 2 500 MWh par MW installé en mer au lieu de 2 000 MWh par MW installé à terre. Dans les zones maritimes géographiquement très favorables à l'éolien, les estimations des études indiquent le potentiel de cas extrêmes de 3 800 MWh par MW installé. Mais le coût d'investissement demeure en moyenne 20 % plus élevé que pour les éoliennes dites « classiques ».

Diverses solutions sont envisagées pour diminuer le coût du kWh produit. Parmi les solutions étudiées, on peut noter :

- la construction d'éoliennes de plus grande puissance, produisant de 5 à 10 MW par unité ;
- la mise au point de systèmes flottants, ancrés, permettant de s'affranchir des coûts des fondations de pylônes à grande profondeur.

Les projets des futures éoliennes en mer, à l'horizon 2010, visent une puissance de 10 MW unitaire, avec un diamètre de pales de 160 mètres.

Les premiers parcs éoliens en mer ont été construits à moins de 35 m de profondeur et de 40 km des côtes ; les nouveaux projets s'éloignent de plus en plus (jusqu'à 100 km) et s'aventurent en eau profonde (jusqu'à 50 m) ; les projets en eau profonde sont surtout nombreux au Japon (9 projets), en France (5 projets), en Espagne (5), en Norvège (4) et aux États-Unis (4)⁷⁵.

Une option permettant de réduire le coût d'investissement au kW installé pourrait être à terme de coupler sur le même pylône une éolienne offshore et une ou plusieurs hydroliennes.

En France, la Compagnie du vent a annoncé en novembre 2006 son projet de parc des Deux Côtes, un ensemble de 141 éoliennes totalisant 705 MW, à 14 km au large de la Seine-Maritime et de la Somme. En Angleterre, le consortium *London Array* a un projet à 20 km de l'embouchure de la Tamise, qui représenterait 271 turbines pour une puissance allant jusqu'à 1 000 MW⁷⁶. Avec le projet additionnel de Thanet, c'est maintenant 1 800 MW qui devraient être installés dans l'estuaire de la Tamise. Le projet britannique de Triston Knol fera quant à lui 1 200 MW.

La compagnie norvégienne Norsk Hydro, spécialiste dans l'exploitation pétrolière et gazière offshore, développe un concept issu des plateformes pétrolières flottantes. Le principe est de monter l'éolienne sur un caisson flottant en béton (ancré au moyen de câbles, par 200 à 700 m de fond). Ce projet révolutionnerait l'éolien offshore, car il permettrait de ne plus se soucier de la profondeur, et donc d'installer des champs géants (jusqu'à

1 GW de puissance installée) loin des côtes. Cela permettrait par ailleurs de réduire le prix des champs éoliens offshore, en évitant la construction de coûteuses fondations sous-marines et de réduire les émissions de gaz à effet de serre dues à la mise en place des fondations⁷⁷.

L'éolien urbain

L'éolien urbain est un concept consistant à installer et exploiter des éoliennes en milieu urbain. L'éolien urbain recherche des turbines éoliennes compactes capables de proposer une production d'électricité décentralisée, qui s'affranchirait du transport et des pertes générées.

De nombreux progrès ont été effectués au sujet des éoliennes urbaines, de nombreuses innovations ont vu le jour, et le nombre d'installations d'éoliennes en ville est en très forte hausse. La caractéristique la plus importante pour une éolienne urbaine, est l'absence d'obligation de son orientation par rapport à la direction du vent. En effet, en ville les vents sont très perturbés par l'environnement (bâtiments...), il est donc nécessaire que l'éolienne n'ait pas constamment à chercher la direction du vent, sans quoi sa production est grandement diminuée. L'installation d'éoliennes à axe vertical semble pour le moment être la solution la plus adaptée au milieu urbain.

Les concepteurs ont également mis au point des prototypes sur lesquels il n'y a plus de pales comme celles d'une hélice d'avion, mais un rotor fixé à ses deux extrémités, équipé de lames pour procurer un couple constant quelle que soit leur position par rapport à l'axe du vent. Dans certains projets un stator extérieur est ajouté au rotor, élément fixe destiné à dévier la course du vent afin d'optimiser le rendement de l'ensemble. La conception mécanique des turbines éoliennes les rend résistantes aux vents violents, et les affranchit du besoin d'être arrêtées quand le vent dépasse la vitesse de 90 km/h. Leur production est quasiment proportionnelle à la vitesse du vent jusqu'à plus de 200 km/h, sans palier limitant comme sur les éoliennes classiques. Certaines éoliennes intègrent enfin la sustentation magnétique afin de réduire les frottements et ainsi d'augmenter le rendement de l'aérogénératrice.



Éolienne urbaine de deux mètres de diamètre, puissance 1,75 kW à 14 m/s, à Saint-Sébastien (Espagne), 2010.

Projection des productions électriques mondiales éoliennes

La directive européenne 2009/28/CE sur l'énergie renouvelable de 2009, composante du Paquet climat-énergie, demande aux 27 états membres de lui présenter leur Plan d'Action National Énergie Renouvelable (NREAP) ; les 27 plans ont été soumis à la Commission européenne le 4 janvier 2011. L'addition des objectifs de ces plans pour l'éolien donne un total de 213 GW de puissance installée en 2020, produisant 495 TWh, soit 14 % de la demande d'électricité totale⁷⁸.

La Commission européenne a également établi son propre scénario de référence, qui prévoit 222 GW de puissance installée en 2020, produisant 525 TWh, soit 14,2 % de la demande d'électricité totale⁷⁸.

Les projections de l'EWEA⁷⁸ annoncent pour 2020 dans l'Union européenne :

- scénario de base : puissance installée de 230 GW, production de 581 TWh, soit 15,7 % de la demande d'électricité totale, dont 4 % en offshore ;
- scénario haut : puissance installée de 265 GW, production de 682 TWh, soit 18,4 % de la demande d'électricité totale (offshore : 4,2 %).

Pour 2030, l'EWEA prévoit 400 GW d'éoliennes (250 GW à terre et 150 GW en mer) produisant 1 154 TWh, dont 591,3 TWh à terre et 562,4 TWh en mer ; la part de l'éolien dans la production d'électricité atteindrait alors 28,5 %⁷⁸.

Le *Global Wind Energy Council* (GWEC), dans une étude de 2012, prévoyait 3 scénarios, « référence (IEA new policies) », « modéré », « avancé », prévoyant une production mondiale 2020 respectivement de 1 439 TWh, 1 863 TWh et 2 821 TWh et pour 2030 de 2 412 TWh, 4 251 TWh et 6 678 TWh ; pour l'Europe (OCDE) elle prévoit 211 GW à 263 GW en 2020 et 288 GW à 397 GW en 2030⁷⁹.

Réglementation

En France, pour l'installation d'éoliennes sur un mât de moins de 12 mètres, il n'est pas obligatoire d'obtenir un permis de construire, une simple déclaration de travaux suffit. Pour toute installation d'éolienne au-dessus de 12 mètres de mât, un permis de construire est obligatoire. Une étude d'impact est nécessaire pour l'obtention d'un permis de construire pour un mat d'une hauteur supérieure à 50 mètres⁸⁰.

Pour le petit éolien, il est possible de bénéficier d'un crédit d'impôt ainsi que d'un taux réduit de TVA pour l'installation d'un éolienne domestique.

Débats et critiques

Le débat sur l'énergie éolienne porte sur les nuisances et sur les intérêts de l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne est exploitée à plusieurs échelles. On peut distinguer le *grand éolien* ou *éolien industriel* qui est financé par des collectivités et des grandes entreprises, dans la quasi-totalité des cas, raccordé à un réseau électrique. Il y a aussi le petit éolien, qui est mis en œuvre par un individu ou une ferme agricole, en site isolé ou raccordé au réseau.

Aspect environnemental

Bilan environnemental global

L'éolien était considéré, avant la prise de conscience des pollutions liées à l'exploitation des terres rares, comme la filière ayant le meilleur bilan environnemental dans le classement effectué dans l'étude multicritère *Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security*⁸¹, étude réalisée par le département énergie et atmosphère de l'université de Stanford. Une éolienne ne consomme pas d'eau douce (l'accès à l'eau douce est une problématique de premier plan à l'échelle mondiale), ne nécessite pas de pesticides, n'induit pas de pollution thermique. Elle a une empreinte surfacique très faible (la présence d'une éolienne est compatible avec les activités agricoles) et a un impact sur la biodiversité presque négligeable. Elle est de plus disponible presque partout, de manière décentralisée. C'est une énergie propre qui ne produit directement ni dioxyde de carbone, ni dioxyde de soufre, ni fines particules, ni déchets radioactifs à vie longue, ou n'importe quel autre type de pollution de l'air ou de l'eau sur son site de fonctionnement. Par contre, la production des aimants de forte puissance contenus dans la majorité⁸² des générateurs nécessite de grandes quantités de néodyme dont l'extraction et surtout le raffinage sont dénoncés pour leur impact catastrophique sur l'environnement⁸³.

La fabrication de l'éolienne puis ultérieurement son entretien consomme des ressources (énergie grise) et produit indirectement des pollutions (extraction et raffinage des matériaux de construction, fabrication, etc.). Pour un mat d'éolienne de 80 mètres, 800 tonnes d'acier et de béton sont injectées à sa base pour les fondations. Cela est très supérieur (en MWh/an) aux quantités nécessaires à la construction d'une centrale de tout autre type (types qui ont par ailleurs leurs inconvénients respectifs), y compris le nucléaire qui, sous cet aspect, est favorisé par sa très haute densité de puissance. Néanmoins l'impact de ces facteurs est peu important sur la durée de vie de l'éolienne.



Éoliennes dans un paysage rural.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable dont le gisement est inépuisable à l'échelle de temps des civilisations humaines. Le gisement éolien terrestre ne s'éteindra qu'avec la mort du soleil (le vent dépendant de la présence du soleil et des variations de la pression atmosphérique), dans 4 milliards d'années.

Début 2012, cette image globalement positive est remise en cause par un rapport d'un think tank britannique, non confirmé par des sources indépendantes, qui avance que l'éolien, dans les conditions météorologiques britanniques en hiver, en nécessitant l'utilisation des centrales à gaz ou à charbon du fait de son intermittence, entraînerait davantage de rejets de gaz à effet de serre⁸⁴.

Éléments polluants contenus dans l'alternateur

La production d'électricité par conversion de l'énergie éolienne, hydraulique, nucléaire ou thermique nécessite des alternateurs. Les aimants de forte puissance qu'ils contiennent sont parfois critiqués car ils nécessiteraient d'utiliser des éléments tels que le néodyme, qui fait partie des terres rares dont les procédés d'extraction et surtout de raffinage sont très polluants⁸³. Le recours aux terres rares est toutefois très minoritaire dans l'éolien, et non nécessaire^{82, 85}.

Impact sonore

Début 2006 le Groupe de Travail de la Faculté de Médecine sur les éoliennes affirmait :

- que la production d'infrasons par les éoliennes est, à leur voisinage immédiat, sans danger pour l'homme ;
- qu'il n'y a pas de risques avérés de stimulation visuelle stroboscopique par la rotation des pales des éoliennes ;
- que la réglementation relative à l'impact sur la santé du bruit induit était, à cette date, insuffisante, ce qui a été corrigé depuis, l'étude d'impact prévoyant maintenant une cartographie des nuisances sonores et des mesures individuelles chez les habitants les plus proches, la distance minimale des habitations étant maintenant de 500 m.

Concernant la distance de 1 500 m, le Groupe de Travail demandait, à titre conservatoire et en attendant la conclusion des études demandées, que soit suspendue la construction des éoliennes d'une puissance supérieure à 2,5 MW alors qu'il n'existait, à cette date, aucune éolienne terrestre d'une telle puissance en France, ce rapport applique plus un principe de précaution sans fondement scientifique, car le bruit d'une éolienne n'est pas lié à sa puissance nominale. C'est pourquoi des expertises acoustiques sont systématiquement réalisées dans le cadre d'une étude d'impact environnementale.

Les machines de dernière génération ont fait des progrès importants sur le plan des nuisances sonores et elles peuvent être programmées, dans des circonstances particulières de force et orientation du vent, pour réduire l'impact sur une zone d'habitation proche⁸⁶.

En Australie, en mars 2005, le pédiatre David Iser a relevé 3 cas de « problèmes significatifs » sur une étude concernant 25 personnes habitant dans un rayon de 2 km d'une ferme éolienne⁸⁷.

Une éolienne produit un bruit de 55 dBA au pied de sa tour, ce qui correspond à l'ambiance sonore d'un bureau. Ce niveau sonore est en général considéré comme acceptable. La réglementation française ne se base pas sur le bruit intrinsèque mais sur la notion d'émergence sonore, c'est-à-dire la différence entre le niveau sonore ambiant et celui-ci plus celui des éoliennes. Il s'agit de rester en deçà de 5 dBA le jour et 3 dBA la nuit, ce quelle que soit la vitesse du vent. Une nouvelle réglementation vient renforcer ce critère, en introduisant la notion d'émergence spectrale, avec des niveaux d'émergences à respecter par fréquence (7 dB entre 125 Hz et 250 Hz, 5 dB entre 500 Hz et 4 000 Hz). Cela en fait une des réglementations les plus strictes en Europe.

Le 28 novembre 2009, *Le Monde* consacre un dossier de huit pages aux « maudits du vent », qui vivent à proximité des éoliennes et « souffrent de stress, nausées, insomnies, vertiges, irascibilité, dépression... ». Le journal indique que « les témoignages s'accumulent de façon troublante »⁸⁸.

Impact visuel

Comparativement aux premiers parcs éoliens, très denses, les nouveaux parcs voient leurs éoliennes plus espacées, celles-ci étant de plus grandes taille et puissance. Ils ont donc perdu leur aspect surpeuplé.

L'énergie éolienne fait débat en France, entre pro, qui militent pour le développement de structures éoliennes, et anti, qui militent pour un moratoire sur ces dispositifs, qu'ils accusent de défigurer le paysage et qui mettent en doute leur utilité écologique.

Impact sur les oiseaux et les chauves-souris

Plusieurs études sur les éoliennes⁸⁹ montrent que le nombre d'oiseaux tués par les éoliennes est négligeable par rapport au nombre qui meurt en raison d'autres activités humaines (chasse...). Par exemple, au Royaume-Uni, où il y a quelques centaines d'éoliennes, il y a environ chaque année un oiseau tué par une éolienne et 10 millions par les voitures. Une autre étude suggère que les oiseaux migrateurs s'adaptent aux obstacles ; ces oiseaux qui ne modifient pas leur route et continuent à voler à travers un parc éolien seraient capables d'éviter les pales, du moins dans les conditions de l'étude (vent faible et en journée). Au Royaume-Uni, la Société royale pour la protection des oiseaux a ainsi conclu que :

« Les preuves disponibles suggèrent que des parcs éoliens correctement positionnés ne représentent pas un danger significatif pour les oiseaux. »

Selon la Ligue pour la protection des oiseaux, aux exceptions documentées du vanneau huppé, du chevalier gambette et de la barge à queue noire, de nombreuses espèces semblent pouvoir utiliser l'espace proche des parcs éoliens pour nicher⁹⁰.

D'autres études sur les éoliennes montrent qu'elles peuvent avoir un impact significatif sur l'avifaune⁹¹ :

- Perte d'habitat
- Dérangements en phase de travaux
- Effet barrière
- Mortalité (entre 0 et 60 oiseaux par éolienne et par an)

Jusqu'à présent relativement négligées, les chauves-souris provoquent à présent des inquiétudes du même type, spécialement pour les plus grandes installations : la mortalité des chauves-souris augmente de façon exponentielle en fonction de la hauteur de la tour, selon une étude de 2007, alors que les mortalités d'oiseaux restent stables⁹². En effet, outre le risque de collision directe, les chauves-souris sont sensibles aux barotraumatismes provoqués par la rotation des pâles⁹³. Le taux de mortalité des chauves-souris par barotraumatisme/collision est évalué entre 0 et 69 individus par éolienne et par an⁹⁴.

Même si elle n'est pas a priori opposée à l'énergie éolienne, l'association France Nature Environnement demande une meilleure prise en compte des risques auxquels les oiseaux sont exposés⁹⁵.

Impact sur la propagation des ondes

Les éoliennes ont été accusées d'interférence potentielle avec les radars militaires dans le cadre de la détection d'un aéronef volant à basse altitude ou pour les radars météorologiques pour la détection des précipitations. En effet, les éoliennes constituent un obstacle à la propagation de l'onde. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus, comme les pales sont en rotation, le radar note leur vitesse de déplacement et le traitement des données par filtrage Doppler ne peut les différencier d'une cible en mouvement⁹⁶.

Impact sanitaires dus aux infrasons



Impact visuel : Parc éolien de Tehachapi Pass en Californie, des éoliennes trop nombreuses avec une rotation trop rapide.



Impact visuel : Réduire l'impact et augmenter la production, choix de 11 turbines E-126 de 7,5 MW à rotation très lente au lieu de 23 turbines de 2 MW à rotation plus rapide sur la même surface de 4,5 km², Estinnes Belgique, 10 octobre 2010.

Plusieurs publications rapportent les effets néfastes sur la santé des basses fréquences et infrasons générés par les parcs éoliens^{97, 98, 99}. Les symptômes le plus souvent évoqués sont nausées, tachycardie, acouphènes, difficultés d'endormissement et de concentration. Les très basses fréquences et les infrasons ne sont actuellement pas pris en compte en France dans les études d'impact préliminaires à l'installation d'un parc éolien. L'ANSES a ainsi été saisie afin d'en étudier les effets¹⁰⁰. Cette étude débutée en 2014, n'est cependant pas encore publiée.

Encombrement au sol

La surface utilisée par une éolienne reste quasiment intégralement utilisable pour un autre usage. L'énergie éolienne est compatible avec les autres activités humaines, industrielle et agricole, tout comme les lignes à hautes tensions. Des prototypes sont compatibles avec l'habitat urbain.

Par contre, la question de la quantité d'énergie qui peut être fournie (par rapport à la consommation actuelle et future) avec la surface disponible est posée.

Les éoliennes actuelles nécessitent une importante surface au sol, imposée par la rotation nécessaire en fonction de la direction du vent, par la taille des pales, par l'interférence entre éoliennes voisines sur le flux de vent, par mesure de sécurité en cas de chute. Elles permettent une densité d'environ 10 MW/km²¹⁹, soit 10 W/m² pour des petites fermes éoliennes, et produisent environ 2 kWh/an par W, ce qui implique un besoin de l'ordre de 50 km² par TWh ; en théorie (moyennant la disponibilité de capacité de stockage suffisante, sous forme de stations de pompage-turbinage par exemple, même avec des pertes dépassant la moitié), un parc éolien ayant une surface du tiers de la mer Baltique (450 000 km²) est suffisant pour répondre à la totalité de la consommation électrique actuelle (2700 TWh) de l'Union européenne à 27^[réf. nécessaire].

Cependant pour des fermes éoliennes plus grandes, les effets de masquage deviennent importants¹⁰¹ et en pratique la densité moyenne de puissance par unité de surface est de l'ordre de 0,5 W/m², soit 20 fois plus faible. Le Danemark, pays très éolien et pratiquement aussi équipé que possible^[réf. nécessaire], n'arrive à produire que 20 % de son électricité avec l'énergie éolienne^[réf. nécessaire]. La faisabilité des estimations théoriques ci-dessus est donc contestable, et implique certainement des changements profonds.

À titre de comparaison, une centrale solaire photovoltaïque a une productivité d'environ 70 kWh/m² au sol dans un site ordinaire d'Europe^{n 20}, soit 70 GWh/km²/an, mais cela implique d'utiliser 100 % de la surface^{n 21}.

Afin de satisfaire la consommation électrique française de 2011, il faudrait consacrer une superficie d'environ 2 850 000 hectares à un parc composé d'éoliennes de 2 MW¹⁰².

L'impact du démantèlement

En ce qui concerne les éoliennes, le démantèlement d'une installation doit comprendre :

- le démontage de l'éolienne,
- le démontage des équipements annexes,
- l'arasement des fondations,
- le démontage ou la réutilisation du réseau local ou réseau inter-éoliennes (le réseau reliant le poste de livraison au poste de raccordement étant la propriété du Réseau de transport d'électricité et par ce fait, utilisable pour un autre usage que le parc éolien).

Les fondations sont au minimum arasées à 1 m de profondeur laissant la possibilité de reprendre une activité agricole sur le site. Dans certains cas il est envisageable de supprimer l'intégralité de la fondation. Les postes de livraisons présents sur site sont eux aussi retirés et leur fondation entièrement supprimée. Chaque emplacement est ensuite recouvert de terre et rendu à la végétation naturelle ou à une exploitation agricole. Cette dernière étape ne laisse aucune trace significative sur le site de l'existence du parc éolien.

Le coût du démantèlement d'une éolienne et du recyclage de ces installations est plus facile à estimer que celui d'autres moyen de production. Ce coût est assumé par le propriétaire du bâtiment (opérateur éolien, SEM...) et est en partie récupéré grâce à la vente de la « ferraille » des mâts et autres composants. La loi (Article L553-3 du code de l'environnement)¹⁰³ impose aux exploitants le démantèlement des installations et la remise en état du site en fin d'exploitation ; pour s'assurer qu'ils seront à même de conduire ces opérations, ils sont tenus de constituer des garanties financières à cet effet¹⁰⁴.

Il n'existe pas, en 2010, de parc éolien en friche en France¹⁰⁵.

Sécurité physique autour des éoliennes

Les éoliennes présentent des risques d'accidents : un fort vent est susceptible de rompre les structures des éoliennes. En 2000, une rupture d'hélices au parc de Burgos a envoyé des débris tournoyer à plusieurs centaines de mètres¹⁰⁶.

La majorité des accidents connus sont liés à l'utilisation de matériels d'occasion ou manquant de retour d'expérience, risque inhérent à toute technologie émergente. Les éoliennes aujourd'hui installées bénéficient de certifications réalisées par des organismes indépendants, et sont construites sous contrôle qualité sévère, réduisant significativement les risques de rupture du matériel. Cependant les éoliennes certifiées ne font pas toujours l'objet de tests de longue durée en situation d'exploitation. Dans le monde, personne n'a encore jamais été reconnu victime d'un accident éolien.

Impact sur la dynamique terrestre naturelle

Les éoliennes exploitent une énergie cinétique produite par des différences de pression dans l'atmosphère sous l'influence du soleil. Ces flux gazeux participent à la dynamique climatique globale. Une étude publiée par des chercheurs de la Société Max-Planck dans la revue *Earth System Dynamics*¹⁰⁷ montre que l'énergie potentiellement extractible (18 à 68 TéraWatts (TW) selon la méthode d'évaluation) est du même ordre de grandeur ou supérieure d'un ordre de grandeur à celui de la demande mondiale en énergie (17 TW), mais que certaines des conséquences climatiques d'une extraction à ce niveau maximal seraient comparables à celles d'un doublement du taux de CO₂. Selon les données de 2008 il existe une marge de développement très significative.

L'étude ne prend en compte que l'éolien terrestre ; si l'on y ajoute l'éolien en mer (*offshore*), le potentiel est presque doublé.

En 2008, la puissance moyenne produite par l'éolien est de 0,024 TW^{n 22, 38}. La puissance moyenne nécessaire pour couvrir les besoins mondiaux en énergie est de 17 TW^{n 23, 108}. Le rapport estime que l'énergie éolienne serait à même de fournir à elle seule ces besoins, mais donc en provoquant des changements climatiques équivalents au doublement du taux de CO₂. Le risque est faible car la marge est basée sur la comparaison entre les 0,024 TW installés et le niveau maximal de 17 TW (0,14 %).

En 2012, la puissance moyenne produite par l'éolien est de 0,061 TW^{n 24}, soit à peine 0,36 % du niveau maximal, et un facteur de croissance de 2,7 en 4 ans. Tout indique que la puissance installée va continuer à croître fortement dans les prochaines années, bien qu'un net ralentissement soit observé en Europe et en Amérique du Nord. La marge est donc en train de se réduire, mais reste plus que confortable.

En tout état de cause, le rapport affirme que l'utilisation *généralisée* de l'énergie éolienne provoquerait un changement dans les précipitations, dans la dissipation de chaleur par convection, ainsi qu'une augmentation des radiations solaires à la surface de la Terre. En conclusion, il préconise de lancer des études complexes de modélisation pour accompagner et limiter le développement de l'utilisation de l'énergie éolienne, tout en confirmant d'ores et déjà qu'il existe un niveau maximal pour la récupération d'énergie éolienne, entraînant des conséquences sur le climat de la planète.

Aspect énergétique

Raccordement au réseau électrique

Raccorder les fermes éoliennes au réseau électrique (sans stockage local de l'énergie) nécessite, comme pour les autres centrales de production électrique, des lignes à haute tension. La concentration des éoliennes en parcs terrestres, côtiers ou marins a d'abord conduit à une logique de recentralisation de l'offre locale de courant, contredisant la vision souvent évoquée d'une production décentralisée. Des lignes différentes (à courant continu) et en Europe un *réseau électrique offshore* (en mer du Nord et mer d'Irlande dans un premier temps)¹⁰⁹, permettront de connecter au réseau européen un réseau de centrales éoliennes, solaires et hydroélectriques et éventuellement hydroliennes pour notamment compenser les irrégularités de production, avec de premières réunions en janvier 2010.

Fin 2006, un bulletin électronique de l'Ambassade de France en Allemagne indiquait déjà que la production éolienne nécessiterait 850 km de câbles d'ici 2015 et 1 950 km d'ici 2020¹¹⁰. Par ailleurs, des oppositions locales (syndrome Nimby) à la construction de lignes en bord de mer conduisent à enterrer les câbles, ce qui entraînerait - sauf innovations importantes - un doublement du montant de la facture d'électricité des clients industriels. Cet argument repris par les opposants aux éoliennes ne semble pas spécifique aux éoliennes, face à la demande générale d'enfouissement des lignes électriques quel que soit le mode de production. En 2009, beaucoup d'installateurs d'éoliennes, même en milieu terrestre, proposent systématiquement l'enfouissement des lignes sans que cela entraîne de surcoût rédhibitoire.

Exigence du réseau à l'égard des producteurs

La régulation du réseau se traduit par des exigences à l'égard des producteurs, notamment celle de maintenir la fréquence du courant à 50 Hz. Une hausse de fréquence se traduit par un appel de puissance de la part du réseau, qui a pour conséquence l'abaissement de la fréquence. Par contre une baisse notable de fréquence se traduirait par une fourniture de puissance par le réseau, circonstance évitée par le délestage de l'installation. Des automatismes déconnectent les producteurs qui ne respectent pas les normes. Ces automatismes se traduisent, pour les régulateurs du réseau, dont c'est la fonction, par des événements aléatoires.

Intermittence du vent

Le plus grand problème de l'énergie éolienne est son caractère intermittent : elle n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques. Une éolienne produit, en moyenne, l'équivalent de moins de 20 % du temps^{n 25}. La plupart du temps, la nécessité d'assurer la constance de la production électrique oblige à coupler un parc éolien avec d'autres sources d'électricité disponibles immédiatement, à la demande telles que les énergies hydrauliques (barrages) ou fossiles (centrales à charbon ou à gaz) par exemple. Si bien que, dans l'optique d'un réseau incluant également des énergies fossiles, la production électrique n'est au bout du compte pas exempte d'émissions de dioxyde de carbone mais néanmoins moins polluante qu'un réseau d'énergie totalement fossile.

Le vent est une ressource aléatoire¹¹¹, bien que d'autres estiment qu'à l'échelle de temps de l'ordonnement d'un réseau électrique la météo soit suffisamment sûre pour que la ressource soit prévisible [réf. nécessaire].

Les éoliennes produisent de l'électricité de façon intermittente sur un réseau électrique. Comme le soulignent par exemple le prix Nobel de physique Steven Chu¹¹², le député allemand Hermann Scheer, père de l'IRENA (l'Agence internationale de l'énergie renouvelable), ou encore le polytechnicien et expert en énergies renouvelables François Lempérière¹¹³, il est possible de réduire le problème de l'intermittence de la ressource éolienne, grâce à des technologies comme le pompage-turbinage ou le stockage chimique, à un classique problème de volume de stock.

En France, les capacités des centrales de pompage-turbinage sont actuellement utilisées pour faire face aux variations de la demande électrique, en particulier aux variations les plus rapides ; les centrales nucléaires ne peuvent participer au suivi de charge que de façon relativement lente.

La société Statoil exploite sur l'île d'Utsira une centrale éolienne qui fournit une ressource électrique stable pour 10 logements, même en cas de calme plat grâce à un stockage chimique : l'énergie excédentaire sert à produire de l'hydrogène par électrolyse et en cas de temps calme une génératrice à gaz adaptée pour utiliser de l'hydrogène prend le relais. Une pile à combustible est également utilisée pour reconverter l'énergie chimique en électricité mais la technologie n'est pas encore assez mature pour une utilisation non expérimentale dans un site isolé. Un projet de plus grande taille est en cours pour les îles Féroé. D'après Statoil, le coût du kWh de ce type de centrale devrait être compétitif avec une centrale diesel dans moins de 10 ans dans le cas des sites isolés¹¹⁴. Pour les tenants de l'Économie hydrogène tels l'économiste Jeremy Rifkin les énergies renouvelables comme le vent ne doivent d'ailleurs être considérées que comme des sources d'hydrogène, le problème de leur absence de souplesse n'intervenant alors plus sur la consommation finale.

L'Allemagne, qui a significativement investi dans l'énergie éolienne, peut rencontrer des difficultés : son réseau éolien, bien que réparti sur tout son territoire, et donc affranchi d'effets purement locaux, peut passer de 0 à 100 % de ses capacités en l'espace de quelques jours (par exemple sur le réseau de la société E.ON^[réf. nécessaire]). Lors de la canicule de 2003, la capacité des éoliennes est tombée à moins du vingtième (1/20) de sa valeur nominale¹¹⁵. Au cours de la canicule de l'été 2003, l'Allemagne a dû importer une quantité d'électricité équivalente à deux tranches nucléaires de l'ordre de 1 000 MW¹¹⁶. Le même phénomène a été observé durant la vague de chaleur nord-américaine de 2006 (en) ; la production réelle des 2 500 MW de capacités théoriques de production d'énergie éolienne de Californie était inférieure au vingtième (1/20) de cette valeur lors des pics de demande¹¹⁷.

Si la production des éoliennes baisse considérablement durant les périodes de canicule, le même problème est observé durant les jours les plus froids de l'année dont les conditions météorologiques générales sont caractérisées par la faiblesse des vents. Cette absence de production est d'autant plus préoccupante qu'elle est liée aux pics de consommation énergétique dus aux besoins de chauffage. Le cabinet en ingénierie Mott MacDonald dans une étude de juin 2010 avançait ainsi que « les conditions météorologiques britanniques en hiver conduisent souvent à une combinaison de temps froid avec très peu de vent, rendant les parcs éoliens incapables de rivaliser avec d'autres formes d'énergie lorsque la demande est à son plus haut »⁸⁴.

RTE, le gestionnaire du réseau électrique français, estime que l'intégration de l'électricité éolienne dans le réseau actuel est possible sans difficultés majeures à hauteur de 10 à 15 GW, en particulier grâce à la présence en France de 3 gisements de vent indépendants, qui permettront un lissage de la production bien meilleur qu'en Allemagne ou au Danemark. Notons que le Danemark a été longtemps un îlot éolien isolé au milieu d'un océan de consommateurs européens sans éolien. En cas de surproduction le Danemark exportait essentiellement vers l'Allemagne. Maintenant que l'Allemagne du Nord est fortement « éolisée », le Danemark pratique un échange avec la Suède et la Norvège dont l'électricité est en grande partie d'origine hydraulique et peut donc absorber des variations rapides de la production éolienne et de la consommation.

Les pays les plus dépendants de l'énergie éolienne (Allemagne, Danemark, etc.) pallient l'intermittence avec l'énergie thermique et avec l'importation d'électricité produite par d'autres pays, notamment l'électro-nucléaire français et l'hydraulique norvégienne¹¹⁸. Le Danemark est le pays où l'énergie éolienne est la plus développée, mais ses émissions de CO₂ par kWh et par habitant étaient en 2007 les onzièmes plus élevées d'Europe¹¹⁹. La production d'électricité se fait essentiellement par le biais des centrales thermiques au charbon, qui émettent de très gros volumes de CO₂. Certains y voient là que l'éolien augmente le CO₂, sauf à lui associer un parc de barrages permettant le pompage massif en heures creuses, mais tous les sites viables des pays développés sont déjà équipés pour passer les pointes de consommation : il n'y en a déjà pas assez mais fermer des centrales nucléaires permettrait de libérer des STEP pour ainsi stocker l'énergie issue des éoliennes¹²⁰ [réf. insuffisante]. Il est toutefois à noter que l'exemple du Danemark, souvent utilisé par les défenseurs du nucléaire pour illustrer le caractère indispensable de celui-ci, n'est pas suffisamment représentatif pour faire cas d'école et s'inscrit dans un processus loin d'être achevé^[réf. nécessaire]. Des conclusions du même type, mais de directions différentes, pourraient s'appliquer à la Belgique, troisième pays le plus dépendant de l'énergie nucléaire dans le monde (55 % de la production d'électricité) après la France et à la Lituanie, qui affiche des émissions de gaz à effet de serre per capita de 16 % supérieures à celles du Danemark¹²¹.

Transformation et stockage de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est par essence une énergie intermittente. Elle n'est prévisible que dans la limite des prévisions météorologiques et ne peut être stockée sous sa forme primaire.

Les partisans des énergies renouvelables voient dans le mix-énergétique, combinant éolien, solaire et géothermie, dans le stockage de l'énergie et les économies d'énergie, des solutions pour pallier les problèmes d'intermittence de l'éolien.

L'université de Kassel a créé une centrale virtuelle d'électricité 100 % renouvelable. Elle combine les deux énergies intermittentes éoliennes et solaire, ainsi que deux énergies non-intermittentes, l'hydro-électricité et le biogaz, permettant de stocker de l'énergie en cas de surplus, de prendre le relais en l'absence de vent ou de soleil et de réaliser l'appoint^{122, 123}.

Combiner plusieurs sources renouvelables d'électricité (éolien, photovoltaïque, marémotrice, et hydroélectricité) via un « réseau intelligent » (smart grid) pourrait atténuer les problèmes posés par l'intermittence de chaque source prise individuellement¹²⁴.

Stockage par hydrogène

L'Allemagne, dont la sortie du nucléaire est programmée pour 2022, doit relever le défi de la transition énergétique en faveur des énergies renouvelables. Les difficultés à stocker cette énergie à grande échelle et de manière connectée au réseau conduit parfois à une non exploitation du plein potentiel de cette ressource. L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique est une des pistes les plus sérieusement envisagées. L'électrolyse est un procédé connu et maîtrisé qui permet d'utiliser le surplus d'énergie pour produire de l'hydrogène. La pile à combustible est une des pistes de recherche, comme l'atteste le projet Myrte, plateforme de recherche et développement qui a pour objectif de stocker l'énergie solaire sous forme d'hydrogène, inauguré au début de l'année 2012 en Corse. On peut également citer le projet de recherche européen INGRID lancé en juillet 2012, qui explore la piste du stockage de l'hydrogène sous forme solide grâce à un alliage d'hydrure de magnésium. Le groupe E.ON teste de son côté l'injection de l'hydrogène directement dans le réseau gazier allemand. Un site pilote devrait être construit à Falkenhagen (Nord-est de l'Allemagne) d'ici 2013¹²⁵.

Stockage par batteries

La solution du stockage de l'énergie électrique dans des batteries n'est envisagée que pour des sites isolés et des productions de faible importance. Ce type de stockage est limité par l'investissement représenté par des batteries de grande capacité et par la pollution engendrée par leur recyclage.

Stockage hydraulique

Une méthode utilisée pour exploiter et stocker les productions excédentaires des éoliennes consiste à les coupler avec des techniques de pompage-turbinage au sein de centrales hydro-éoliennes. Cette technique est à la fois la plus simple et la plus prometteuse après le simple couplage à un potentiel hydraulique supérieur ou égal au potentiel éolien, comme c'est le cas dans le partenariat Danemark-Norvège.

Principe :

- Une ferme éolienne génère de l'électricité grâce à des aérogénérateurs. Cette électricité est utilisée à 70 % pour pomper de l'eau vers une retenue d'altitude. Les 30 % restants sont envoyés sur le réseau.
- En périodes de moindre vent, l'eau de la retenue est turbinée dans une unité hydroélectrique et stockée dans une retenue basse. L'électricité obtenue est envoyée sur le réseau.
- Le principe peut être inversé avec un puits vidé de son eau grâce aux surplus d'électricité, et rempli gravitairement en alimentant en eau des turbines¹²⁶.

Réalisations et projets :

- En 2006, en Allemagne débutait une expérience d'approvisionnement en électricité « à 100 % d'origine renouvelable »¹²⁷. Le stockage de type STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) a été retenu comme solution pour la partie éolienne ;
- En 2012, aux Canaries, un ensemble cohérent de couplage hydraulique-éolien a été mis en route sur l'île d'El Hierro, associant 11,5 MW éoliens à une centrale hydraulique de 11,3 MW fonctionnant par pompage-turbinage entre deux bassins réservoirs séparés par une dénivelée de 700 m. outre l'auto-suffisance en électricité, il s'agit aussi de produire de l'eau douce par dessalement d'eau de mer. L'économie de pétrole est d'environ 6 000 t/an, soit 18 000 t de CO₂ évitées¹²⁸ ;
- En 2013, en Belgique, un projet de construction d'une île artificielle vise à construire un grand puits (de 30 m de profondeur) destiné au stockage de l'électricité éolienne du champ éolien offshore proche de la Mer du Nord 2 300 MW de capacité globale espérés en 2020) a été proposé début 2013 au comité portuaire de Zeebrugge, en remplacement de deux centrales nucléaires, celle de Doel et celle de Tihange¹²⁶. Cet atoll énergétique pourrait être situé à 3 km au large de la ville voisine de Wenduine. Il pourrait mesurer 2,5 km de diamètre et s'élever à 10 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le puits fonctionnerait à l'inverse du réservoir d'altitude d'une station de transfert d'énergie par pompage (STEP). Ses pompes de vidange seraient alimentées par les surplus d'électricité du parc éolien du port de Zeebrugge et aux parcs C-Power (54 turbines prévus pour fin 2013) et de Belwind (55 éoliennes) qui ont commencé à produire de l'électricité respectivement à partir de 2009 et de 2010 devant la ville de Zeebrugge, ainsi qu'un champ de Northwind (72 éoliennes en construction à partir de 2013), en cas de besoin d'électricité, ses turbines seraient alimentées par le retour d'eau de mer dans le puits. Le projet est rendu crédible par une faible profondeur du plancher marin et de nouvelles techniques de construction d'îles en mer éprouvées dans d'autres pays, dont avec le projet¹²⁹ aux Pays-Bas dans des conditions géologique, climatique et écopaysagères proches. L'île pourrait aussi accueillir quelques éoliennes supplémentaires. Elle devrait représenter 90 % du prix du projet et donc nécessiter la mise en place d'un consortium international, un délai de 5 ans de construction et l'établissement d'un lien avec le réseau électrique terrestre, ce qui pourrait se faire dans le cadre d'un plan d'aménagement spatial de la mer du Nord selon le journal Le Soir.
- En 2013, le Danemark fait étudier par le Laboratoire national Risø et des architectes spécialisés une île-réservoir de 3,3 km² d'une capacité de stockage/production de 2,75 GWh (équivalent à 24 h de besoins électrique pour Copenhague. Selon l'ONG *Hydrocoop*, « le surcoût total lié au stockage sera inférieur à 2 Eurocent/KWh d'énergie intermittente utilisée, y compris la perte d'énergie au stockage »¹³⁰.

Contraintes :

- La ressource hydraulique doit être importante et les sites hydrauliques totalement exploités. Dans le cas contraire, il est préférable de développer l'hydraulique avant l'éolien qui est plus coûteux à mettre en œuvre (de l'ordre de 70 à 80 €/MWh contre 30 € pour l'hydroélectricité) ;
- Le stockage hydraulique doit se trouver à proximité d'un gisement de vent. Cela implique de privilégier les zones accidentées au détriment des grandes plaines. La région des Grands Lacs en Amérique, la zone Tasmanie-Sud australienne et l'Écosse sont à ce sujet privilégiées.

Pour les petites installations, il est envisageable d'utiliser les retenues collinaires créées par les exploitants agricoles à des fins d'irrigation :

- La source de production éolienne doit être utilisée en priorité pour recharger les lacs d'accumulation quand la consommation est assez faible, la souplesse de l'hydroélectricité permettant ensuite une modulation précise de la production. Dans un tel cadre, c'est la capacité hydroélectrique qui est déterminante, ce qui fait de l'éolien un appoint à l'hydroélectricité ;
- La capacité de pompage-turbinage ne doit pas être saturée par une autre source de production. Ce cas se présente en France où l'hydraulique sert de tampon à la production électro-nucléaire, les centrales nucléaires ne pouvant être modulées pour suivre la variabilité de la demande.

Stockage par transformation

Aux États-Unis, une entreprise conçoit de nouvelles éoliennes qui produisent de l'air comprimé au lieu de l'électricité¹³¹. Dans la nacelle des éoliennes, au lieu d'un alternateur se trouve donc un compresseur d'air. L'air comprimé est stocké et permet de faire tourner un alternateur aux moments où les besoins se font le plus sentir. Du point de vue du stockage de l'énergie, cette façon de faire impose une conversion d'énergie (de l'air

comprimé vers l'électricité, avec un rendement réduit), mais permet de positionner la production électrique lors des pics de consommation où l'électricité est payée plus chère, avec une conversion de moins que par le processus classique (électricité vers stockage puis stockage vers électricité). Certains pensent même que l'on pourrait utiliser directement l'air comprimé ainsi produit pour alimenter des voitures automobiles propulsées avec ce fluide.

En 2009, les Néerlandais de Dutch Rainmaker ont réalisé une éolienne dont l'énergie est utilisée pour condenser la vapeur d'eau présente dans l'air ambiant. Le premier prototype a ainsi condensé 500 l d'eau douce en 24 h

En 2010, l'institut allemand Fraunhofer¹³² explique dans un communiqué avoir réussi à mettre au point un processus de production de méthane à partir de la production en excès des éoliennes. L'électricité est utilisée pour faire une électrolyse d'eau, produisant de l'oxygène (rejeté) et de l'hydrogène. Cet hydrogène est recombiné à du CO₂ (sans doute par réaction de Sabatier) pour produire du méthane, qui est réintroduit dans le circuit de distribution public de gaz naturel. La première partie de cette réaction était déjà utilisée par Poul La Cour en 1890. Une installation industrielle de ce type (1 MW) est prévue à Fos-sur-Mer¹³³.

Aspect formation

L'offre de formation technique, souvent anglophone, s'étend avec le développement de la filière (10 000 emplois attendus, environ, en France si l'éolien continue à se développer, notamment en offshore)¹³⁴. L'offshore nécessite des compétences particulières, dont en termes de sécurité, gestion du risque de corrosion, anticipation des contraintes de météo, travail en immersion, risques liés aux munitions immergées, etc.

Aspects économiques

Coût au kWh

Selon l'association européenne de l'énergie éolienne (EWEA - European Wind Energy Association)¹³⁵, le coût du kWh produit en zone côtière (donc très ventée) était de 8,8 c€ au milieu des années 1980 pour une turbine de 95 kW, il est de 4,1 c€ pour une turbine de 1 MW en 2003, et devrait se situer à 3,1 c€/kWh en 2010. Plus récemment, l'EWEA donnait en 2009, pour l'ensemble des éoliennes, une fourchette de 5 à 11 c€/kWh selon les sites et les types d'éoliennes³⁰.

En comparaison, le coût du kWh nucléaire a été évalué fin 2011 par la Cour des Comptes à 4,951 c€ ; il devrait passer à 5,42 c€ en prenant en compte le programme d'investissements annoncé par EDF depuis 2010 et renforcé après l'accident nucléaire de Fukushima¹³⁶. Par ailleurs, le prix spot du kWh en base sur le marché EPEX SPOT a varié entre 4 et 6 c€ en 2011-2012¹³⁷. Mais une comparaison des prix de revient ne peut se faire valablement qu'en prenant en compte les dispositifs de stockage de l'énergie liés à la production d'électricité éolienne.

Les coûts du kWh éolien prévus pour 2040 par le Comité britannique sur le changement climatique sont de 6 à 6,5 c€/kWh pour l'éolien terrestre et 12 à 15 c€/kWh pour l'offshore (avec des éoliennes de 20 MW)³¹.

En 2012, la société brésilienne *Casa dos ventos* signe avec Alstom une lettre d'intention de commande portant sur 68 éoliennes ECO 122 destinées à des fermes énergétiques. Les 180 MW installés le seront pour 230 M€¹³⁸, ce qui ramène le coût du kilowatt installé à 1 270 € départ ferme, dans la fourchette de prix indiquée par la rapport EWEA de 2009 : 1000 à 1 350 €/kW³⁰.

Une étude américaine (NREL) de mars 2013 évalue le coût 2011 du kWh d'un projet de parc d'éoliennes terrestres de 1,5 MW unitaires à 7,2 USc (5,5 c€), et celui d'un projet de parc d'éoliennes offshore de 3,6 MW unitaires à 22,5 USc (17,1 c€)¹³⁹ ; mais les hypothèses de vent sont très optimistes : le facteur de charge est estimé à 37 % pour le parc terrestre et 39 % pour le parc offshore ; il cite d'ailleurs en fin de rapport des fourchettes de 6 à 10 USc/kWh pour les parcs terrestres et 16,8 à 29,2 USc/kWh pour les parcs offshore.

Intégration au réseau

La comparaison des prix entre plusieurs énergies doit prendre en compte leurs capacités d'intégration au réseau et d'adaptation au caractère très fluctuant de la demande. Par exemple, l'énergie nucléaire peut être modulée selon la demande, mais il ne serait pas rentable de construire assez de centrales nucléaires pour couvrir la totalité de la demande, car elles n'auraient pas un taux d'utilisation suffisant pour les amortir ; le parc nucléaire doit être complété en pointe par des sources mobilisables rapidement : en France de l'hydraulique, des énergies fossiles, de l'importation ou des effacements de puissance.

Les énergies intermittentes comme l'éolien ne peuvent pas s'adapter à la demande, car par nature leur production dépend de la ressource naturelle, sans possibilité de modulation par l'homme.

Par ailleurs le foisonnement de divers champs d'éoliennes dans différents bassins de vent permet de lisser en (faible) partie la variabilité de la production. L'intégration au réseau en est quelque peu facilitée.

Selon certains spécialistes, il serait possible d'intégrer jusqu'à 20 % d'énergie éolienne sans surcoût important car les réseaux électriques sont par nature voués à gérer la régulation d'une offre et d'une demande fluctuante. Avec ou sans éolien, des unités de réserves sont de toute façon nécessaires, mais l'irrégularité de la production éolienne nécessite forcément un accroissement de cette réserve dès lors que l'éolien représente une part significative de la production. Le rapport *Le Pari de l'Éolien*, réalisé par le Centre d'Analyse Stratégique en 2009 écrit : "*RTE ne semble pas s'inquiéter de l'intégration de la production éolienne sur le réseau dans un avenir proche : il prévoit des capacités de réserves afin de compenser tout aléa, qu'il soit d'origine climatique (pour l'éolien ou le petit hydraulique) ou dû à une panne de centrales, à hauteur de deux centrales nucléaires*"¹⁴⁰.



Exemple de l'impact du foisonnement éolien en Europe en 2012 : la puissance éolienne moyenne minimale disponible en France est plus faible sur chaque intervalle de temps que la puissance moyenne minimale disponible dans 6 pays européens (Allemagne, Danemark, Espagne, France, Irlande et Royaume-Uni).

Ainsi les coûts liés à l'intermittence doivent prendre en compte la capacité d'intégration à un réseau déjà équipé pour gérer la variabilité de la demande et les risques de pannes ou d'indisponibilité des grosses unités classiques. La multiplicité des sources éoliennes peut sembler éviter l'inconvénient des grosses unités classiques, dont la panne subite peut amener à mobiliser plusieurs unités de réserves ; cependant, les variations des vents affectent un grand nombre d'éoliennes en même temps : l'indisponibilité simultanée de l'ensemble des éoliennes lors d'une période anticyclonique serait bien plus difficile à gérer que la perte d'un réacteur nucléaire. Enfin l'intégration à un large réseau permettant des équilibrages, jusqu'à un taux d'environ 20 % d'éolien, permet de pallier partiellement l'impossibilité du stockage de masse¹⁴¹.

Construction

Les questions caractéristiques liées à la construction d'éoliennes sont^{142, 143}

- Production des éoliennes et des pièces mécaniques
- Distribution des redevances
- Évaluation de l'impact sur l'environnement (notamment en termes d'érosion des sols et d'impact sur les forêts)

Acteurs du débat

Parmi les acteurs du débat sur l'énergie éolienne, on peut distinguer les organismes publics traitant des énergies renouvelables, les industriels de l'éolien, les laboratoires de recherche et de développement et les associations militant pour ou contre les éoliennes.

La France possède des entreprises industrielles de premier rang dans le domaine des énergies renouvelables.

Organismes publics traitant des énergies renouvelables

Parmi les organismes publics français concernés par l'énergie éolienne, on peut citer, par exemple, l'Agence de l'Environnement et Maîtrise de l'Énergie (ADEME), qui joue un rôle d'animation dans la recherche des énergies renouvelables), la DGEMP, la Commission de régulation de l'énergie (CRE), le gestionnaire du Réseau de Transport de Électricité (RTE), etc.

Associations professionnelles traitant des énergies renouvelables

Parmi les associations françaises œuvrant dans les énergies renouvelables, on trouve des professionnels de l'énergie éolienne :

- France énergie éolienne (FEE), fondée en 1996, qui regroupe 160 professionnels de l'éolien¹⁴⁴
- le Syndicat des énergies renouvelables (SER)
- le Comité de liaison énergies renouvelables (Cler).

Au niveau européen : l'EWEA (European Wind Energy Association)¹⁴⁵, créée en 1982, regroupe 700 entreprises, associations et institutions de recherche ou académiques de plus de 50 pays, actives dans l'ensemble de la chaîne de valeur du secteur. Elle représente le secteur auprès des Communautés européennes.

Au niveau mondial :

- le GWEC (*Global Wind Energy Council*)¹⁴⁶, association professionnelle basée à Bruxelles en Belgique, regroupe plus de 1500 compagnies, organisations et institutions de plus de 70 pays : fabricants, développeurs, fournisseurs de composants, instituts de recherche, associations nationales pour l'éolien et les renouvelables, fournisseurs d'électricité, compagnies financières et d'assurance. Elle représente le secteur auprès des organismes mondiaux : CCNUCC, IEA, IRENA (Agence internationale de l'énergie renouvelable), GIEC...
- la WWEA (*World Wind Energy Association*)¹⁴⁷, association à but non lucratif basée à Bonn en Allemagne, regroupe 600 membres de près de 100 pays.

Laboratoires de recherche

Les laboratoires de recherche et développement dédié à l'énergie éolienne (le CEP étant le laboratoire le plus important sur l'énergie éolienne) sont peu nombreux à s'impliquer dans des programmes de recherche et développement exclusivement dédiés à l'énergie éolienne. De plus, ils ne participent pas aux grands programmes de développement technologique au niveau européen, ce qui représente une véritable faiblesse pour le marché éolien français au niveau national et européen.

Associations spécialisées

Pro-éoliennes

- Plusieurs associations soutiennent le développement de l'énergie éolienne : Suisse-Éole en Suisse, Planète éolienne qui regroupe des Associations Locales de Promotion de l'Éolien¹⁴⁸ et France énergie éolienne, qui regroupe 160 professionnels de l'éolien¹⁴⁴ en France.
- Au Québec, le groupe Éole-Prudence réunit les citoyens en faveur des parcs éoliens communautaires, installés à bonne distance des zones habitées.

Anti-éoliennes

- En France, des opposants se sont organisés sous forme d'associations : par exemple l'association bretonne *C du Vent* ou la fédération *Vent de Colère !*, qui regroupe plus de 300 de ces associations¹⁴⁹.
- En Europe, la Plateforme Européenne contre l'Éolien Industriel (*EPAW – European Platform Against Windfarms*) créée en octobre 2008 regroupe (en octobre 2013) 623 associations de 24 pays européens, dont 206 associations françaises¹⁵⁰.

Opinion publique

Selon un sondage¹⁵¹ Louis Harris publié le 28 avril 2005, 91 % des Français se déclarent favorables à l'énergie éolienne.

En 2008, 62 % des Français interrogés déclaraient accepter l'installation d'une éolienne à moins d'un kilomètre de leur domicile¹⁵².

Notes et références

Notes

- en ordre de grandeur
- HP = *horsepower*, cheval-vapeur britannique
- voir Énergie éolienne aux États-Unis .
- Pendant cette semaine 9, 6 réacteurs nucléaires étaient à l'arrêt pour rechargement et maintenance : Chooz 2, Cattenom 1, Dampierre 2, Gravelines 1 et 4, Fessenheim 2, plus Blayais 1 à partir du 2 mars.
- 56 044 MW en moyenne contre 72 775 MW en semaine 50, soit 23 % de moins
- Pendant la semaine 52, 3 réacteurs nucléaires étaient à l'arrêt pour rechargement et maintenance : Gravelines 6, Nogent-sur-Seine 2 et Cattenom 2
- les éoliennes s'arrêtent automatiquement lorsque la vitesse du vent atteint 90 km/h
- cf Électricité en France#Importations et exportations .
- les émissions de CO₂ par habitant de la Suède ont baissé de 17,7 % en 20 ans et se situaient en 2010 à 5,07 tonnes CO₂/hab (source : IEA)
- on définit la puissance garantie comme celle dont on est assuré de disposer 95 % du temps
- voir Énergie en Chine
- voir Énergie en Inde
- voir Énergie aux États-Unis
- voir Électricité en Allemagne
- voir Énergie en Suède
- voir Électricité en France
- voir Énergie au Québec
- voir Énergie au Danemark
- Par exemple avec 4 à 5 éoliennes de 2 MW par km²
- le double environ dans un site très ensoleillé (Portugal ou sud de l'Espagne) ; voir énergie solaire photovoltaïque
- le panneau solaire ne rend pas la surface totalement impropre à tout autre usage, puisqu'il peut être installé sur un bâtiment, une route, ou autre surface artificialisée, mais n'est pas compatible avec une production agricole, contrairement à l'énergie éolienne.
- calculée à partir des données d'Observ'ER : production éolienne mondiale 2009 : 276,4 TWh ; puissance installée : 121 GW en 2008, 159 GW en 2009.
- calculée à partir des données de l'IEA (Key world energy statistics 2013) : total mondial des approvisionnements en énergie primaire 2011 : 13 113 Mtep (page 8), soit 152 504 TWh (coefficient de conversion : page 58), soit une puissance moyenne de 17,4 TW (=152504/(365x12)).
- données d'Observ'ER 2013 : production éolienne mondiale 2012 : 534,3 TWh, soit : 534,3/366/12 = 0,061 TW .
- On compte environ 2000 heures d'équivalent pleine puissance sur les 8760 heures d'une année de 365 jours

Références

- Fernand Braudel, *Civilisation matérielle, Economie et Capitalisme - XVe-XVIIIe siècle : Les Structures du Quotidien*, Armand Colin, 1979, 554 p.

- p. 317.
- p. 312-313.
- p. 308.
- p. 314.
- p. 325.

- [PDF] ADEME, Dans l'air du temps, l'énergie éolienne, consulté le 30 septembre 2013.

- p. 11.
- p. 9.
- p. 8.

4. p. 7.
5. p. 13.
6. p. 16.

▪ **[PDF]** Baromètre éolien 2017, EurObserv'ER, février 2017.

1. p. 10.
2. p. 3.

▪ **[PDF] (en)** « Global Wind Statistics 2016 », Global Wind Energy Council (GWEC), 10 février 2017

1. p. 2.
2. p. 4.

▪ **(en) [PDF]** Paul-Frederik Bach Wind Power in Denmark, Germany, Ireland, Great Britain, France and Spain - Statistical Survey 2012, consulté le 7 octobre 2013.

1. p. 2.
2. p. 7.
3. p. 13.
4. p. 3.
5. p. 17.
6. p. 14.

▪ **[PDF]** RTE (Réseau de Transport d'Électricité), Bilan électrique 2012, janvier 2013.

1. p. 22-23.
2. p. 15-16.
3. p. 16.

▪ **[PDF]** Cour des comptes Rapport sur la politique de développement des énergies renouvelables, juillet 2013.

1. p. 43.

▪ **Autres références**

1. Hélène Guiot, « La construction navale polynésienne traditionnelle. Dimension culturelle d'un processus technique », *Techniques & Culture*, 35-36, 2001 consulter en ligne (<http://tc.revues.org/306>)
2. Gamme de la société REpower (<http://www.repower.fr/index.php?id=228>) , sur le site repower .fr
3. **[PDF]** Gamme du fabricant Enercon (http://www.enercon.de/p/downloads/EN_la_gamme.pdf) , sur le site enercon.de
4. L'éolienne M5000 (<http://www.areva.com/FR/activites-4430/l-eolienne-m5000.html>) , sur le site d'AREVA consulté le 18 septembre 2013.
5. ECO 100 Platform (<http://www.alstom.com/Global/Power/Resources/Documents/Brochures/eco-100-wind-turbine-platform.pdf>), sur le site d'ALSTOM consulté le 18 septembre 2013 (voir p. 4).
6. **[PDF]** Haliade™ 150-6MW Offshore Wind Turbine (<http://www.alstom.com/Global/Power/Resources/Documents/Brochures/offshore-wind-turbine-6mw-robust-simple-efficient.pdf>), sur le site d'ALSTOM consulté le 18 septembre 2013 (voir p. 4).
7. Nouveau standard en Chine - Éoliennes résistantes aux cyclones (<http://www.energies-renouvelables.org/newsletter/25-juin-2015/eoliennes-resistantes-aux-cyclones.asp>) , La lettre des énergies renouvelables du 25/06/2015.
8. **(en)** Danish Wind Energy Association (<http://www.windpower.org/en/core.htm>) , sur le site windpower .org
9. **(en)** Film about the construction of Horns rev 2 (http://www.dongenergy.com/Hornsrev2/EN/about_horns_rev_2/About_the_Project/Pages/Film_about_Hornsrev2.aspx) , sur le site dongenergy.com
10. **(en)** First Solar arrête provisoirement les travaux à Agua Caliente, en ayant atteint une puissance de 247 mégawatts (<http://www.bloomberg.com/news/2012-08-30/first-solar-stops-installation-at-agua-caliente-project.html>) Bloomberg.com, 30 août 2012
11. **(en) [PDF]** Energy - Yearly statistics 2008 (Eurostat) (http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-PC-10-001/EN/KS-PC-10-001-EN.PDF) pages 12-13 pour l'Europe et 152-153 pour la France

12. **(de)** **[PDF]** BDEW, « Erneuerbare Energie und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2013) » ([http://www.bdew.de/internet.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257B0A003EE8B8/\\$file/Energieinfo_EE-und-das-EEG-Januar-2013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257B0A003EE8B8/$file/Energieinfo_EE-und-das-EEG-Januar-2013.pdf)), BDEW, 2013 (consulté le 7 mars 2013), p. 13
13. **(en)** **[PDF]** Digest of United Kingdom energy statistics (DUKES) for 2012 - Chapter 6: Renewable sources of energy (https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/65850/DUKES_2013_Chapter_6.pdf), sur le site du Gouvernement britannique consulté le 7 octobre 2013.
14. **[xls]** Téléchargez le fichier des données définitives 2012 (http://www.rte-france.com/uploads/media/pdf_zip/eco2mix/eCO2mix_RTE_Annuel-Definitif_2012.zip), sur le site eCO2mix (RTE) consulté le 20 septembre 2013.
15. Arrêts de réacteurs (<http://www.asn.fr/index.php/content/view/full/1526/%20of%20fset%29%20>), sur le site de l'ASN consulté le 4 septembre 2013.
16. « Les coûts associés à l'insertion des ENR intermittentes dans le système électrique – Une revue de la littérature » (http://www.ceem-dauphine.org/assets/wp/pdf/CEEM_Working_Paper_11-Renaud_CRASSOUS_et_Fabien_ROQUES.pdf), décembre 2013 (consulté le 28 septembre 2016) (voir page 7).
17. Que faire de l'éolien ? (http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/etudes/Que%20faire%20de%20l%27%20C3%A9olien.pdf), site de l'association Sauvons le Climat consulté le 24 mars 2014.
18. Le gérant de la centrale Fukushima va revendre de l'électricité en Europe (<http://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/20140626trib000837128/le-japonais-tepco-va-revendre-de-l-electricite-en-europe.html>), site du journal La Tribune, 26 juin 2014.
19. RTE met en service un nouveau dispositif de prévision de l'énergie éolienne et photovoltaïque (30 novembre 2009) (<http://www.rte-france.com/fr/nous-connaître/espace-presse/dossiers-de-presse/rte-met-en-service-un-nouveau-dispositif-de-prevision-de-l-energie-eolienne-et-photovoltaïque-3>), sur le site de RTE consulté le 6 octobre 2013 (voir page 19).
20. EurObserv'ER Baromètre éolien 2013 (février 2014) (http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ_baro-jde14_fr.asp).
21. La mise en œuvre par la France du Paquet énergie-climat (<http://www.ccomptes.fr/Publications/Publications/La-mise-en-œuvre-par-la-France-du-Paquet-energie-climat>), site de la Cour des Comptes consulté le 19 mai 2014 (voir page 184).
22. Les députés abaissent à 500 m la distance minimale autorisée entre éoliennes et habitations (http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/04/16/les-deputes-abaissent-a-500-m-la-distance-minimale-autorisee-entre-eoliennes-et-habitations_4617340_3244.html), Le Monde, 16 avril 2015.
23. article L553-3 du Code de l'environnement (<https://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?idArticle=LEGIARTI00025144879&cidTexte=LEGITEXT000006074220&dateTexte=20150401>), Legifrance.
24. « Le démantèlement - Wiki Éolienne » (http://eolienne.f4jr.org/projet_eolien/demantelement#recyclage), sur *eolienne.f4jr.org* (consulté le 27 mars 2017)
25. « Installation - Wiki Éolienne » (http://eolienne.f4jr.org/projet_eolien/installation#genie_civil_-_fondations_et_terrassement), sur *eolienne.f4jr.org* (consulté le 27 mars 2017)
26. Énergie : la 'Bourse du carbone' torpillée par le parlement européen ? (<http://www.boursier.com/actualites/macroeconomie/energie-la-bourse-du-carbone-torpillee-par-le-parlement-europeen-526674.html>), sur le site Boursier.com consulté le 8 septembre 2013.
27. **(en)** « CO₂ Emissions from fuel combustion - Highlights » (<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2emissionfromfuelcombustionHIGHLIGHTSMarch2013.pdf>), sur IEA (consulté le 22 avril 2013)
28. Fabrice Nodé-Langlois, « En Suède, l'«impôt dioxyde» préserve les entreprises » (<http://www.lefigaro.fr/environnement/2009/12/31/01029-20091231ARTFIG00020-en-suede-l-impot-dioxyde-preserve-les-entreprises-.php>), sur *www.lefigaro.fr*, 30 décembre 2009
29. Coûts et rentabilité des énergies renouvelables en France métropolitaine (<http://www.cre.fr/documents/publications/rapports-thematiques/couts-et-rentabilite-des-ener-en-france-metropolitaine>), site de la CRE consulté le 3 juin 2014 (voir page 20).
30. **(en)** The Economics of Wind Energy (http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/00_POLICY_document/Economics_of_Wind_Energy_March_2009_.pdf), sur le site de l'EWEA consulté le 8 octobre 2013 (voir p. 30 à 71).
31. **(en)** Costs of low-carbon generation technologies (<http://hmccc.s3.amazonaws.com/Renewables%20Review/MML%20final%20report%20for%20CCC%209%20may%202011.pdf>), site du consulté le 8 septembre 2013.
32. Éolien en mer : l'objectif de baisse des coûts enfoncé aux Pays-Bas (<http://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/0211103842670-eolien-en-mer-l-objectif-de-baisse-des-couts-enfonce-aux-pays-bas-2012845.php>), Les Échos, 7 juillet 2016.
33. Énergies vertes : baisse des prix record au Chili (<http://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/0211230296381-energies-vertes-baisse-des-prix-record-au-chili-2022820.php>), Les Échos, 25 août 2016.
34. Les pays arabes à l'heure de la révolution énergétique (<http://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/les-pays-arabes-a-l-heure-de-la-revolution-energetique-580057.html>), La Tribune, 16 juin 2016.
35. Éolien en mer : des parcs sans subventions, une première mondiale (<https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/0211974112436-eolien-en-mer-des-parcs-sans-subventions-une-premiere-mondiale-2080012.php>), Les Échos, 14 avril 2017.
36. **(en)** World : Electricity and heat for 2014 (<http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=WORLD&product=electricityandheat&year=2014>), Agence internationale de l'énergie, 16 octobre 2016.
37. **[xlsx]** BP Statistical Review of world energy 2017 workbook (<http://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/excel/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-underpinning-data.xlsx>) (feuille 44), BP, juin 2017.

38. La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde - 15^e inventaire - édition 2013 - chapitre 1 - perspectives générales (<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/char ge.asp?inv=15&doc=15e-inventaire-Chap01-Fr.pdf>) (p. 6 à 9), site Observ'ER consulté le 5 février 2014.
39. La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde - 15^e inventaire - édition 2013 - chapitre 2 - aperçu des dynamiques régionales par filière (<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/char ge.asp?inv=15&doc=15e-inventaire-Chap02.pdf>) , site Observ'ER consulté le 5 février 2014.
40. **(en)** « Electric Power Monthly » (https://www.eia.gov/electricity/monthly/current_year/february2017.pdf) , Energy Information Administration , dépendant du département de l'Énergie des États-Unis , février 2017 (consulté le 16 juillet 2017) , p. 12 et 45 (table 1.14.B)
41. Industry installed more than 54GW of wind energy in 2016 (<https://www.windtech-international.com/industry-news/industry-installed-more-than-54gw-of-wind-energy-in-2016>) , Windtech, 10 février 2017.
42. **[PDF]** Baromètre éolien 2014 (http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/barojde16_Eolien_FR.pdf) , EurObserv'ER, février 2015.
43. **[PDF]** Baromètre éolien 2013 (http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/observ/baro-jde14_fr .asp) , EurObserv'ER, février 2014.
44. « Eolien : les 10 premiers pays producteurs » (<http://www.lesechos.fr/info/ener gie/020518015031-reperes-eolien-les-10-premiers-pays-producteurs.htm>) , sur *Les Échos*, 7 mai 2010
45. **(en)** "New World Record in Wind Power Capacity: 14,9 GW added in 2006, Worldwide Capacity at 73,9 GW" (http://www.windea.org/g/home/images/stories/pdfs/pr_statistics2006_290107.pdf) , World Wind Energy Association **[PDF]**
46. « Liste des pays » (http://www.thewindpower.net/statistiques_pays.php?tri=14) , sur *The Wind Power, base de données sur les éoliennes et parcs éoliens*, 11 mai 2012
47. **(en)** Global Wind Statistics 2013 (http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/02/GWEC-PRstats-2013_EN.pdf) , site Global Wind Energy Council consulté le 6 avril 2014.
48. **[PDF] (en)** « Global Wind Statistics 2015 » (http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-PRstats-2015_LR_corrected.pdf) , Global Wind Energy Council (GWEC), 10 février 2016 (consulté le 28 février 2016)
49. **(en) (en)** « US and China in race to the top of global wind industry » (http://www.gwec.net/index.php?id=30&no_cache=1&tx_ttnews=177&tx_ttnews=4&cHash=04fdc8c00a) , sur *gwec.net*, Global Wind Energy Council, 2 février 2009 (consulté le 8 février 2009)
50. Le Monde.fr avec AFP, « En 2016, l'éolien a dépassé les capacités installées de centrales à charbon en Europe » (http://www.lemonde.fr/ener gies/article/2017/02/09/en-2016-l-eolien-a-depasse-les-capacites-installees-de-centrales-a-charbon-en-europe_5076828_1653054.html) , sur *Le Monde.fr*, 9 février 2017 (consulté le 9 février 2017).
51. source primaire : windeurope données statistiques des industriels du secteur (<https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-in-power -2016/>).
52. Pakistan - L'éolien accélère son développement (<http://www.energies-renouvelables.org/newsletter/27-mai-2015/pakistan-eolien-accelere-son-developpement.asp>) , La lettre des énergies renouvelables du 27/05/2015.
53. **[PDF] (en)** « Global Wind Report 2012 - Annual market update » (http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/06/Annual_report_2012_LowRes.pdf) , Global Wind Energy Council, avril 2013 (consulté le 10 octobre 2013)
54. **(en)** AfDB, Eskom Sign USD365M Renewable Energy Loans (<http://www.afdb.org/en/news-and-events/article/afdb-eskom-sign-usd365m-renewable-energy-loans-8385/>) , sur le site de la Banque Africaine de Développement consulté le 28 octobre 2013.
55. **(en)** Eskom revives Wind Power Project (<http://elementalpower .com.au/news/?tag=sere-wind-farm>) , sur le site Elemental Power Industries consulté le 28 octobre 2013.
56. Programme Marocain d'Énergie Éolienne (http://www.saharawind.com/index.php?option=com_content&task=view&id=89&Itemid=2) , sur le site saharawind.com, consulté le 18 septembre 2013
57. « Site officiel de l'office national de l'électricité et de l'eau potable - Maroc » (<http://www.one.org.ma/fr/pages/interne.asp?esp=2&id1=4&id2=53&t2=1>) , sur <http://www.one.org.ma/> (consulté le 16 août 2014)
58. Maroc : le plus grand parc éolien d'Afrique a produit ses premiers kilowatts (<http://www.afrik.com/maroc-le-plus-grand-parc-eolien-d-afrique-a-produit-ses-premiers-kilowatts>) , site Afrik.com, 24 avril 2014
59. Parcs éoliens opérationnels dans la région (http://www.saharawind.com/index.php?option=com_content&task=view&id=38&Itemid=55) , site Saharawind consulté le 20 janvier 2014.
60. MAROC : Initiative 1 000 MW éolien (<http://www.energiezoom.com/article-326.htm>) , sur le site energiezoom.com
61. L'Éthiopie inaugure la plus grande ferme éolienne au sud du Sahara (<http://economie.jeuneafrique.com/regions/afrique-subsaharienne/20316-l-ethiopie-inaugure-la-plus-grande-ferme-eolienne-au-sud-du-sahara.html>) , site Jeune Afrique consulté le 20 janvier 2014.
62. Ashegoda, Éthiopie : le plus grand parc éolien d'Afrique subsaharienne (<http://lenergeek.com/2013/12/12/ashegoda-ethiopie-le-plus-grand-parc-eolien-dafrique-subsaharienne/>) , site L'énerGeek consulté le 20 janvier 2014.
63. L'Éthiopie se met aux énergies vertes (<http://www.bfmtv.com/economie/lethiopie-se-met-vert-633472.html>) , site BFM-TV consulté le 20 janvier 2014.
64. Source Iberdrola, in *Les Échos*, 10 décembre 2007, page 22
65. **(es)** Negocio de Renovables (http://www.iberdrola.es/webibd/corporativa/iberdrola?IDP_AG=ESWEBCONLINRENOVABLES&codCache=13804893852209759) , sur le site d'Iberdrola consulté le 29 septembre 2013.
66. **(en)** Wind - Facts at a Glance (<http://www.nexteraenergyresources.com/what/wind.shtml>) , sur le site de NextEra Energy Resources consulté le 29 septembre 2013.
67. **(en)** Wind power : 3% of the wind power capacity installed in the world (http://www.acciona-energia.com/activity_areas/wind.aspx) , sur le site d'Acciona Energy consulté le 29 septembre 2013.

68. **(en)** Sell-off of Babcock & Brown's head company looming (<http://www.theaustralian.com.au/business/companies/sell-off-of-babcock-browns-head-company-looming/story-fn91v9q3-1226668464009#>) , sur le site du journal The Australian consulté le 29 septembre 2013.
69. L'énergie éolienne représente la filière principale d'EDF Énergies Nouvelles (<http://www.edf-energies-nouvelles.com/fr/activites/energies/Eolien/>), sur le site d'EDF-Énergies Nouvelles consulté le 29 septembre 2013.
70. **(en)** Wind Power (<http://www.enel.com/en-GB/group/production/wind/>) , sur le site d'ENEL consulté le 29 septembre 2013.
71. **(en)** Our Markets (<http://www.edpr.com/our-business/our-markets/>), sur le site d'EDP Renewables consulté le 29 septembre 2013.
72. **(en)** Power Mix (<http://eng.cpicorp.com.cn/Power%20Mix.htm>) , sur le site de CPIC consulté le 29 septembre 2013.
73. Site du Kite Wind Generator (<http://www.kitegen.com/>)
74. : 8 440 heures de fonctionnement/an dont 3 300 heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale/an pour le parc éolien Thorntonbank en mer du Nord ; chiffres basé sur près de 20 ans de relevés éoliens à partir de 1986 (http://www.c-power.be/applet_mernu_fr/eoliennes/fonctionnement.htm) c-power.be
75. **(en)** Deep water (http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Deep_Water.pdf), sur le site d'EWEA consulté le 9 septembre 2013.
76. *Du vent pour des watts propres* (<http://www.news.fr/actualite/societe/0,3800002050,39366687,00.htm>) , 1^{er} février 2007
77. **[PDF] (en)** Dossier éoliennes flottantes (http://www.hydro.com/library/attachments/en/press_room/floating_windmills_en.pdf) hydro.com, voir "archive".
78. **(en) [PDF]** Pure Power III (2011) (http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Pure_Power_III.pdf) , sur le site d'EWEA consulté le 9 septembre 2013.
79. **(en) [PDF]** Global Wind Energy Outlook 2012 (http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2012/11/GWEO_2012_lowRes.pdf), sur le site du GWEC consulté le 9 septembre 2013.
80. « Article R122-8 code de l'environnement » (<http://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT00006074220&idArticle=LEGIARTI000022327853&dateTexte=20100811>), sur *legifrance.gouv.fr* (consulté le 11 août 2010)
81. review of solutions to global warming, air pollution, and energy security (<https://web.stanford.edu/group/efmh/jacobson/Articles/I/ReviewSolGW09.pdf>) , sur le site stanford.edu
82. « Les terres rares sont-elles indispensables pour les moteurs électriques, les éoliennes et les panneaux solaires ? » (<http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/les-terres-rares-sont-elles-indispensables-pour-les-moteurs-electriques-les-eoliennes-et-les-panneaux-solaires-1300/>) , sur *Techniques de l'Ingénieur* (consulté le 8 août 2017).
83. En Chine, les terres rares tuent des villages (http://www.lemonde.fr/asi-pacifique/article/2012/07/19/en-chine-les-terres-rares-tuent-des-villages_1735857_3216.html) , sur *Le Monde*, 19 juillet 2012.
84. Les éoliennes accroissent-elles les émissions de CO₂ ? (<http://ecologie.blog.lemonde.fr/2012/01/10/les-eoliennes-accroissent-elles-les-emissions-de-co2/>) , Audrey Garric, *Le Monde.fr*, 10 janvier 2012
85. « La rareté de certains métaux peut-elle freiner le développement des énergies renouvelables ? » (<http://decrypterlenergie.org/la-rarete-de-certains-metaux-peut-elle-freiner-le-developpement-des-energies-renouvelables>), 19 novembre 2015 (consulté le 8 août 2017).
86. **[RTF]** Rapport de l'Académie de Médecine (http://www.academie-medecine.fr/upload/base//rapports_267_fichier_lie.rtf)
87. Article sur le site VentduBocage (<http://ventdubocage.net/sante3.htm>)
88. non trouvé le 8 mars 2013 (<http://energie2007.fr/actualites/fiche/2192>) , sur le site energie2007.fr
89. **(en)** Curry & Kerlinger . 2006. *Études sur les éoliennes* (<http://www.currykerlinger.com/studies.htm>)
90. LPO. *L'énergie éolienne et la conservation de la nature : Étude de l'impact de l'éolien sur les oiseaux* (<http://www.lpo.fr/etudes/eolien/index.shtml>) , par la Ligue pour la protection des oiseaux
91. LPO, « Impacts des éoliennes sur les oiseaux - Éolien Biodiversité » (<http://www.eolien-biodiversite.com/impacts-connus/article/eoliennes-et-oiseaux>) , sur *www.eolien-biodiversite.com* (consulté le 27 mars 2017)
92. **(en)** Variation in bat and bird fatalities at wind energy facilities: assessing the effects of rotor size and tower height (<http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=18733061>) , sur le site cat.inist.fr
93. « Lignes directrices pour la prise en compte des chauves-souris dans les projets éoliens » (http://www.eurobats.org/sites/default/files/documents/publications/publication_series/EUROBATS_No6_Frz_2014_WEB_A4.pdf)
94. LPO, « Impacts des éoliennes sur les chauves-souris - Éolien Biodiversité » (<http://www.eolien-biodiversite.com/impacts-connus/article/eoliennes-et-chauves-souris>) , sur *www.eolien-biodiversite.com* (consulté le 27 mars 2017)
95. « Mise en péril d'espèces protégées : FNE assigne EDF Énergies Nouvelles » (<http://www.fne.asso.fr/actualites/mise-en-p%C3%A9ril-d%E2%80%99esp%C3%A8ces-prot%C3%A9g%C3%A9es-fne-assigne-edf-energies-nouvelles>), sur *France Nature Environnement*, 4 août 2017 (consulté le 25 août 2017).
96. **(en)** Bureau du NWS à Buffalo, NY, « Wind Farm Interference Showing Up on Doppler Radar » (<http://www.erh.noaa.gov/buf/windfarm.htm>) , sur *noaa.gov*, NOAA, 8 juin 2009 (consulté le 1^{er} septembre 2009)
97. **(de)** « Schomer, et al, Wind Turbine Noise Conference, Denver , August 2013 | Waubra Foundation » (<http://waubrafoundation.org.au/resources/schomer-et-al-wind-turbine-noise-conference-denver-august-2013/>) , sur *waubrafoundation.org.au* (consulté le 27 mars 2017), p. 353
98. **(en)** publisher, « Duke Energy's Shirley Wind Turbines Declared "Human Health Hazard" » (<http://bccrwe.com/index.php/8-news/16-duke-energie-s-shirley-wind-declared-human-health-hazard>) , sur *bccrwe.com* (consulté le 27 mars 2017)

99. **(en)** « Cape Bridgewater Wind Farm Acoustic Study | Pacific Hydro » (<http://www.pacifichydro.com.au/english/our-communities/communities/cape-bridgewater-acoustic-study-report/?language=en>) , sur www.pacifichydro.com.au (consulté le 27 mars 2017)
100. « Appel à candidatures d'experts scientifiques groupe de travail (GT) « Effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens » | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail » (<https://www.anses.fr/fr/content/appele-candidatures-d-experts-scientifiques-groupe-de-travail-gt-%C2%ABeffets-sanitaires-des>) , sur www.anses.fr (consulté le 27 mars 2017)
101. <http://www.seas.harvard.edu/news/2013/02/rethinking-wind-power>
102. « Combien faudrait-il d'éoliennes pour satisfaire la consommation électrique française ? », *Connaissance des Énergies*, 11 juin 2012 (lire en ligne (<http://www.connaissancedesenergies.org/combien-faudrait-il-d-eoliennes-pour-satisfaire-la-consommation-electrique-francaise-120611#notes>))
103. Code de l'environnement - Article L553-3 modifié par Ordonnance n°2012-34 du 11 janvier 2012 - art. 17 (<http://www.legifrance.gouv.fr/affichCodeArticle.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220&idArticle=LEGIARTI000025144879&dateTexte=20130918>) , sur le site Legifrance consulté le 18 septembre 2013.
104. Questions / réponses - Énergie éolienne (http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Energie-eolienne,3735-.html#_ftnref1) , sur le site du Ministère de l'Écologie consulté le 18 septembre 2013.
105. Éoliennes du Limousin : on les démonte (<http://www.ladepeche.fr/article/2010/04/21/820617-Eoliennes-du-Limousin-on-les-demonte.html>) , sur le site [ladepeche.fr](http://www.ladepeche.fr)
106. Ventdubocage. *Liste d'accidents* . (<http://ventdubocage.net/accident.htm>)
107. **(en)** **[PDF]** Estimating maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences (<http://www.earth-syst-dynam.net/2/1/2011/esd-2-1-2011.pdf>) , sur le site Earth System Dynamics - 11 février 2011.
108. **(en)** **[PDF]** International Energy Agency (IEA) - Agence internationale de l'énergie Key World Energy Statistics 2013 (http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2013_FINAL_WEB.pdf)
109. accord signé par 9 pays de l'UE lors du Conseil de l'énergie à Bruxelles le 7 décembre 2009 ; source : Bulletin ADIT BE Allemagne 466 du 15/01/2010 (<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/61859.htm>) , intitulé *Un super-réseau électrique vert pour l'Europe en Mer du Nord : vers un marché commun de l'électricité*
110. BE de l'Ambassade de France en Allemagne du 2/11/2006 (<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/39825.htm>)
111. **[PDF]** A Multifractal description of wind records (<http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0411534.pdf>) , sur le site arxiv.org
112. non trouvé le 8 mars 2013 (http://pepei.pennnet.com/Articles/Article_Display.cfm?Section=ARTICLE&PUBLICATION_ID=6&ARTICLE_ID=356713&C=INDUS&dcmp=rss) , sur le site pepei.pennnet.com
113. non trouvé le 8 mars 2013 (http://www.hydrocoop.org/cinq_fois.doc) , sur le site [hydrocoop.org](http://www.hydrocoop.org)
114. **(en)** The first hydrogen society (<http://www.statoil.com/en/NewsAndMedia/Multimedia/features/Pages/HydrogenSociety.aspx>) , sur le site [statoil.com](http://www.statoil.com)
115. *Notre système électrique à l'épreuve de la canicule* . (<http://www.industrie.gouv.fr/energie/electric/canicule2003.htm>) , sur le site [gouv.fr](http://www.gouv.fr), non trouvé le 20 septembre 2013
116. **[PDF]** France. Direction Générale de l'Énergie et des Matières Premières. Observatoire de l'énergie. 2006. *Électricité et politique énergétique : spécificités françaises et enjeux dans le cadre européen*. (<http://www.industrie.gouv.fr/energie/statistiq/pdf/elec-pol-energetique.pdf>) À la figure 7, le pic de 5 TWh en 2003 est bien visible, ce qui correspond bien à l'énergie fournie par 2 tranches de 1 000 MW pendant 2 mois
117. **(en)** EnergyPulse, « Wind Generation's Performance during the July 2006 California Heat Storm » (http://www.energypulse.net/centers/article/article_display.cfm?a_id=1332) , sur le site [energypulse.net](http://www.energypulse.net)
118. L'énergie éolienne, une voie énergétique d'avenir ? (<http://www.actualites-news-environnement.com/20532-energie-eolienne-voie-energetique-avenir.html>) , sur le site [actualites-news-environnement.com](http://www.actualites-news-environnement.com) du 18 mai 2009
119. Émissions 2007 de CO₂ dans l'Union européenne (http://www.statistiques-mondiales.com/ue_co2.htm)
120. **[PDF]** Étude IFP - 15 mars 2006 (http://www.ifp.fr/IFP/fr/espacepresse/Dossier_Castor/6-DP_fiche_Danemark.pdf)
121. - *Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2007* (http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2007_5/en) , sur le site [europa.eu](http://www.eea.europa.eu)
122. **(en)** The Combined Power Plant, « Université de Kassel Combined power plant » (<http://www.kombikraftwerk.de/index.php?id=27>) »
123. **(en)** The Combined Power Plant video, « Université de Kassel Combined power plant video » (<http://www.youtube.com/watch?v=tR8gEMpz0s4>) »
124. Bal, J. L., & Philibert, C. (2013). *Les caractéristiques des énergies intermittentes électriques sont-elles problématiques? Les particularités techniques du solaire et de l'éolien*. Responsabilité et environnement, (1), 8-15 (résumé (http://www.cairn.info/resume.php?ID_ARTICLE=RE_069_0008)) .
125. « Énergie - Stockage de l'énergie éolienne : un site pilote en Allemagne » (<http://www.lesenr.fr/actualites/576-energiesite-pilotestockageenergie.html>) , [lesenr.fr](http://www.lesenr.fr) du 24 août 2012
126. Audrey Garric *La Belgique veut créer une île pour stocker l'énergie éolienne* (<http://ecologie.blog.lemonde.fr/2013/01/24/la-belgique-veut-creer-une-ile-pour-stocker-lenergie-eolienne/>) ; 24 janvier 2013, consulté le 16 mars 2013
127. rapport en allemand (<http://www.kombikraftwerk.de/>) , ou compte rendu en français (<http://www.enerzine.com/15/3271+L-Allemagne-cherche-a-mieux-combiner-ses-energies+.html>)
128. **(es)** El Hierro, futur Eldorado (<http://www.marcelgreen.com/article/lire/1898>) , sur le site [marcelgreen.com](http://www.marcelgreen.com) du 22 avril 2011
129. **(en)** dutch water sector (2011), *North point of Sand Motor is already at work* (<http://www.dutchwatersector.com/news/news/2011/10/north-point-of-sand-motor-is-already-at-work/>) 2011-10-11, consulté 2013-03-16

130. F. Lempérière (2011), *Quelles énergies en 2050 ?* (http://www.hydrocoop.org/fr/publications/Quelles_energies_en_2050.pdf) ; juillet 2011, consulté 16 mars 2013.
131. Stockage d'énergie éolienne par compression d'air (<http://www.generalcompression.com/index.html>) , sur le site [generalcompression.com](http://www.generalcompression.com)
132. **(en)** Storing green electricity as natural gas (<http://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2010/04/green-electricity-storage-gas.jsp>) , sur le site de l'institut Fraunhofer du 5 mai 2010
133. « GRTgaz va tester à Fos-sur-Mer la production d'hydrogène « renouvelable » » (http://www.lesechos.fr/24/12/2015/Les-Echos/22094-086-ECH_grtgaz-va-tester-a-fos-sur-mer-la-production-d-hydrogene---renouvelable---.htm) , sur *lesechos.fr*, 24 décembre 2015 (consulté le 11 mai 2016)
134. Métiers de l'éolien de fshore : la filière s'organise (<http://www.cleantechrepublic.com/2012/06/20/metiers-eolien-offshore-filiere/>), cleantechrepublic, 2012
135. **[PDF]** European Wind Energy Association. 2002. *Wind Energy. The Facts - Executive Summary* (http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WETF/Facts_Summary.pdf)
136. **[PDF]** Cour des Comptes, Rapport de la Cour des Comptes sur les coûts de la filière électronucléaire (http://www.ccomptes.fr/content/download/1794/17981/version/6/file/Rapport_thematique_filiere_electronucleaire.pdf) , sur le site de la Cour des Comptes (voir p. 280 et 283).
137. Observatoire du 2e trimestre 2013 (<http://www.cre.fr/media/fichiers/marches/consulter-l-observatoire-du-2e-trimestre-2013>), sur le site de la CRE consulté le 10 octobre 2013 (voir p. 31).
138. Énergie éolienne : le français Alstom signe au Brésil (<http://www.zdnet.fr/actualites/energie-eolienne-le-francais-alstom-signe-au-bresil-39782596.htm>) , ZDnet.fr, 17 septembre 2012
139. **(en)** **[PDF]** 2011 Cost of Wind Energy Review (<http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56266.pdf>) , sur le site du National Renewable Energy Laboratory (NREL) consulté le 10 septembre 2013.
140. *Le Pari de l'Éolien, Centre d'Analyse Stratégique, novembre 2009*, www.strategie.gouv.fr (<http://www.strategie.gouv.fr>)
141. Voir aussi : *Énergie éolienne et intégration au réseau* , Brendam Fox, Dunod, "L'Usine nouvelle", Paris, 2009
142. Appel de soumissions pour la construction d'éoliennes au Québec au site officiel d'Hydro-Québec (http://www.hydroquebec.com/distribution/fr/marchequbecois/ao_200503/index.html)
143. Mémoire du 23 septembre 2005 sur la position de l'Union des producteurs agricoles du Québec à propos des éoliennes (http://www.upa.qc.ca/fra/salle_presse/default.asp?idrubrique=68)
144. Les professionnels de l'éolien (<http://fee.asso.fr/>) , site de FEE consulté le 12 octobre 2013.
145. **(en)** EWEA (<http://www.ewea.org/>), site de l'EWEA.
146. **(en)** Site du GWEC. (<http://www.gwec.net/>)
147. **(en)** Site de la WWEA. (<http://www.wwindea.org/>)
148. Planète éolienne - Fédération des énergies du vent (<http://www.planete-eolienne.fr/>) , site de Planète éolienne consulté le 12 octobre 2013.
149. Vent de Colère - Non à l'éolien industriel (<http://www.ventdecolere.org/>), site de Vent de Colère consulté le 12 octobre 2013.
150. Plateforme Européenne contre l'Éolien Industriel (<http://www.epaw.org/index.php?lang=fr>) , site de l'EPAW consulté le 12 octobre 2013.
151. Sondage Louis Harris - 28 avril 2005 (http://www.planete-eolienne.fr/documents/rae_sondage.pdf)
152. Sondage BVA juillet 2008 (<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=56903&ref=21479&p1=B>)

Voir aussi

Articles connexes

Articles généraux

- Énergie renouvelable
- Vent

Articles connexes

- Potentiel éolien
- Éolienne
- Énergie éolienne aérienne
- Petit éolien
- Énergie éolienne au Québec
- Centrale hydro-éolienne
- Éolienne offshore
- Aérogénérateur

Sur les autres projets Wikimedia :

 *Énergie éolienne*, sur Wikimedia Commons

- Smart grid

Bibliographie

- Arnaud Michon, *Le Sens du vent, notes sur la nucléarisation de la France au temps des illusions renouvelables*, Éditions de l'Encyclopédie des Nuisances, 2010.

Liens externes

- Baromètre éolien EurObserv'ER 2013 pour l'UE
 - Base de données eCO2mix (RTE) : consommation, production, échanges transfrontaliers, émissions de CO₂
 - Cadre législatif en France concernant l'installation d'éoliennes (fichier PDF)
 - Wiki Éolienne Base de connaissances sur l'énergie éolienne
 - Rapport Mondial 2012 sur l'Énergie Éolienne par l'Association Mondiale de l'Énergie Éolienne (*World Wind Energy Association - WWEA*)
 - Énergie pour les nuls
-

Ce document provient de « https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Énergie_éolienne&oldid=140072644 ».

Cette page a été modifiée pour la dernière fois le 26 août 2017 à 10:39.

Droit d'auteur : les textes sont disponibles sous licence Creative Commons attribution, partage dans les mêmes conditions ; d'autres conditions peuvent s'appliquer. Voyez les conditions d'utilisation pour plus de détails, ainsi que les crédits graphiques. En cas de réutilisation des textes de cette page, voyez comment citer les auteurs et mentionner la licence.

Wikipedia® est une marque déposée de la Wikimedia Foundation, Inc., organisation de bienfaisance régie par le paragraphe 501(c)(3) du code fiscal des États-Unis.