

# Énergie éolienne

L'**énergie éolienne** est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur *ad hoc* comme une éolienne ou un moulin à vent.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, elle tire son nom d'Éole (en grec ancien Αἰολος, Aiolos), le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique .

L'énergie éolienne peut être utilisée de deux 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 énergie électrique : l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.



Éolienne contemporaine dans un paysage rural.

## Historique

Pendant des siècles<sup>[Combien ?]</sup>, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu est le moulin à vent utilisé par le meunier pour la transformation du blé en farine, on peut aussi citer les nombreux moulins à vent servant à l'assèchement des polders en Hollande.

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

Depuis les années 1990, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 1 MW. Ces unités se sont démocratisées et on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs 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 générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.



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

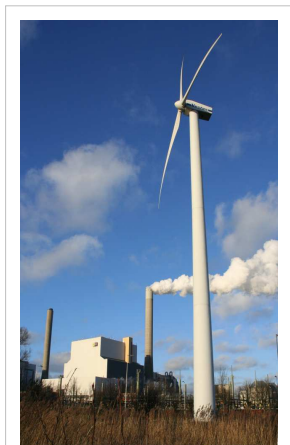
## Quelques ordres de grandeur et comparatif succinct des modes de production d'électricité

- La puissance d'un outil de production d'électricité se mesure en GW (gigawatt) et son multiple par 1000, le TW (térawatt). La production d'électricité (l'énergie produite) se mesure en GWh (gigawattheure) et en TWh (térawattheure).
- Comme presque toutes les énergies renouvelables (exceptées les énergies géothermique 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'énergies 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 photosynthèse <sup>[1]</sup>.
- Une éolienne de 2MW fonctionnant à pleine puissance pendant 1/4 de l'année produit 4 à 5 millions de kWh, soit l'électricité domestique consommée par 4000 personnes en moyenne (hors chauffage) <sup>[2]</sup>.
- En 2007, l'Allemagne disposait de 22.3GW de puissance éolienne installée, les États-Unis 16.8GW, l'Espagne 15.1GW, l'Inde 8GW, la Chine 6.1GW et la France 2.4GW (uniquement à terre) <sup>[3]</sup>, <sup>[4]</sup>. En 2008, les États-Unis sont devenus le premier pays pour la capacité d'énergie éolienne avec 25170 MW installés devant l'Allemagne (23902 MW) <sup>[5]</sup>. Ce secteur emploie 85000 Américains <sup>[5]</sup>.
- En France, le potentiel éolien est très important (le 2<sup>e</sup> d'Europe) <sup>[6]</sup> : 20GW terrestres pour une production de 50TWh par an, et 40GW offshore pour une production de 150TWh par an, soit un potentiel éolien théoriquement exploitable de 200TWh par an. S'il était disponible en 2040, il représenterait alors 31% de la consommation française prévisible d'électricité. Cette production de 200TWh/an se répartirait ainsi : 8000 éoliennes offshore de 5MW sur 40 grandes centrales installées entre 15 et 40km de la côte, à des profondeurs maximales d'eau de 200m ; 8000 éoliennes terrestres de 3MW, soit moins du quart du nombre de pylônes très haute tension (400kV) installés en France (qui mesurent 50 à 55m de haut - et jusqu'à 100m dans les zones vallonnées, contre 70 à 100m pour les mâts des grandes éoliennes).

(chiffres de 2006)

### Éléments comparatifs sur la puissance

- un aérogénérateur : de quelques kW jusqu'à 5MW ; la plupart des grandes éoliennes installées aujourd'hui en France ont une puissance de 1 à 3MW).
- une centrale thermique à flamme : ?
- une centrale solaire photovoltaïque : de quelques centaines de watts à 20MW (record 20MW : centrale solaire de Beneixama en Espagne)
- une centrale solaire thermodynamique : de 2 à 350MW (record : 354MW avec la centrale de Luz Solar Energy dans le désert de Mojave en Californie, États-Unis)
- une centrale hydro-électrique : de quelques kW à 3000MW (record : 32 turbines de 700MW soit 22400MW au Barrage des Trois-Gorges en Chine)



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

- un réacteur nucléaire : de l'ordre de 900 à 1300MW en général (record : 1550MW à la centrale nucléaire de Civaux au sud de Poitiers) .

### **Éléments comparatifs sur la production**

Toutefois la puissance est représentative du pic de production possible, pas de la production totale ; les systèmes solaires et éoliens sont dépendant des conditions climatiques et météorologiques, dont les systèmes à énergie fossile ou nucléaire sont totalement affranchis.

- Une tranche nucléaire de 1000MW de puissance électrique peut délivrer, en l'absence d'incident et dans le cadre d'un fonctionnement en base, environ 8000GWh par an. Les centrales nucléaires fonctionnant en base atteignent des facteurs de charge supérieurs à 95%. Il est compliqué de réduire la production d'une centrale et si elle excède la consommation, il faut la stocker, ce qui, en France, est réalisé grâce à des STEP ; dans ce cadre les centrales ont des facteurs de charge de l'ordre de 80%, correspondant à une production annuelle de 7000MWh par tranche de 1MW électrique.
  - Les centrale à combustible fossile (charbon, fioul, gaz) peuvent aussi fonctionner en base, mais en plus, contrairement aux centrales nucléaire, il est possible de les arrêter et de le redémarrer assez rapidement pour assurer les pointes de consommation. Leur courant étant plus cher à produire que celui des centrale nucléaire, elles sont sollicitées pour ces pointes.
  - Le chiffre retenu pour l'éolien européen installé est de 2000MWh de production annuelle par MW de puissance installée, soit un facteur de charge d'environ 23% (fonctionnement de 2000 heures d'équivalent plein régime par an).
  - Le solaire photovoltaïque produit entre 1000 et 1200GWh par MW de puissance installée en France, cela peut monter à 2000MWh par MW dans les meilleurs (et rares) sites européens. Cette production varie en fonction du rendement des installations (celles d'avant l'an 2000 étaient de 10% alors que les nouvelles font plutôt 15%) et en fonction de l'ensoleillement du lieu. Les chiffres annuels de production solaire photovoltaïque annoncés par différents pays montrent des cas extrêmes : en Allemagne ils sont de 574MWh par MW, et en Californie de 1458MWh par MW.
  - compte tenu de leur production intermittente, ni l'éolien ni le solaire ne peuvent assurer la production de pointe, et on peut difficilement compter sur eux pour la production de base. Il faut les compléter par soit un moyen de stockage d'énergie, soit une unité de production de type plus classique.
-

## 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.

Quelques initiatives font penser que le petit éolien, c'est-à-dire l'éolien individuel, pourrait bientôt se développer en devenant compétitif et discret ; même en ville <sup>[7]</sup> .



Éolienne contemporaine dans la prairie de Mongolie-Intérieure

## Énergie éolienne dans le réseau électrique français

Le gestionnaire du réseau électrique français (RTE), estime que l'intégration de l'électricité éolienne dans le réseau actuel est possible sans difficultés majeures à hauteur de 10 à 15GW, 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. <sup>[8]</sup>

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont le plus souvent regroupées dans un parc éolien d'environ 5 à 50 machines, mais il existe aussi des machines isolées. On note également l'existence d'un projet, non encore réalisé, visant à intégrer des éoliennes de type Darrieus dans les pylônes électriques : le projet Wind'It.

RTE (Réseau de Transport d'Électricité), une filiale de EDF, achemine le courant électrique à travers le réseau. Ce courant électrique doit avoir une fréquence de 50Hz (en France comme dans de nombreux pays à travers le monde, voir article : Réseau électrique).

Une éolienne raccordée au réseau se doit donc de fournir cette fréquence, quelle que soit la vitesse du vent. Cette fréquence constante passe par une vitesse de rotation constante des pales. Cette dernière est obtenue par régulation notamment avec l'orientation des pales.

Si la vitesse du vent est trop faible (par exemple moins de 10km/h), l'éolienne s'arrête en raison des forces de frottement sec qui s'opposent à la rotation de l'hélice. Cette diminution de la vitesse de rotation ne permet plus de fournir cette fréquence. Dans ce cas, l'éolienne n'est donc plus productrice d'électricité, mais pourrait au contraire devenir consommatrice, il est donc nécessaire de la déconnecter.

Si la vitesse du vent est trop forte (supérieure à 100km/h par exemple), l'éolienne est mise en sécurité et déconnectée du réseau, ses pales sont *mises en drapeau* et s'arrêtent pour éviter des sollicitations qui pourraient les briser.

La loi française oblige EDF à acheter le courant produit par tout système de production d'électricité, avec un prix d'achat bonifié pour l'éolien (sauf pour les éoliennes de plus de 12MW)<sup>[9]</sup> , pour favoriser cette jeune filière en plein développement et permettre à la France d'atteindre les objectifs de la directive européenne.<sup>[10]</sup>

Le 04 mars 2009, un décret<sup>[11]</sup> a adapté le dispositif des certificats d'achat aux « zones de développement de l'éolien ». Ces certificats (CODOA) ouvrent droit à l'obligation d'achat

d'électricité aux installations éoliennes en « zones de développement de l'éolien » ou ZDE ; Le Codoa impliquait antérieurement une puissance inférieure ou égale à 12 MW (limite fixée décret 2000-1196 du 6 décembre 2000) et une distance d'au moins 1.500m entre deux parcs éoliens exploités par un même opérateur). En ZDE, ces limites de puissance et de distance n'ont plus d'objet puisque la puissance minimale et maximale y sont fixées par l'arrêté préfectoral de création de la ZDE. Le préfet devra publier au plus tard le 1er février de chaque année un état des ZDE du département faisant apparaître notamment la puissance résiduelle de chaque zone pouvant encore ouvrir droit à obligation d'achat. le CODOA n'est valable que pour la durée du contrat d'achat d'électricité et est annulé si l'installation n'a pas été mise en service (sauf prolongation sur demande justifiée). En cas de recours contentieux contre l'une des autorisations nécessaires à la construction et à l'exploitation de l'installation, le délai de trois ans est suspendu jusqu'au prononcé d'une décision juridictionnelle irrévocable.

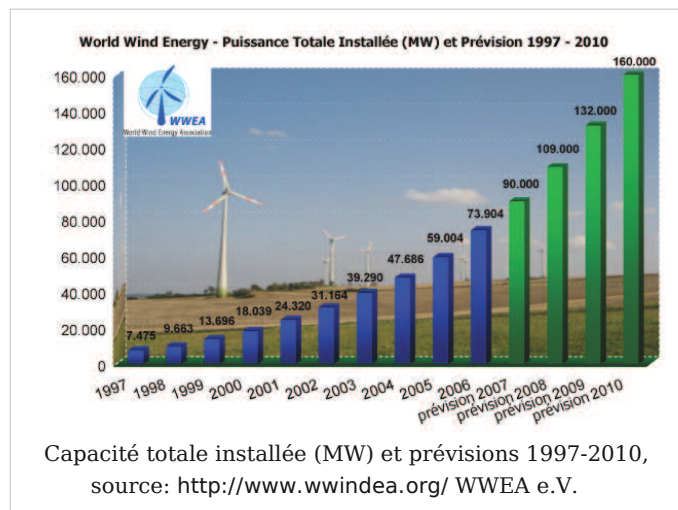
Rem : Le Codoa n'est pas nécessaire pour toute personne demandant à bénéficier de l'obligation d'achat d'électricité photovoltaïque par unité d'une puissance installée inférieure ou égale à 250 kW crête.

## Caractéristiques techniques

Le rendement énergétique (de même que la puissance développée) des éoliennes est fonction de la vitesse du vent, plus précisément du cube de cette vitesse. Les éoliennes actuellement commercialisées ont besoin d'un vent dans la gamme de 11 à 90km/h (3 à 25m/s). Les futures éoliennes, dont les premiers prototypes sont mis en service courant 2006, acceptent des vents de moins de 4 à plus de 200km/h (1 à 60m/s). Comme l'énergie solaire et d'autres énergies renouvelables, l'éolien a besoin soit d'une énergie d'appoint pour les périodes moins ventées, soit de moyens de stockage de l'énergie produite (batteries, stockage hydraulique ou plus récemment, hydrogène).

## Économie de l'énergie éolienne

Des milliers d'éoliennes fonctionnent à l'heure actuelle dans diverses régions du monde, avec une capacité totale de plus de 93800MW à fin 2007, et l'Europe y prend part à 65% (fin 2006<sup>[12]</sup>). Ne sont pas comptabilisées dans ce total quelques compagnies privées reliées ou non au réseau. Les pays qui s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service de champs d'éoliennes qui n'existaient pas auparavant). De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les États par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont les pays occidentaux (Amérique et Europe), mais l'Asie, avec l'Inde et la Chine, commence à tenir un rang important.



L'Allemagne est l'un des principaux producteurs d'électricité éolienne avec 22247MW de puissance installée à la fin de l'année 2007. Avec plus de 30000emplois, cette activité est le troisième poste d'exportation du pays<sup>[réf. nécessaire]</sup>. Le Danemark voisin est le plus important fabricant mondial d'éoliennes et compte 500 watts éoliens par habitant (contre 40 en France) en 2008 ( 2445MW installé /60 millions d'habitants ==> 40,75 watts de puissance éolienne installé par personne). En 2008, les États-Unis sont devenus le premier pays pour la capacité d'énergie éolienne avec 25170 MW installés devant l'Allemagne (23902 MW)<sup>[5]</sup>. Ce secteur emploie 85000 Américains<sup>[5]</sup>.

L'Espagne qui a une puissance installée de 15145MW. La France était en 2007 le 6<sup>e</sup> producteur d'énergie éolienne en Europe avec 2455MW (WWEA 2006).

À titre de comparaison, la puissance installée en énergie nucléaire est de 21000MW en Allemagne, de 63000MW en France et de 98000MW aux États-Unis (chiffres de 2003 <sup>[13]</sup>)

Le Maroc, premier producteur d'énergie éolienne du continent africain, produit 140MW par an (2007) ; cette production va s'accroître dans les années à venir.

Les chiffres ci-dessus doivent être pondérés en tenant compte du *facteur de charge*, c'est-à-dire de la durée de fonctionnement et de production de l'équipement dans une année. Pour l'éolien, le facteur de charge est d'au plus de 20%. La plupart des éoliennes terrestres fonctionnent avec un facteur de charge de 25% par année, exceptionnellement 35%. Par exemple pour l'Allemagne<sup>[14]</sup> il n'est que de 16% en 2005, contre un facteur de charge de plus de 80% pour une centrale nucléaire<sup>[15]</sup>.

On peut observer de plus que le facteur de charge diminue avec l'augmentation du parc d'éoliennes, conséquence directe de l'exploitation de sites de moins en moins ventés (hors offshore).

Selon l'Observatoire des Énergies Renouvelables, dans un rapport publié par EDF<sup>[16]</sup>, l'éolien est actuellement la filière énergétique la plus dynamique dans le monde et plus particulièrement dans l'Union européenne où la production d'électricité éolienne a augmenté de 37.8% par an en moyenne de 1993 jusqu'en 2002. Cette croissance a atteint 59% par an sur la même période pour la France, qui était largement en retard dans ce domaine. Selon la même source, pour les années 2003-2004, la croissance dans l'Union Européenne reste soutenue avec un taux de 28.9% annuel (42.9% en France) sur ces deux années<sup>[17]</sup>, et représente désormais 12.4% de la production d'ENR (énergies renouvelables) de l'UE, en passe de dépasser la production à partir de biomasse (production : 12.9%, croissance : 10,8 %) comme 2<sup>e</sup> source électrique d'origine renouvelable, après l'hydraulique (production : 73.3%, croissance nulle).

De nouvelles fermes éoliennes en mer (éolien offshore) sont envisagées partout dans le monde. Le Danemark est l'un des acteurs les plus importants, avec son laboratoire Risø, très renommé ; le pays produit environ 20% de son électricité avec des éoliennes. Les éoliennes produisent 1 %<sup>[12]</sup> de la production de l'électricité dans le monde. La taille la plus rentable et la plus pratique pour les éoliennes actuellement commercialisées semble être autour de 600kW à 3MW, groupées dans de grandes fermes éoliennes. Les nouvelles technologies en cours de développement cherchent à produire des systèmes beaucoup plus souples en termes de "puissance rentable".

- L'Allemagne, leader mondial dans cette filière, continue depuis 1999 à installer une moyenne de 2GW de puissance supplémentaire par an.

- L'Espagne, depuis 2002, a adopté le rythme de l'Allemagne et développe sa puissance installée d'environ 2GW par an également.
  - Le Danemark, a quasiment stoppé le développement de ses installations depuis 2003 ; il en est au stade d'une économie de remplacement. La production d'électricité éolienne dans ce pays représente sensiblement 20% de sa consommation d'électricité. A ce niveau, il n'est pas possible dans l'état actuel des connaissances et des techniques d'aller plus loin à cause de la variabilité imprévisible de la production d'électricité éolienne en injection directe sur le réseau. Ce pays géographiquement totalement plat, n'a pas la possibilité de développer la technique des STEP utilisée en France et qui nécessite des dénivelés ( voir plus loin le paragraphe sur le stockage ), il lui faudra donc trouver une autre forme de stockage de l'énergie que celle là, pourtant au point . Des recherches sont en cours pour stocker une partie de la production sous forme d'hydrogène par exemple. Ces recherches ont pour objectif de pouvoir un jour dépasser cette limite des 20% (site de recherche Espagnol de Sotavento à Montféra). Les émissions de CO<sub>2</sub> par kWh électrique du Danemark sont parmi les plus élevés d'Europe, car le reste de l'électricité y est produite par des centrales à hydrocarbure qui fonctionnent à plein régime les jours sans vent.
  - En 2007, la capacité éolienne installée aux États-Unis a augmenté de 45% et 9 milliards de dollars ont été investis dans ce secteur<sup>[1]</sup> . Les éoliennes fournissent 1% de l'électricité américaine, soit l'équivalent de 4,5 millions de foyers<sup>[1]</sup> . Le Texas est devenu en 2006 le premier état producteur d'énergie éolienne du pays, devant la Californie<sup>[1]</sup> . À la fin 2007, les éoliennes installées au Texas développaient une puissance totale de 4356 mégawatts, contre 2439 mégawatts en Californie, et 1300 mégawatts au Minnesota et en Iowa<sup>[18]</sup> . Des projets éoliens sont en cours d'étude au Texas : Shell et TXU Corporation prévoient de construire la plus grande ferme éolienne du monde d'une puissance de 3000 mégawatts<sup>[18]</sup> . En 2008, le milliardaire texan T. Boone Pickens, magnat du pétrole, a commandé auprès de General Electric 667 turbines éoliennes pour deux milliards de dollars<sup>[19]</sup> . **Lire l'article Énergie éolienne aux États-Unis.**
  - La Chine, qui reste en 2005 le 3<sup>e</sup> plus gros producteur d'énergie électrique derrière les États-Unis (4239TWh) et l'Europe (3193TWh) avec 2500TWh produits (source Agence Internationale de l'Énergie), est devenu le 5<sup>e</sup> producteur mondial d'énergie éolienne en 2007 derrière l'Allemagne, l'Espagne, les États-Unis et l'Inde. Son objectif est une puissance éolienne installée de 20GW en 2020, soit une augmentation de plus de 1GW par an. Cet effort est malgré tout extrêmement modeste en regard de sa production d'électricité qui a augmenté de 860TWh en 3 ans (1640TWh en 2002), essentiellement par une multiplication de centrales au charbon. Ce pays a déclaré récemment (10 février 2007) ne pas avoir les moyens de passer aux énergies propres (voir lien).
  - Le Royaume-Uni, dont les gisement pétroliers de la Mer du Nord sont en voie d'épuisement, a décidé d'exploiter au plus tôt son gisement éolien qui est le plus important d'Europe. Plusieurs projets en cours sont les plus importants au monde dans la situation actuelle.
  - Au Canada, la production d'électricité par le vent est en augmentation, surtout dans les Prairies et au Québec. Dans cette dernière province, la compagnie d'état Hydro-Québec achète déjà 200GWh à des producteurs privés de la région gaspésienne. Le gouvernement fédéral a annoncé un programme incitatif qui devrait porter la puissance installée à 10GW d'ici la fin de 2015 (source ACEE Canadienne).
-

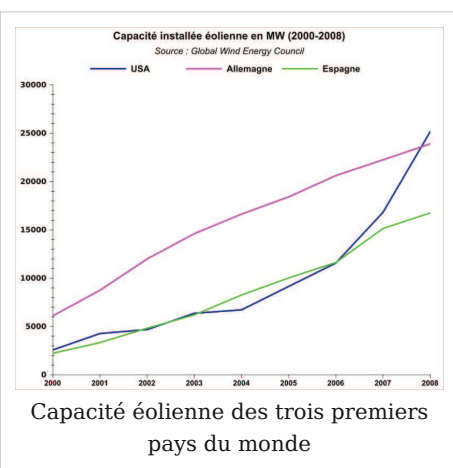
- En Belgique, les éoliennes ont aussi le vent en poupe ces dernières années. La puissance installée est passée de 170MW en 2005 à 287MW en 2007<sup>[20]</sup>. La production maximale disponible dans le pays est toutefois estimée à environ 2000MW<sup>[21]</sup>. Des parcs offshore devraient apparaître dans les années futures avec notamment un parc de 300MW au large de Zeebruges<sup>[22]</sup>.



Une éolienne du Plateau de Millevaches



Ferme éolienne à Tehachapi Pass, Californie



Rang (2008)	Pays	MW 2006	MW 2007	MW 2008
01	États-Unis	11603	16 819	25 170
02	Allemagne	20622	22 247	23 903
03	Espagne	11615	15 145	16 754
04	Chine	2405	5 899	12 210
05	Inde	6270	7 850	9 600
06	Danemark	3136	3 125	
07	Italie	2123	2 726	3 736
08	France	1567	2 455	3 404
09	Royaume-Uni	1963	2 389	3 241
10	Portugal	1650	2 130	
11	Canada	1451	1 846	2 372
12	Pays-Bas	1560	1 747	
13	Japon	1394	1 538	1 880
14	Autriche	965	981	



15	Grèce	756	873	
16	Australie	817	817	1 306
17	Irlande	643	805	
18	Suède	564	789	1 021
19	Norvège	325	333	
20	Nouvelle-Zélande		322	326
	<b>Total capacité mondiale</b>	<b>74 153<sup>[1]</sup></b>	<b>93 849</b>	

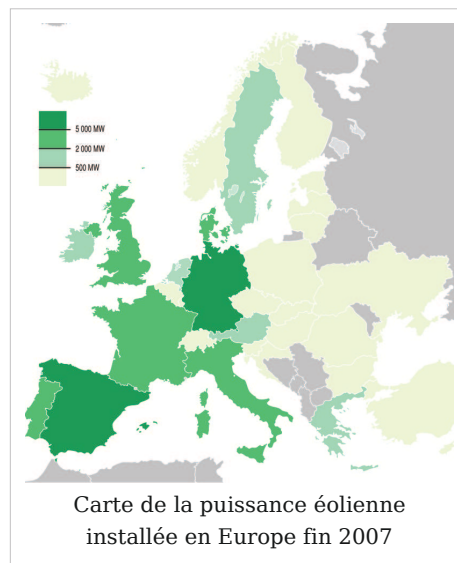
**Principales sociétés productrices d'énergie éolienne** Les principaux producteurs d'énergie éolienne dans le monde sont (par ordre décroissant de puissance installée en mégawatt, fin 2007)<sup>[23]</sup> :

- Iberdrola (Espagne) (plus de 5000 mégawatts installés)
- FPL Energy (États-Unis) (4000 MW)
- Acciona (Espagne) (plus de 2000 MW)
- Babcock Brown (Australie) (vers 1500 MW)
- EDF énergies nouvelles (France) (vers 1218 MW)
- Endesa (Espagne) (plus de 1000 MW)
- EDP (Portugal) (plus de 1000 MW)

## En Europe

L'UE a décidé de produire 20% de son électricité en énergie renouvelable, propre et sûre d'ici 2020. Ceci ne peut se faire sans éoliennes offshores, et donc sans établir un réseau électrique interconnecté capable de livrer l'électricité produite avec irrégularité en mer Baltique ou en mer du Nord au reste de l'Europe, ce qui est une des deux priorités annoncées par le commissaire européen à l'énergie Andris Peibals fin novembre 2007. Celui-ci a confié une mission de coordination à l'Allemand Goerg Wilhmelm Adamowitsh<sup>[24]</sup>.

La capacité de production électrique éolienne déployée en Europe a augmenté de 154% entre 2000 et début 2006, ce qui constitue plus de la moitié des nouvelles capacités de production installées durant cette période<sup>[25]</sup>.



## Puissance éolienne installée dans l'union européenne fin 2007 : [26]

Rang	Pays (fin 2007)	MW
01	Allemagne	22247
02	Espagne	15145
03	Danemark	3125
04	Italie	2726

05	France	2454
06	Royaume-Uni	2389
07	Portugal	2150
08	Pays-Bas	1746
09	Autriche	982
10	Grèce	871
11	Irlande	805
12	Suède	788
13	Belgique	287
14	Pologne	276
15	République tchèque	116
16	Finlande	110
17	Bulgarie	70
18	Hongrie	65
19	Estonie	58
20	Lituanie	50
21	Luxembourg	35
22	Lettonie	27
23	Roumanie	8
24	Slovaquie	0
25	Chypre	0
	<b>Total européen</b>	<b>56535</b>

## En France

Selon EDF,

*parmi les énergies renouvelables, l'éolien a le plus fort potentiel de développement et représentera une part majoritaire dans la production d'énergies renouvelables hors hydraulique. L'éolien apportera ainsi sa contribution à l'indépendance énergétique de la France*<sup>[27]</sup>.

Deuxième gisement éolien d'Europe (ressources en vent) après le Royaume-Uni, la France tente actuellement de combler le retard accumulé dans son exploitation. L'obligation faite à EDF de racheter l'électricité d'origine éolienne à plus du double de son prix de revient et ce, contre l'avis de la Commission de régulation de l'énergie<sup>[28]</sup> rend les investissements éoliens attractifs. Les objectifs affichés pour l'éolien sont de 10000MW en 2010 (6 000 à 9000 éoliennes).<sup>[29]</sup>



Éoliennes dans l'Aude.

Région	MW au 28/8/2006 <sup>[30]</sup>	MW au 1/9/2007 <sup>[31]</sup>	MW en 2008 <sup>[32]</sup>
Centre	244	315	377
Languedoc-Roussillon	215	281	407
Bretagne	168	254	336
Lorraine	100	208	432
Picardie	86	193	340
Champagne-Ardenne	102	157	198
Pays de la Loire	46	104	158
Rhône-Alpes	90	103	138
Auvergne	39	92	126
Nord-Pas-de-Calais	72	87	260
Midi-Pyrénées	33	83	231
Département d'outre-mer	27	37	81
Basse-Normandie	26	50	70
Territoire d'outre-mer	24	30	( <sup>[33]</sup> )
Haute-Normandie	16	36	84
Provence-Alpes-Côte d'Azur	29	31	38
Poitou-Charentes	12	21	81
Corse	18	18	30
Limousin	9	9	9
Île-de-France			0,06
Aquitaine	0	0	0
Bourgogne	0	0	50
Franche-Comté	12	0	30
Alsace	0	0	0
<b>Total France</b>	<b>1300</b>	<b>2109</b>	<b>3500</b>

Ce qui représentait 1718 éoliennes au 1er septembre 2007 (DOM / TOM compris).

## L'éolien au Québec

La politique énergétique du Québec prévoit le développement de projets éoliens totalisant 4000MW d'ici 2013. Le développement du potentiel éolien du Québec se fait essentiellement par le recours aux entreprises privées qui sont sollicitées via un système d'appels d'offre. Plusieurs groupes réclament plutôt que la Société d'état Hydro-Québec développe elle-même ses propres projets éoliens et qu'elle demeure propriétaire des moyens de production d'électricité, comme c'est le cas avec la grande majorité des centrales hydroélectriques de la province.

## L'avenir de l'énergie éolienne

### 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 800/1000m de hauteur. <sup>[34]</sup>

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 100m/s à leur extrémité. En fait, plus l'éolienne est grande, et moins le rotor tourne vite (moins de 10 tours/minute pour les grandes éoliennes offshore).

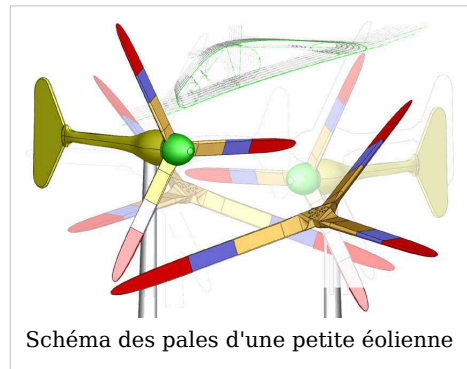


Schéma des pales d'une petite éolienne

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 8mètres de large, 1 à 2mètres 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 linéairement avec la vitesse du vent, qui peut varier de 5km/h à plus de 200km/h, sans nécessiter la célèbre "mise en drapeau" des éoliennes à 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 90km/h.

Les éoliennes en cours de développement sont conçues pour fonctionner avec des vents dépassant les 200km/h et produire une quantité d'énergie proportionnelle à la vitesse du vent sur la totalité de la plage de fonctionnement.

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

## Le stockage

Énergie intermittente et incontrôlable, l'éolien a besoin de grandes capacités de stockage :

1) Pour stocker l'énergie éolienne en site isolé. Ainsi, une communauté qui s'alimentait à 100% avec un groupe diesel, après l'installation de 2 éoliennes et de batteries de grande capacité, s'alimente maintenant à 86% en éolien. Le diesel n'assure que le complément de 14%. On voit qu'avec ces batteries de grande capacité on peut développer l'éolien au delà de ce qui se fait actuellement. La seule limite est l'investissement en capacité de stockage de l'électrolyte; c'est-à-dire jusqu'où on est décidé à aller dans ce domaine.

2) En tant que stockage tampon en complément de la production d'un parc éolien. Lorsque la production éolienne faiblit, le déstockage fournit le complément pour garder la production finale quasi stable. Lorsque la production éolienne est suffisamment forte, il y a reconstitution du stock. Ainsi les 2 courbes de production éolienne et stockage sont opposées et complémentaires. La somme des deux fournit au réseau une courbe de production "lissée" (comme au parc éolien de Sapporo au Japon).

Sur le plan purement technique, le dernier retour d'expérience sur une tentative visant le 100% de production d'électricité d'origine renouvelable, initiée en Allemagne en 2006 à la demande de Mme Merkel, démontre qu'il est possible d'y parvenir. Ce qui pourrait permettre à terme de rendre l'Allemagne totalement indépendante en énergie électrique<sup>[35]</sup>. Pour tenter cette expérience, le stockage de type STEP (stations de transfert d'énergie par pompage) a été utilisé pour la partie éolien, exactement comme le fait la France avec le nucléaire pour adapter la production peu souple des centrales à la variabilité de la demande journalière (dont la courbe peut être consultée ici : [36]).

Aux États-Unis, une entreprise conçoit de nouvelles éoliennes qui produisent de l'air comprimé au lieu de l'électricité.<sup>[37]</sup> 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 sur le pic 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.

Sur le même principe, on peut concevoir d'utiliser l'énergie éolienne pour pomper directement de l'eau, en suivant le principe des STEP.

## 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 régime de marche de 96% est par exemple estimé en mer du Nord <sup>[38]</sup>. 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 équivalente. On donne couramment comme moyenne 2500MWh par MW installé en mer au lieu de 2000MWh 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 3800MWh par MW installé.

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 10MW 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 10MW unitaire, avec un diamètre de pales de 160mètres.

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 156 éoliennes totalisant 702MW, à 14km au large de la Seine-Maritime et de la Picardie. En Angleterre, le consortium London Array a un projet à 20km de l'embouchure de la Tamise, qui représenterait 271 turbines pour une puissance allant jusqu'à 1000MW <sup>[39]</sup>. Avec le projet additionnel de Thanet, c'est maintenant 1800MW qui devraient être installés dans l'estuaire de la Tamise. Le projet britannique de Triston Knol fera quant à lui 1200MW.

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 700m 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 1GW 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. <sup>[40]</sup>

## L'éolien urbain

L'éolien urbain est un concept qui suppose que l'on peut 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.

Les turbines éoliennes existantes n'ont encore jamais atteint des rendements intéressants en milieu urbain. Toutefois, les concepteurs ont déjà 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 90km/h. Leur production est quasiment proportionnelle à la vitesse du vent jusqu'à plus de 200km/h, sans palier limitant comme sur les éoliennes classiques.

## Projection des productions électriques mondiales éoliennes

Depuis une dizaine d'années, selon les statistiques du Global Wind Energy Council : <sup>[41]</sup>, la production d'électricité éolienne mondiale double approximativement tous les trois ans. En retenant pour la production d'électricité 2000h d'équivalent plein régime par an, on arrive à :

- 1996 : 6.1GW / 12TWh
- 1999 : 13.6GW / 27TWh
- 2002 : 31GW / 62TWh
- 2005 : 59GW / 118TWh
- 2008 : 121GW / 242TWh

L'efficacité des éolienne est donc en moyenne de 22,72% e.g. en 2008 121GW installés  $121 \times 24 \times 365 = 1054$ TWh théoriques pour 242TWh produits.

Par comparaison, la production électrique mondiale était de 16000TWh en 2002 et 18000TWh en 2005 <sup>[42]</sup>. La production d'électricité nucléaire mondiale était de 2.793 TWh en 2006 selon l'Agence Internationale de l'Energie <sup>[43]</sup>.

L'éventail des prévisions de puissances qui seront installées en 2011 va de 200 à 250 GW selon différents organismes.

## Débat sur l'énergie éolienne

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 de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable dont le gisement n'est pas épuisable à l'échelle de temps des civilisations humaines.

Elle est considérée comme une énergie propre qui ne produit directement ni dioxyde de carbone, ni dioxyde de soufre, ni mercure, ni fines particules, ou n'importe quel autre type de pollution de l'air ou de l'eau. Elle ne produit pas de déchets radioactifs à vie longue.

Toutefois, du dioxyde de carbone et d'autres types de pollution de l'air et de l'eau sont dégagés lors de l'extraction et de la fabrication des matériaux de construction (puis, ultérieurement, de l'entretien) d'une éolienne (voir énergie grise). Cependant, en moyenne une éolienne restitue en 2 à 3 mois l'énergie qu'elle a consommé pour sa construction (pour une durée de fonctionnement de 20 ans). Pour un mat d'éolienne de 80mètres, 800tonnes d'acier et de béton sont injectées à sa base pour les fondations. Cela est très supérieur (par MWh/an) aux quantités nécessaires à la construction d'une centrale de tout autre type, y compris le nucléaire favorisé par sa très haute densité de puissance.

### Démantèlement

Le démantèlement fait partie intégrante des solutions pour limiter les nuisances de tout moyen industriel en fin de vie.

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 devenir du réseau local de connexion au réseau électrique

En fait, seules les fixations hors sol sont déposées, le béton est recouvert de chailles terre et d'herbe. Cette dernière étape ne laisse aucune trace significative sur le site. Les estimations du coût du démantèlement d'éoliennes devenues obsolètes montrent que ce coût est inférieur à celui rapporté par la vente de la « ferraille » des tours et autres composants<sup>[44]</sup>

### Nuisance sonore

Selon une recommandation aux pouvoirs publics de l'Académie de Médecine, le risque bruit implique de ne pas construire d'éolienne de 2.5MW à moins de 1500m d'habitations : « *Il peut avoir un impact réel et jusqu'ici méconnu, sur la santé de l'homme, et par ailleurs, à des intensités modérés, le bruit peut entraîner des réactions de stress, perturber le sommeil et retentir sur l'état général* ». Cependant, 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. <sup>[45]</sup>

En Australie, en mars 2005, le Dr. Foster dit avoir répertorié une centaine de personnes victimes de nuisances dues aux éoliennes<sup>[46]</sup>.

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 à 125hz et 250hz, 5 dB entre 500hz et 4000Hz). Cela en fait une des réglementations les plus strictes en Europe.

### **Risque d'accident éolien**

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 mètres<sup>[47]</sup>.

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. Dans le monde, personne n'a encore jamais été reconnu victime d'un accident éolien.

### **Esthétique**

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

Les éoliennes peuvent être disposées le long des autoroutes, ce qui réduit significativement les soucis d'esthétique.

Par ailleurs, selon un sondage de novembre 2003<sup>[48]</sup> commandé par la région Languedoc-Roussillon à l'Institut CSA, «*Les touristes acceptent bien les éoliennes : 92% des touristes interrogés sur 25 sites en pleine période touristique considèrent l'utilisation des éoliennes comme « une bonne chose ». Seulement 16% estiment qu'elles « dégradent le paysage dans lequel elles sont implantées ». Les touristes interrogés dans des sites où existent des éoliennes ou qui en ont vu sont nettement plus favorables aux éoliennes que ceux qui n'en ont pas vu.*»

Les opposants anti-éoliens brandissent souvent le spectre d'une dévaluation de l'immobilier (20% de baisse selon eux), mais cette affirmation n'est étayée par aucune étude. L'état des connaissances sur ce domaine est assez limité, mais les quelques études disponibles en France et à l'étranger ne font pas état de telles diminutions. L'évolution des prix est surtout liée à celle du marché immobilier, et l'influence - non prouvée - d'un parc éolien est largement absorbée par la pression foncière.

Un récent sondage réalisé par l'institut LH2 en septembre 2007 indique que 90% des français sont favorables au développement de cette énergie.

## Impact des installations

On peut parler du manque d'étude d'impacts :

- Les projets sont parfois initiés sans consultations publiques ou avant l'évaluation des problèmes qu'ils peuvent générer.<sup>[réf. nécessaire]</sup>
- Localisation inappropriée<sup>[réf. nécessaire]</sup>
- 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 de la précipitation. 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 mouvement.

## Encombrement des éoliennes

La surface au sol nécessaire pour produire une part importante des besoins énergétiques d'un pays à partir de l'énergie éolienne est sujette à débat.

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.

Les éoliennes actuelles permettent dans le meilleur des cas une densité de 10MW/km<sup>2</sup>, soit 10W/m<sup>2</sup> ; en pratique, la moyenne est de l'ordre de 0.5W/m<sup>2</sup>. Les éoliennes à turbine, à l'état de prototype en 2006, sont destinées à fonctionner posées sur des toitures de bâtiment et n'occuperont donc pas d'espace destiné à d'autres usages.

L'énergie produite est de l'ordre de 20GWh/km<sup>2</sup><sup>[49]</sup> pour les sites bien ventés. En considérant 25000km<sup>2</sup> de surface (soit 5% du territoire métropolitain), le potentiel de production française serait de l'ordre de 500TWh selon cette source. 20 GWh/km<sup>2</sup>/an représentent 4 à 5 éoliennes de 2MW par km<sup>2</sup>, laissant 99% de la surface libre d'accès et disponible, par exemple, pour des champs ou des forêts. À titre de comparaison, une centrale solaire photovoltaïque a une productivité d'environ 70 kWh par m<sup>2</sup> au sol<sup>[réf. souhaitée]</sup> dans un site ordinaire d'Europe, soit 70 GWh/km<sup>2</sup>/an à condition d'utiliser 100% de la surface<sup>[50]</sup>.

## Capacités de production

Les projections de l'EWEA<sup>[51]</sup> prévoient une production de 425TWh/an pour 2020 dans l'UE25, et un potentiel de 3000TWh au niveau mondial, avec un doublement prévisible de la production par unité de surface au sol. Cela correspond à 12% de la demande électrique mondiale, sur la base d'une hausse de 66% de la demande.

Le GWEC <sup>[52]</sup> prévoit 3 scénarios, "référence", "modéré", "avancé", prévoyant une production en 2020 respectivement de 566TWh, 1375TWh et 2632 TWh<sup>[53]</sup>.

## Aspect ornithologique

Plusieurs études sur les éoliennes<sup>[54]</sup> montrent que le nombre d'oiseaux tués par les éoliennes est négligeable par rapport au nombre qui meurt en raison d'autres activités humaines. 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 Royal Society for the Protection of Birds 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 nicher.<sup>[55]</sup>

Jusqu'à présent relativement négligées, les chauves-souris provoquent à présent des inquiétudes du même type, spécialement pour les plus grandes installations : *les mortalités des chauves-souris augmentent de façon exponentielle en fonction de la hauteur de la tour*, selon une étude de 2007, alors que les mortalités d'oiseaux restent stables<sup>[56]</sup>

## **Insertion dans le réseau électrique**

### **Raccordement au réseau électrique**

Le raccordement d'éoliennes au réseau global de distribution électrique (sans stockage local de l'énergie) nécessite, comme pour les autres centrales de production électrique, des lignes haute tension. La concentration des éoliennes en parc terrestres, côtiers ou maritimes correspond à une logique de centralisation de l'offre de courant, à contre-courant de la vision souvent évoquée d'une production décentralisée.

Fin 2006, un bulletin électronique de l'Ambassade de France en Allemagne indique que la production éolienne nécessite l'installation de 850km de câbles d'ici 2015 et 1950km d'ici 2020<sup>[57]</sup>. Par ailleurs, des oppositions locales (syndrome NIMBY) à la construction de lignes en bord de mer conduisent à enterrer les câbles, ce qui entraînerait un doublement du montant de la facture d'électricité des clients industriels. Cet argument mis en avant par les opposants aux éoliennes ne semble pas spécifique aux éoliennes, face à la demande générale d'enterrement des lignes électriques quel que soit le mode de production. En 2009, beaucoup d'installateurs d'éoliennes même en milieu terrestre propose systématiquement l'enterrement 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 50Hz. Un surcroît de puissance se traduit par une hausse intempestive de la fréquence, un manque de puissance par une baisse de la fréquence. Des automatismes déconnectent les producteurs qui ne respectent pas les normes, mais ces automatismes se traduisent, pour les régulateurs du réseau, par des événements aléatoires, non maîtrisés et dommageables.

Par exemple, lors de la panne de courant européenne de novembre 2006, la zone ouest était en déficit de 9000 MW, et sa production éolienne, 6500 MW avant la panne, lui a largement fait défaut. Il a fallu couper des clients et faire usage des STEP.<sup>[58]</sup>

### Intermittence du vent

Le vent est une ressource aléatoire. Les éoliennes produisent donc de l'électricité de façon intermittente sur un réseau électrique. En raison des difficultés du stockage d'énergie (voir supra), il est coûteux voire impossible de faire face à un déficit de production éolienne pendant une période sans vent<sup>[réf. nécessaire]</sup>.

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 E-on<sup>[59]</sup>). Lors de la canicule de 2003, la capacité des éoliennes est tombée à moins du vingtième (1/20) de sa valeur nominale<sup>[60]</sup>. 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 1000 MW<sup>[61]</sup>. Le même phénomène s'est observé durant la vague de chaleur nord-américaine de 2006 ((en) 2006 North American heat wave) ; la production réelle des 2500MW de capacités théoriques de production d'énergie éolienne de Californie était inférieure au vingtième (1/20) de cette valeur lors des pics de demande<sup>[62]</sup>.

Le gestionnaire du réseau électrique français (RTE), estime que l'intégration de l'électricité éolienne dans le réseau actuel est possible sans difficultés majeures à hauteur de 10 à 15GW, 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.<sup>[8]</sup> Notons que le Danemark a été longtemps un îlot éolien isolé au milieu d'un océan de consommateurs européens sans éolien: En cas de bon vent - situation désirable en effet - leur production éolienne est une surproduction (il leur faut toujours tenir centrales classiques à mi-régime en réserve): Du coup un fort excès de courant était exporté aux pays voisins. Maintenant que l'Allemagne du Nord est fortement "éolisée", cette dernière ne trouve plus d'acheteurs à son courant en excès, d'où les prix spot en chute libre. Quand toute l'Europe sera éolisée" au niveau de l'Allemagne, soit 20GW pour la France, personne ne pourra exporter ses excès aléatoires sauf la France avec sa situation météorologique particulière du couloir nord-pyrénéen: L'Espagne pourra l'acheter. Sur une base plus générale, l'éolien seul ne peut pas être une source valable pour alimenter à coût décent une large population. Il faut le coupler à des barrages hydroélectriques "lacs" d'accumulation (dont la production annuelle à pleine puissance ne dépasse jamais 2500 heures): Toute production éolienne de puissance max égale ou inférieure à celle de ces barrage sera substituée à ces derniers, éliminant ainsi l'aspect aléatoire du vent et économisant l'eau des barrages. Le coût de l'éolien se situant vers 74€/MWh et l'hydraulique vers 30€/MWh, on peut améliorer encore ce dernier en considérant des barrages à puissance électrique réduite de moitié (soit 25€/MWh) tournant 5000 heures l'an. Pour peu que le pays concerné soit venté (éolien à 50€/MWh) et à faible densité de population (Québec) dont la grande surface autorisera l'équipement de sites hydrauliques favorables, on voit que l'éolio-hydraulique devient là une solution sérieuse et concurrentielle au nucléaire ( $0.75 \times 25 + 0.25 \times 50 = 31 \text{ €/MWh}$ ). La région des Grands Lacs en Amérique, la zone Tasmanie-Sud australienne et l'Écosse sont à ce sujet privilégiées.

## Aspect économique

Si une comparaison des coûts était faite sur la base des coûts réels de production, l'énergie éolienne pourrait être compétitive dans de nombreux cas.<sup>[réf. nécessaire]</sup> Si le coût complet (environnement, santé, etc.) est pris en compte, l'énergie éolienne pourrait être compétitive dans la plupart des cas.<sup>[réf. nécessaire]</sup> De plus, les coûts de l'énergie éolienne diminuent constamment grâce au développement de la technologie et aux économies d'échelle.<sup>[réf. nécessaire]</sup>

Le kWh éolien, produit dans de bonnes conditions, peut aujourd'hui se vendre autour de 5 à 7 cents (centimes de dollars)<sup>[63]</sup>.

Selon l'association européenne de l'énergie éolienne (EWEA - European Wind Energy Association)<sup>[64]</sup>, le coût du kWh produit était de 8,8 c€ au milieu des années 1980 pour une turbine de 95kW, il est actuellement de 4,1 c€ pour une turbine de 1000kW, et devrait se situer à 3,1 c€/kWh en 2010. Le coût en 2006<sup>[65]</sup> du gaz naturel est de 4,5 c€/kWh, celui du fioul domestique de 6,5 c€/kWh, celui du propane de 9,3 c€ (À noter que la tendance sur les énergies fossiles est à la hausse constante, entre 5.4% et 11.5% par an - moyenne 8.6% sur les 15 dernières années pour le pétrole).

La projection à 2020 de l'EWEA<sup>[66]</sup> prévoit un coût de l'éolien ramené à 2,45 c€/kWh.

Une étude officielle française de 2007<sup>[réf. nécessaire]</sup> constate la réalité actuelle du coût du kWh éolien moyen: 7.4c€/Kwh (le double du nucléaire). Elle constate également que ce coût est 100% lié au coût d'investissement - puisque le vent est gratuit - et que ce coût au kW installé a augmenté de 40% de 2004 à 2007, suivant les prix des matières premières. Les "projections" à long terme sont dénuées de fondement car elles ne font qu'appliquer la célèbre loi de Moore (*learning curve*) qui ne s'applique qu'à la micro ou nano-électronique, là où une révolution arrive tous les 18 mois. Les éoliennes sont de belles machines de puissance qui obéissent aux cours industriels (matières premières et main d'œuvre) maintenant que leur *learning curve* est stabilisée depuis des années puisque plus de 20000 machines ont été installées. D'ailleurs la hausse de 40% ci-dessus ne fait que constater cet état. Le *breakthrough* espéré par l'off-shore se base sur une durée annuelle de vent largement supérieure. Malheureusement le doublement du coût de la machine installée n'est pas compensé par une production doublée.

En France, l'électricité produite par les éoliennes est largement subventionnée par l'État ; Certains médias polémiquent en déclarant que les promoteurs sont assurés d'un retour sur investissement même dans les sites les plus mal choisis<sup>[67]</sup>. Mais après une période (10 ans) où le prix du kWh est subventionné par l'État afin de lancer la filière éolienne, le producteur revend ensuite l'électricité produite à un prix dégressif se rapprochant du prix du marché, prix variable suivant de la qualité du vent sur le site<sup>[68]</sup>. Il est donc difficile de comprendre comment un site mal choisi pourrait permettre la survie de cette production<sup>[réf. souhaitée]</sup>.

## Construction

Les questions caractéristiques liées à la construction d'éoliennes sont <sup>[69]</sup> ,<sup>[70]</sup>

- 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)

## Associations intervenant dans le débat sur l'énergie éolienne

- De très nombreuses associations soutiennent le développement de l'énergie éolienne : Suisse-Eole <sup>[71]</sup> en Suisse, Planète éolienne <sup>[72]</sup> et France énergie éolienne <sup>[73]</sup> en France, Avel Pen Ar Bed <sup>[74]</sup> en Bretagne et de nombreuses autres associations locales et nationales comme les associations écologistes tels GreenPeace ou Sortir du nucléaire.
- En France, des opposants se sont organisés sous forme d'associations, la fédération Vent de Colère ! <sup>[75]</sup> <sup>[76]</sup> regroupe plus de 300 de ces associations.
- Au Québec, le groupe Éole-Prudence <sup>[77]</sup> réunit les citoyens en faveur des parcs éoliens communautaires, installés à bonne distance des zones habitées.

## Opinion publique

Selon un sondage <sup>[78]</sup> 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 domicile<sup>[79]</sup> .

## Notes

- 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 une solution pour pallier les problèmes d'intermittence de l'éolien. <sup>[citation nécessaire]</sup>
- 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. Le Danemark est le pays où l'énergie éolienne est la plus développée, mais ses émissions de CO<sub>2</sub> par Kwh et par habitant sont légèrement supérieures à la moyenne européenne. La production d'électricité se fait essentiellement par le biais des centrales thermiques au charbon, qui émettent de très gros volumes de CO<sub>2</sub> ; Certains y voient là que l'éolien augmente le CO<sub>2</sub>, 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<sup>[80]</sup> .
- La France importe plus d'électricité d'Allemagne qu'elle n'en exporte : 9541GWh exportés vers l'Allemagne contre 15032GWh importés en 2006. (Statistiques de l'énergie électrique en France - RTE/EDF 2006[81]). L'affaire est très rentable pour la France qui exporte un courant cher car stable et de disponibilité certaine; Par contre elle importe du courant allemand aléatoire donc bradé. Citons aussi un élément très peu connu: Les achats de la Suisse auprès de la France sont plus de deux fois plus importants que ceux de l'Allemagne, les lacs suisses stockant de nuit de l'énergie revendue en grande partie au réseau allemand. Le bilan complet France-Allemagne n'est pas négatif. Ce dernier pays continue à construire et à renforcer son parc éolien, + 2000MW installés en 2006.

Le gouvernement allemand a annoncé début 2007 une accélération du démantèlement des centrales nucléaires les plus vétustes.

- La situation actuelle de l'Allemagne serait catastrophique si la France avait, elle aussi, développé son éolien au lieu de nucléaire<sup>[réf. nécessaire]</sup>. Cette situation est de plus en plus controversée outre-Rhin car l'industrie et la moitié de la population s'inquiètent de voir leur pays persister dans une direction apparemment sans issue<sup>[réf. nécessaire]</sup>.
- Les projections du "*Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France - DGEMP-OE(2004) - synthèse des travaux réalisés en 2004 par l'Observatoire de l'énergie de la Direction générale de l'énergie et des matières premières*" s'appuie sur le respect par la France en 2010 du critère de 21% d'énergie renouvelable dans le mix énergétique. Dans ce cadre, ce scénario propose en 2030 une production annuelle brute de 43TWh pour l'éolien et le solaire (pour une puissance de 19GW nette installée). Cette puissance peut être comparée dans le même scénario à la prévision d'une production annuelle de 409TWh en 2030 pour le nucléaire (puissance de 51GW installée), correspondant à la fermeture des centrales actuelles après 40 ans de durée de vie et la construction de 2 EPR par an à partir de 2020<sup>[82]</sup>.

## Repères

- L'éolien off-shore serait une solution pour réduire le problème d'intermittence du vent, et donc de la production d'électricité.<sup>[réf. nécessaire]</sup>
- Les autres axes de progrès escomptés sont le mix-énergétique (vent, solaire, géothermie) et le progrès du stockage de l'énergie.
- Les pays les plus avancés dans le développement de l'éolien (Allemagne, Danemark, etc.) résolvent les problèmes de l'intermittence avec notamment le thermique mais aussi l'achat d'électricité produite par d'autres pays.
- Les projections du "*Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France - DGEMP-OE(2004) - synthèse des travaux réalisés en 2004 par l'Observatoire de l'énergie de la Direction générale de l'énergie et des matières premières*" misent sur un potentiel éolien de 43TWh en 2030, soit 11% de la production nucléaire à cette date, avec un potentiel installé de 19GW en éolien, de 50GW en nucléaire, pour un total de 144GW de puissance nette installée.<sup>[83]</sup>
- La Hollande a stoppé toute forme de subvention à l'éolien également.<sup>[réf. nécessaire]</sup>
- Le réseau allemand de transport/distribution d'électricité est au bord de la rupture<sup>[réf. nécessaire]</sup> et doit stopper l'arrivée d'énergie éolienne les jours de grand vent<sup>[réf. nécessaire]</sup> car le problème de l'intermittence du vent n'est pas et ne sera pas résolu par "l'off-shore" car ce dernier est soumis aux mêmes conditions climatiques régionales que le "terrestre".
- Par jour de vent nominal, l'éolien danois ne peut écouler son courant autrement que de le dissiper par des résistances électriques dans les chaudières de centrales thermiques ordinaires, divisant par 3 son effet anti-CO2.<sup>[réf. nécessaire]</sup>
- Pour éviter ce gaspillage, il faut que cette énergie aléatoire soit utilisée par des clients qui acceptent une fourniture aléatoire (chauffage d'appoint) à prix au plus égal à celui du gaz/fuel augmenté de la perte due au rendement de la chaudière (1/80% = x1.25).<sup>[réf. nécessaire]</sup>

## Références

- [1] Source : Danish Wind Energy Association - (<http://www.windpower.org/en/core.htm>)
- [2] Source : ADEME. Consommation moyenne d'électricité par habitant en France (hors chauffage électrique) : 1100kWh
- [3] Global Wind Energy Council (<http://www.gwec.net/uploads/media/gwec-charts-2008.pdf>)
- [4] « 2455 mégawatts : l'éolien français accède au 3e rang européen », dans *Libération* du 11-02-2008,
- [5] (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](http://www.gwec.net/index.php?id=30&no_cache=1&tx_ttnews=177&tx_ttnews=4&cHash=04fdc8c00a)), Global Wind Energy Council. Mis en ligne le 2 février 2009, consulté le 8 février 2009
- [6] 200TWh par an, 2040, énergie éolienne, France, potentiel éolien en France (<http://www.espace-eolien.fr/Eolien/200twh.htm>), source : cabinet d'études Espace Éolien Développement, filiale de Poweo
- [7] Des mini éoliennes sur les toits aux Pays-Bas! - Révolution Énergétique (<http://www.revolution-energetique.com/blog/index.php/2007/03/22/41-des-mini-eoliennes-sur-les-toits-aux-pays-bas>)
- [8] [http://www.rte-france.com/html/fr/mediatheque/telecharge/bilan\\_complet\\_2005.pdf](http://www.rte-france.com/html/fr/mediatheque/telecharge/bilan_complet_2005.pdf) : Bilan prévisionnel RTE 2005 - Énergie éolienne : p. 64 à 67
- [9] Cité des sciences et de l'industrie ([http://www.cite-sciences.fr/francais/ala\\_cite/science\\_actualites/sitesactu/magazine/article.php?id\\_article=1103&id\\_mag=3&lang=fr](http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/science_actualites/sitesactu/magazine/article.php?id_article=1103&id_mag=3&lang=fr))
- [10] Directive 2001/77/CE du Parlement européen et du Conseil du 27 septembre 2001 relative à la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergie renouvelables sur le marché intérieur de l'électricité. Selon cette directive, la part d'énergie électrique d'origine renouvelable produite en France à l'horizon 2010 devrait être de 21% contre 15% en 1997. Actu-environnement.com : 29 juin 2006. Les nouveaux tarifs d'achat de l'électricité renouvelable (<http://www.actu-environnement.com/ae/news/1802.php4>)
- [11] Décret du 4 mars 2009, publié au Journal officiel du 6 mars, modifiant le décret 2001-410 du 10 mai 2001 relatif aux conditions d'achat de l'électricité produite par des producteurs bénéficiant de l'obligation d'achat
- [12] <http://www.wwindea.org> WWEA
- [13] Source : Agence internationale de l'énergie, 2003. Voir l'article Énergie nucléaire.
- [14] <http://de.wikipedia.org/wiki/Windenergieanlage>
- [15] [http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Kraftwerke\\_%28Ausnutzung%29.PNG](http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Kraftwerke_%28Ausnutzung%29.PNG)
- [16] La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde - 5ème inventaire - 5 mars 2004 (<http://www.edf.com/41523d/Accueilfr/Presse/Touslesdossiersdepresse/5emeinventairedeLaproductiondelectricitedorigine renouvelabledanslemonde>), EDF
- [17] <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/PDF/Fr/Chapitre03FR.pdf>: La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde - 7<sup>e</sup> inventaire - 2005
- [18] (en) Clifford Krauss, « Move Over, Oil, There's Money in Texas Wind (<http://www.nytimes.com/2008/02/23/business/23wind.html?pagewanted=2>) », The New York Times. Consulté le 23-02-2008
- [19] « La croisade pour les énergies vertes d'un milliardaire texan » dans *Le Figaro* du 11-07-2008,
- [20] Chiffres Belgique (<http://www.thewindpower.net/fiche-pays-21-eolien-belgique.php>)
- [21] Chiffres max Belgique ([http://www.printempsdelenvironnement.be/FR/les\\_ateliers/climat\\_et\\_energie/sujets\\_abordes/groupe\\_de\\_mesures\\_1\\_developpement\\_de\\_l\\_eolien\\_off\\_shore.html](http://www.printempsdelenvironnement.be/FR/les_ateliers/climat_et_energie/sujets_abordes/groupe_de_mesures_1_developpement_de_l_eolien_off_shore.html))
- [22] Parc Zeebruges ([http://www.planete-eolienne.fr/2007\\_05\\_30\\_info\\_edf\\_en.htm](http://www.planete-eolienne.fr/2007_05_30_info_edf_en.htm))
- [23] Source Iberdrola, in *Les Echos*, 10 décembre 2007, page 22
- [24] Communiqué du Commissaire, vendredi 30 nov 2007
- [25] Données Eurostat ([http://epp.eurostat.cec.eu.int/pls/portal/docs/PAGE/PGP\\_PRD\\_CAT\\_PREREL/PGE\\_CAT\\_PREREL\\_YEAR\\_2006/PGE\\_CAT\\_PREREL\\_YEAR\\_2006\\_MONTH\\_05/8-22052006-EN-BP.PDF](http://epp.eurostat.cec.eu.int/pls/portal/docs/PAGE/PGP_PRD_CAT_PREREL/PGE_CAT_PREREL_YEAR_2006/PGE_CAT_PREREL_YEAR_2006_MONTH_05/8-22052006-EN-BP.PDF))
- [26] [http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/mailling/windmap-08g.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/mailling/windmap-08g.pdf)
- [27] <http://www.edf.com/21863d/Accueilfr/LesenergiesEDF/PDFsEnergiesEDF/pdfeolien>
- [28] [http://www.cre.fr/fr/content/download/4357/88437/file/RA2007\\_Partie2.pdf](http://www.cre.fr/fr/content/download/4357/88437/file/RA2007_Partie2.pdf)
- [29] La France s'est fixé comme objectif, dans le cadre de la directive européenne 2001/77/CE du 27 septembre 2001 sur l'électricité renouvelable (Réf. 1), de produire 21% de sa consommation d'électricité à partir de sources renouvelables en 2010. Il faudra donc produire en 2010.106TWh d'origine renouvelable contre 71TWh aujourd'hui. L'éolien devra représenter 75% des 35TWh d'électricité renouvelable supplémentaires en 2010, ce qui impose la mise en place d'au moins 10000MW éoliens sur le territoire national (source: Jérôme Gosset et Thierry Ranchin: **Bilan et prospective de la filière éolienne française**) (<http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=A3E80D341D116A2960F5DDE5207B0DA01147367514013.pdf>)
- [30] <http://www.suivi-eolien.com/>, site partenaire de l'ADEME
- [31] Syndicat des énergies renouvelables
- [32] <http://www.suivi-eolien.com/> consulté le 5/2/2009



- [33] comptabilisé avec les DOM pour 2008
- [34] Site du Kite Wind Generator (<http://www.kitegen.com/>)
- [35] rapport en allemand : (<http://www.kombikraftwerk.de/>), ou compte rendu en français : (<http://www.energine.com/15/3271+L-Allemagne-cherche-a-mieux-combiner-ses-energies+.html>)
- [36] <http://www.rte-france.com/htm/fr/vie/courbes.jsp>
- [37] <http://www.generalcompression.com/index.html> : General Compression - Stockage d'énergie éolienne par compression d'air
- [38] [http://www.c-power.be/applet\\_mernu\\_fr/eoliennes/fonctionnement.htm](http://www.c-power.be/applet_mernu_fr/eoliennes/fonctionnement.htm) : 8440 heures de fonctionnement/an dont 3300 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
- [39] *Du vent pour des watts propres* (<http://www.news.fr/actualite/societe/0,3800002050,39366687,00.htm>), 1<sup>er</sup> février 2007
- [40] [http://www.hydro.com/library/attachments/en/press\\_room/floating\\_windmills\\_en.pdf](http://www.hydro.com/library/attachments/en/press_room/floating_windmills_en.pdf) : dossier éoliennes flottantes
- [41] <http://www.electron-economy.org/article-27628373.html>
- [42] [http://www.iea.org/Textbase/nppdf/free/2007/Key\\_Stats\\_2007.pdf](http://www.iea.org/Textbase/nppdf/free/2007/Key_Stats_2007.pdf)
- [43] [http://www.iea.org/Textbase/stats/electricitydata.asp?COUNTRY\\_CODE=29&Submit=Submit](http://www.iea.org/Textbase/stats/electricitydata.asp?COUNTRY_CODE=29&Submit=Submit)
- [44] ABIES. *Énergie éolienne et paysage* ([http://perso.orange.fr/abies.be/eolien\\_paysage.htm](http://perso.orange.fr/abies.be/eolien_paysage.htm))
- [45] [rtf] Rapport de l'Académie de Médecine ([http://www.academie-medecine.fr/upload/base//rapports\\_267\\_fichier\\_lie.rtf](http://www.academie-medecine.fr/upload/base//rapports_267_fichier_lie.rtf))
- [46] Article sur le site VentduBocage (<http://ventdubocage.net/sante3.htm>)
- [47] Ventdubocage. *Liste d'accidents*. (<http://ventdubocage.net/accident.htm>)
- [48] Agence Méditerranéenne de l'Environnement. *Sondages*. (<http://www.ame-lr.org/sondages>)
- [49] Jean-Marc Jancovici, *Quelle surface faut-il couvrir d'éoliennes pour fournir à la France le courant dont elle a besoin ?* (<http://www.manicore.com/documentation/eolien.html>) Pour les sites bien ventés. En considérant 25000km<sup>2</sup> de surface (soit 5% du territoire métropolitain), le potentiel de production française serait de l'ordre de 500TWh selon cette source.
- [50] le double environ dans un site très ensoleillé (Portugal ou sud de l'Espagne), en outre le panneau solaire peut être transparent ce qui ne rend pas la surface impropre à tout autre usage
- [51] Wind Force 12 (2005) ([http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/WF12/wf12-2005.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WF12/wf12-2005.pdf))
- [52] <http://www.gwec.net>
- [53] Wind directions (2006) ([http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/WD/0609-WD-sep-focus.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WD/0609-WD-sep-focus.pdf)) *Plugging the gap: the diminishing resource*
- [54] (en) Curry & Kerlinger. 2006. *Études sur les éoliennes* (<http://www.currykerlinger.com/studies.htm>)
- [55] (fr) LPO. *L'énergie éolienne et la conservation de la nature* (<http://www.lpo.fr/etudes/eolien/index.shtml>) : Étude de l'impact de l'éolien sur les oiseaux par la Ligue pour la protection des oiseaux
- [56] <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=18733061>
- [57] BE de l'Ambassade de France en Allemagne du 2/11/2006 (<http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/39825.htm>)
- [58] A noter que ce problème concernaient aussi d'autres producteurs, non éoliens, déconnectés pour la même raison
- [59] (de) Windstromeinspeisung
- [60] France. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. 2004. *Notre système électrique à l'épreuve de la canicule*. (<http://www.industrie.gouv.fr/energie/electric/canicule2003.htm>)
- [61] [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/statisti/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 1000MW pendant 2 mois.
- [62] (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](http://www.energypulse.net/centers/article/article_display.cfm?a_id=1332)) ».
- [63] *Le coût de l'énergie éolienne* ([http://www.passerelleco.info/article.php3?id\\_article=210](http://www.passerelleco.info/article.php3?id_article=210)), Passerelle Eco, 2003.
- [64] [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](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WETF/Facts_Summary.pdf))
- [65] Énergie et matières premières. *Statistiques*. ([http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/f1e\\_stats.htm](http://www.industrie.gouv.fr/energie/statisti/f1e_stats.htm))
- [66] [pdf] EWEA. 2005. *Wind force 12 - Summary Results in 2020* ([http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/WF12/wf12-2005.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WF12/wf12-2005.pdf))

- [67] « Éoliennes : miracle ou arnaque ? (<http://www.lefigaro.fr/lefigaromagazine/2008/02/08/01006-20080208ARTWWW00644-eoliennes-miracle-ou-arnaque-.php>) », *Le Figaro*, 8 février 2008
- [68] <http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=E21E48D5515F4206D74C3D9E288796511233307306291.pdf>
- [69] 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](http://www.hydroquebec.com/distribution/fr/marchequbecois/ao_200503/index.html))
- [70] 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](http://www.upa.qc.ca/fra/salle_presse/default.asp?idrubrique=68))
- [71] <http://www.suisse-eole.ch>
- [72] <http://www.planete-eolienne.fr/>
- [73] <http://perso.orange.fr/afee/creationasso.htm>
- [74] <http://www.apab.org/>
- [75] <http://www.ventdecolere.org>
- [76] **Non à l'éolien industriel** (<http://www.ventdecolere.org>)
- [77] <http://www.eoleprudence.org/>
- [78] Sondage Louis Harris - 28 avril 2005 ([http://www.planete-eolienne.fr/documents/rae\\_sondage.pdf](http://www.planete-eolienne.fr/documents/rae_sondage.pdf))
- [79] Sondage BVA juillet 2008 (<http://www2.ademe.fr/servlet/getDoc?cid=96&m=3&id=56903&ref=21479&p1=B>)
- [80] [pdf] Étude IFP - 15 mars 2006 ([http://www.ifp.fr/IFP/fr/espacepresse/Dossier\\_Castor/6-DP\\_fiche\\_Danemark.pdf](http://www.ifp.fr/IFP/fr/espacepresse/Dossier_Castor/6-DP_fiche_Danemark.pdf)). 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<sup>[réf. nécessaire]</sup>. Des conclusions du même type, mais de direction différente, 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 Lituanie, qui affiche des émissions de gaz à effet de serre per capita de 16% supérieures à celles du Danemark. - "Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2007" ([http://reports.eea.europa.eu/eea\\_report\\_2007\\_5/en](http://reports.eea.europa.eu/eea_report_2007_5/en))
- [81] [http://www.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/statistiques\\_annuelles\\_2006.pdf](http://www.rte-france.com/htm/fr/mediatheque/telecharge/statistiques_annuelles_2006.pdf)
- [82] [pdf] **Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France** par La direction générale de l'énergie et des matières premières de l'Observatoire de l'énergie (DGEMP-OE) (2004) (<http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/pdf/scenario-2004.pdf>)
- [83] <http://www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/pdf/scenario-2004.pdf>

## Voir aussi

- Énergie renouvelable
- Éolienne
- Petit éolien
- Énergie éolienne au Québec

## Liens externes

- (fr) Visite guidée de l'énergie éolienne (<http://www.windpower.org/fr/tour/wres/index.htm>). Un des sites les plus complets en langue française sur l'énergie éolienne : plus de 100 pages sur le vent, la technologie, les coûts, l'environnement, etc...
- (fr) Cadre législatif (<http://www.industrie.gouv.fr/energie/renou/rapp-art6.pdf>) en France concernant l'installation d'éoliennes (fichier PDF)
- (fr) (en) The Wind Power (<http://www.thewindpower.net>) Base de données sur les champs éoliens et sur les éoliennes.
- (fr) Planète éolienne (<http://www.planete-eolienne.fr/>). Un site de référence sur l'éolien en France.
- (fr) vent de colere (<http://www.ventdecolere.org/>). Un site très complet sur les inconvénients des éoliennes.
- (fr) Eoliennes : nouveau souffle ou vent de folie ? (<http://www.institutmontaigne.org/eoliennes-2885.html>) Publication de l'Institut Montaigne sur les coûts de l'énergie éolienne pour la collectivité, juillet 2008.