

Energie Eolienne

Pierre ODRU, IDEES

Bref historique

Les technologies d'utilisation du vent sont anciennes. Elles transforment l'énergie du vent en énergie mécanique.



Comme moult technologies elles ont connu des hauts et des bas.



Bref historique

Les premières vraies éoliennes furent les moulins américains, utilisés pour pomper l'eau et mis en service dans la seconde moitié du 19^{ème} siècle. Leur configuration est loin d'être optimale pour capter l'énergie.



Après la seconde guerre mondiale, des travaux furent entrepris en France à l'initiative d'EDF. Les conditions techniques de l'époque, ainsi que la concurrence d'autres énergies à bas coût, ne permirent pas d'aboutir (pales métalliques, vibrations incontrôlées...).



Bref historique

L'intérêt de l'énergie éolienne fut relancé à partir des chocs pétroliers des années 70.

Les américains se lancèrent en utilisant l'expérience de leur industrie aéronautique. Ils développèrent des prototypes bipales downwind puis upwind de grandes dimensions (jusqu'à 3 MW) qui furent des échecs.

Ce sont les danois qui investirent le plus intelligemment en développant de petites machines tripales upwind extrapolées ensuite à de plus grandes dimensions. Ils développèrent une expertise indépendante avec centre de recherche dédié (Riso) et financement d'état.



Bref historique

Au début des années 80, grâce à des aides substantielles de l'état fédéral et de la Californie, ils gagnèrent l'équipement de plusieurs grands champs d'éoliennes en Californie. 17 000 machines de 20 à 350 kW furent installées pour une puissance disponible de 1,7 GW. A la fin des incitations tout s'arrêta.



Altamont Pass, Californie

A partir des années 2000 de nouvelles conditions ont prévalu en faveur de l'éolien:

- La nécessité de la lutte contre l'effet de serre
- La prise de conscience du caractère fini des énergies fossiles

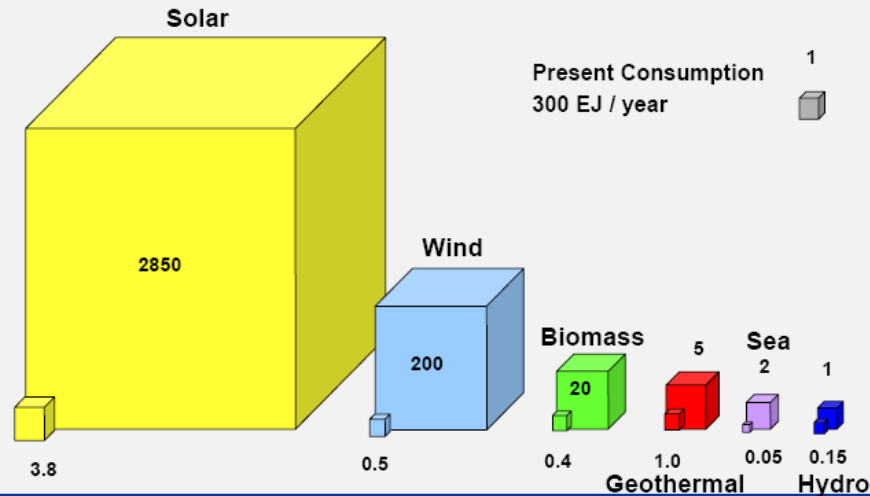
incitèrent les états, initialement en Europe, à développer des énergies alternatives, en garantissant des tarifs de rachat de l'électricité qui permettent le développement de ces filières.

Les développements technologiques allaient contribuer pour le reste.

L'énergie du vent

First International Renewable Energy Storage Conference, Gelsenkirchen (2006)

Natural global energy flows and technical potentials of renewable energies



University of Stuttgart
Institute for Thermodynamics and Thermal Engineering (ITW)
Research and Testing Centre for Solar Systems (TZS)



Institute of Technical Thermodynamics
German Aerospace Centre

La terre reçoit en une heure du soleil l'équivalent de la consommation mondiale annuelle d'énergie. 1 à 2% est converti en vent, soit 50 à 100 fois plus qu'en biomasse.

L'énergie du vent

Bien que globalement très importante, l'énergie du vent est aléatoire dans le temps, très diluée, et dépend fortement des conditions locales, notamment à terre. La ressource peut toutefois être cartographiée de manière statistique.

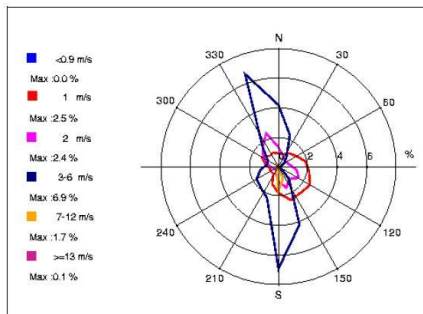
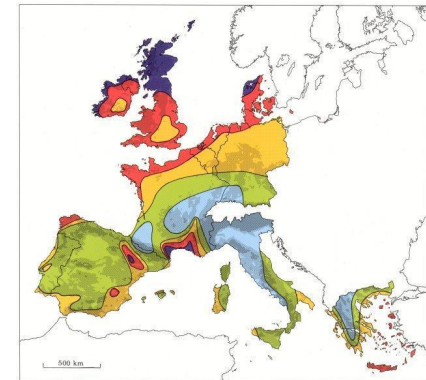
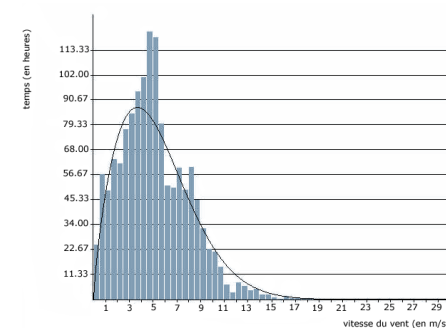


Diagramme local de vent en distribution et intensité



Distribution de Weibull des vitesses de vent pour un site donné.

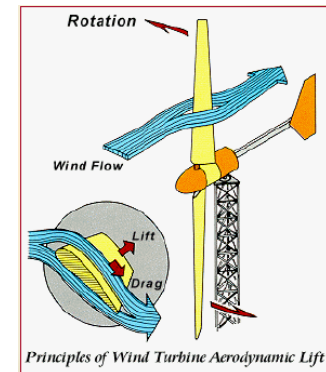
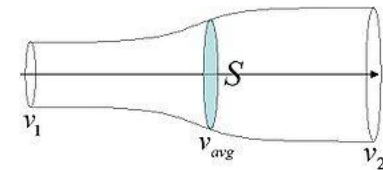
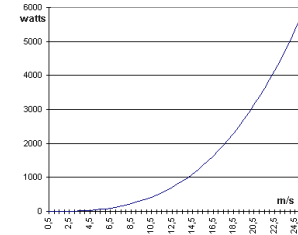
Le potentiel de conversion

La puissance récupérable dans une veine de vent est proportionnelle à la section de la veine et au cube de la vitesse.

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

En 1920 le physicien Albert Betz démontrait que l'on ne pouvait récupérer au maximum que 59% de l'énergie totale disponible dans une veine fluide

Le profil de pale est déterminé de manière à dévier latéralement la masse d'air qui le frappe, créant ainsi un moment mécanique directement exploitable.

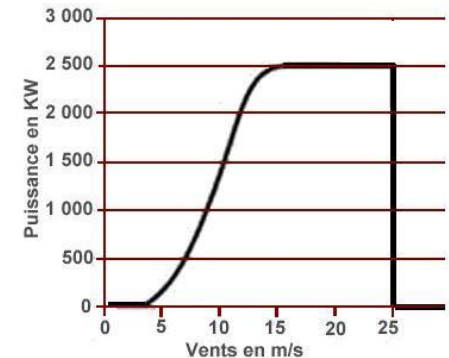
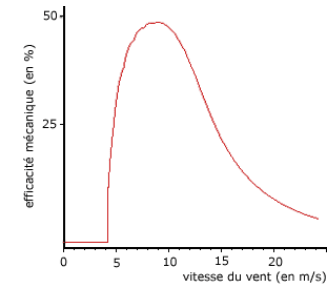
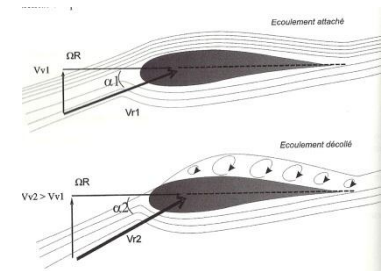


Le potentiel de conversion

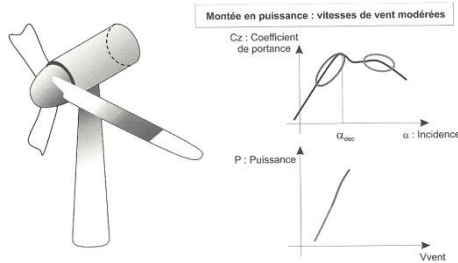
Si la vitesse du vent augmente, l'écoulement de l'air passe d'un régime attaché au profil à un régime décollé. Les caractéristiques de portance s'écroulent et la traînée augmente considérablement.

Le rendement d'une éolienne pour capter la puissance du vent est donc optimum pour une certaine vitesse, au-delà il s'effondre.

Toutefois, compte tenu de l'augmentation d'énergie disponible, la puissance délivrée par l'éolienne devient constante à partir de cette valeur optimale, au-delà toutefois d'une certaine vitesse elle doit être débrayée sous peine de risque de rupture.

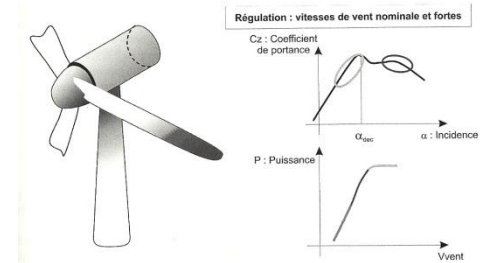


Le potentiel de conversion

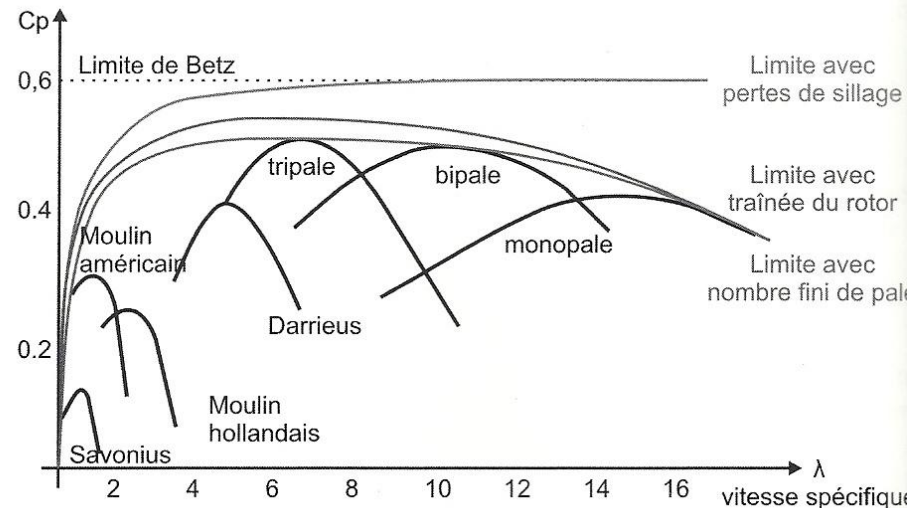


Les parties travaillantes de l'éolienne changent en fonction de l'importance du vent, du centre vers l'extérieur.

Le profil des pales des grosses éoliennes est commandé en fonction du vent pour atteindre les meilleurs rendements.



Performances de différents types d'éoliennes. Les éoliennes tripales sont les plus adaptées pour les vents d'intensité moyenne.



Les sous systèmes

Les Pales

La Nacelle

Le Mat et les Fondations

Le Raccordement au réseau



Les pales

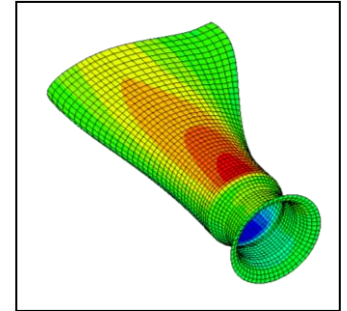


Elles captent mécaniquement l'énergie du vent.

Efforts appliqués: flexion, effort centrifuge et gravitation, torsion, effet gyroscopique, modes propres de vibration, raccordements. Calculs par éléments finis.

Fabriquées en matériaux composites, fibres de verre ou de carbone, résine époxy: légèreté, haute résistance mécanique mais anisotropie, complexité et coûts.

Autres efforts: foudre, corrosion (embruns marins), glace, abrasion...

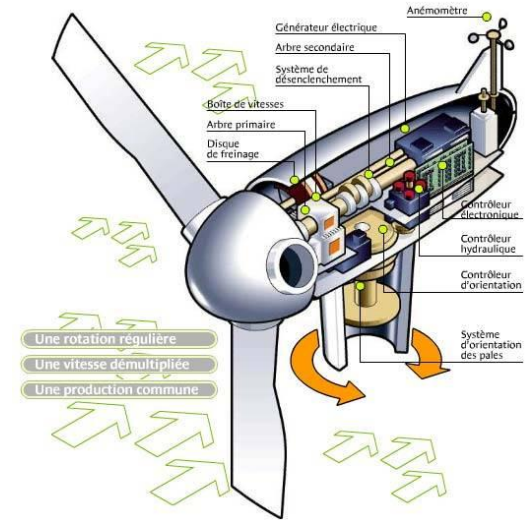


La nacelle

Supporte et régit les orientations des pales de manière à optimiser le rendement. Oriente l'axe en fonction du vent.

Transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique compatible avec le réseau via un générateur, une électronique de puissance, et un multiplicateur.

- machines asynchrone avec double alimentation;
- machines synchrones à électronique de puissance.



Le mat et les fondations

Plus le mat est haut, plus la quantité d'énergie récupérée est importante, et le vent capté de meilleur qualité. C'est une des raisons de l'intérêt des grandes éoliennes, dont la zone de captage d'énergie est proportionnellement plus élevée.

Les fondations réclament d'importantes quantités de béton.



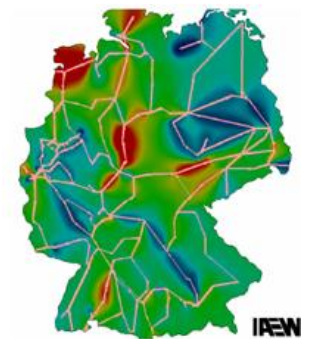
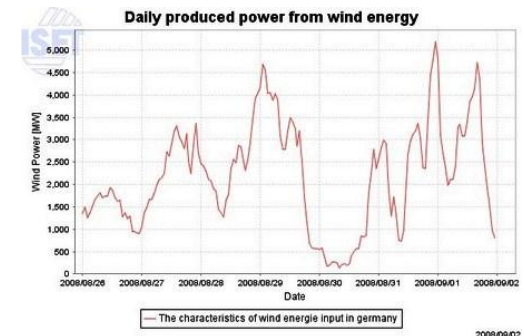
Raccordement et couplage au réseau

Les éoliennes doivent ensuite être raccordées au réseau. Cela peut être un coût important pour un champ d'éolienne isolé. Cela sera le cas pour les champs offshore français.

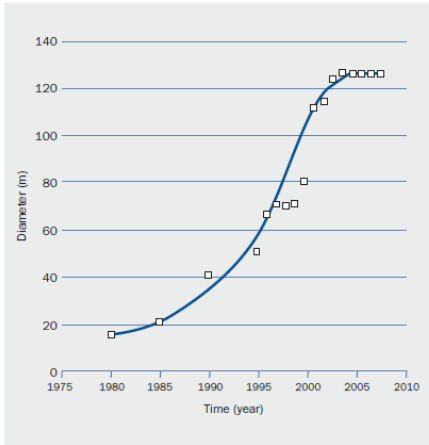
La production éolienne est ensuite intermittente, décalée par rapport à la demande, même si la situation en France est plutôt favorable.

Le problème se pose de son absorption par le réseau en qualité et en quantité, ainsi que des moyens à mettre en œuvre pour pallier les défauts de production.

Prévision météorologique accrue, renforcement des réseaux, réseaux 'intelligents', stockage d'électricité...



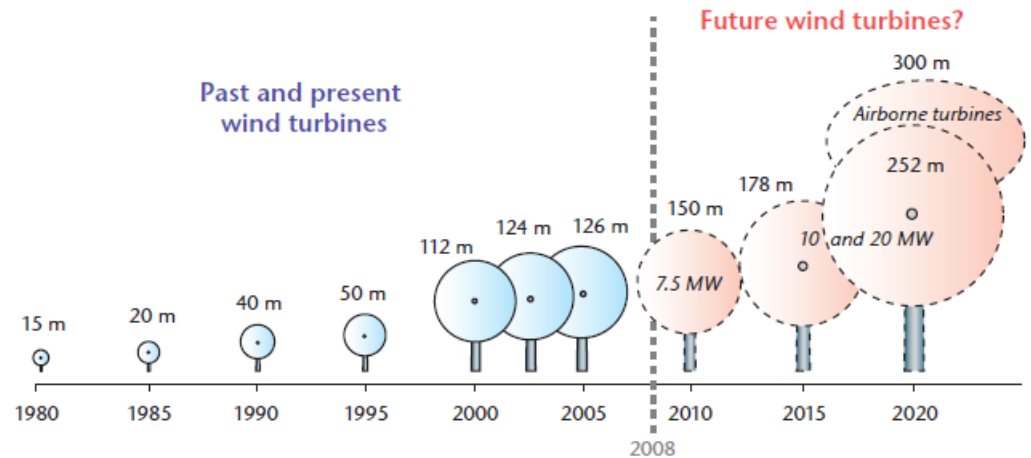
Taille des éoliennes



La taille et la puissance des éoliennes terrestres semblent avoir atteint leurs limites, 130 m de diamètre et 5 MW de puissance nominale. Les raisons sont techniques (limites matériaux) et de transport des pales à terre.



Projection taille des turbines vue par l'EWEA.



Technologie terrestre mature?

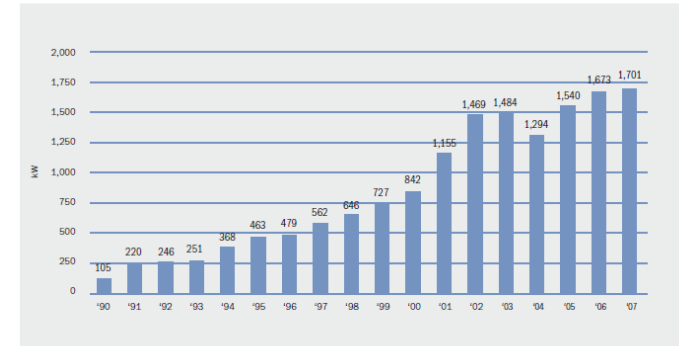
La puissance nominale maximale semble s'être stabilisée à 5 MW pour 130 m de diamètre.

La puissance moyenne des éoliennes installées se situe autour de 2 MW.

Les coûts ne baissent plus, voire augmentent à nouveau.

Les travaux de recherche portent sur des éoliennes à capacité étendue vers les vents faibles ou forts. La firme chinoise Goldwind teste notamment une éolienne pour vitesses de vent faibles.

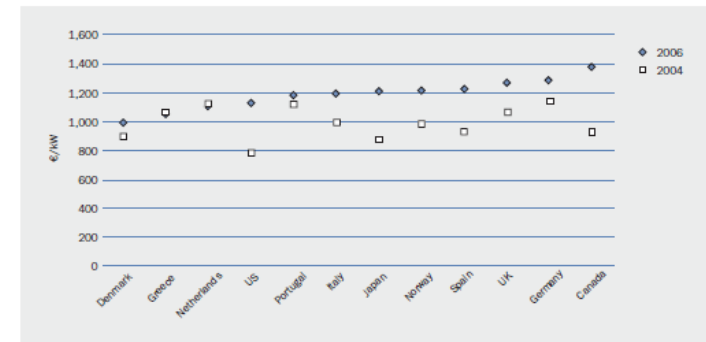
FIGURE 1.14: Average size of wind turbines installed in a given year in the EU (1990-2007)



Source: BTM Consult, 2008.

Taille éoliennes 1990 - 2007

FIGURE 1.16: The increase in turbine prices from 2004 to 2006 for a selected number of countries.



Source: IEA, 2007

Evolution coûts 2004 - 2008

Eolien offshore

Onshore saturé; plus de vent en mer; hors environnement visuel; éoliennes de plus grande taille.

Forts développements prévus.

Coûts supérieurs: investissement aujourd'hui double pour 50% de vent en plus.

Entretien beaucoup plus difficile.

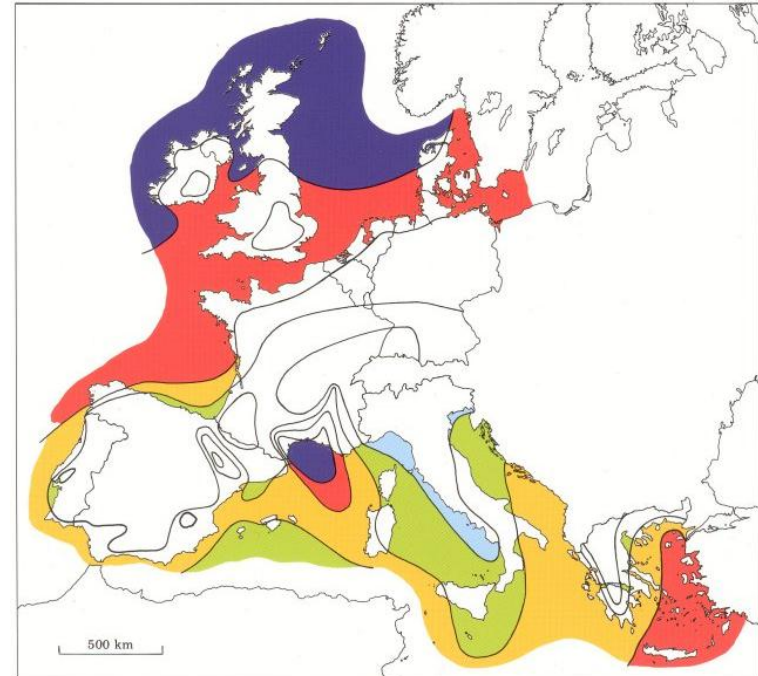
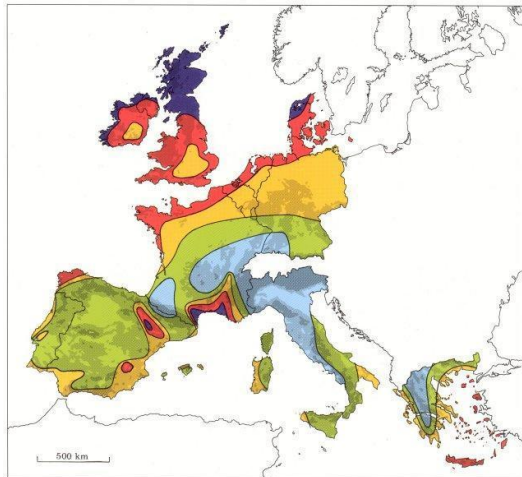
Problème français: deuxième gisement d'Europe après GB, mais la profondeur augmente plus rapidement qu'en Mer du Nord; raccordements au réseau; obstacles réglementaires et conflits d'usages.



Eolien offshore

Gisement de vent offshore

Europe



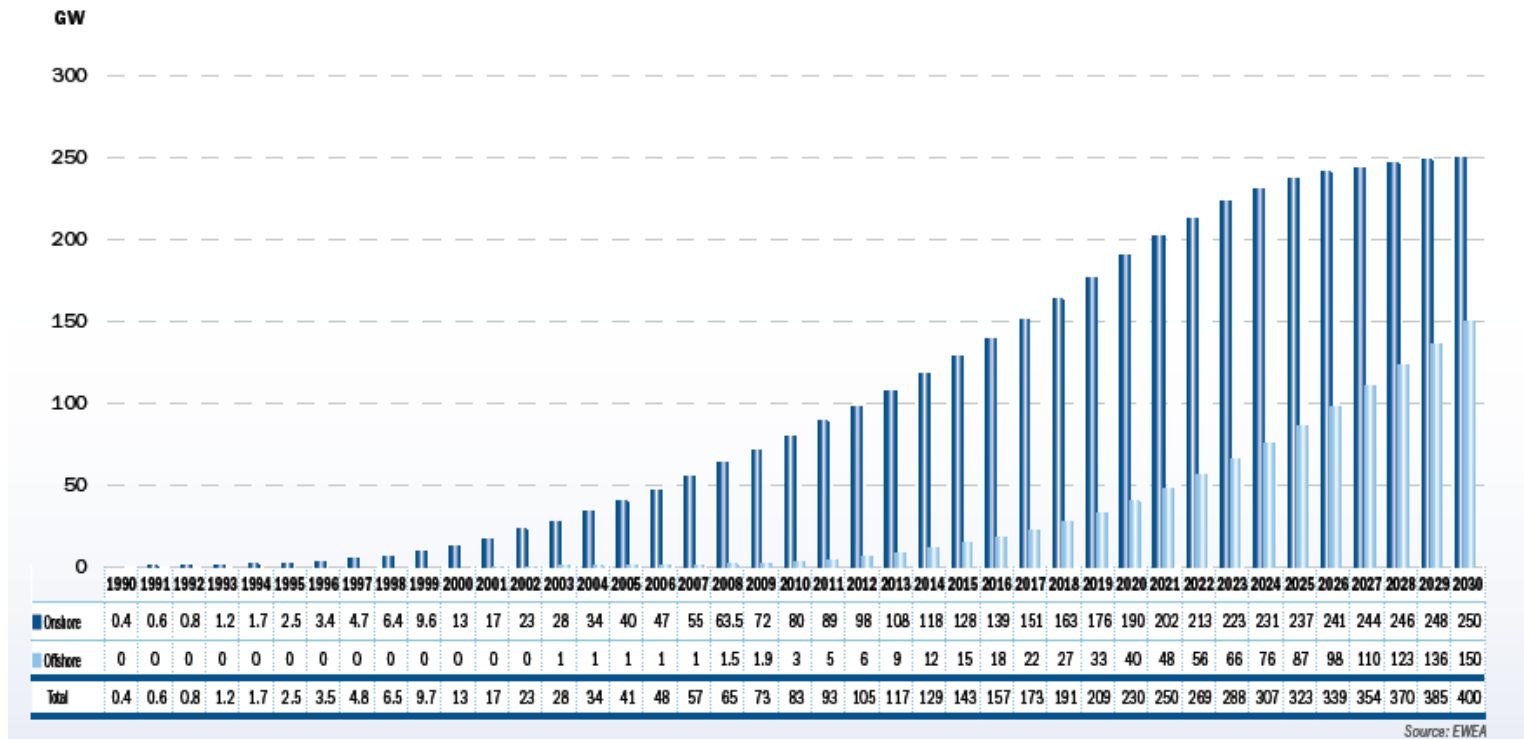
Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights

	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
Dark Blue	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
Red	7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
Yellow	6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5- 8.5	450- 650	8.0- 9.5	600- 900
Green	4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0- 7.5	250- 450	6.5- 8.0	300- 600
Blue	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

Eolien offshore

CUMULATIVE ONSHORE AND OFFSHORE WIND IN THE EU (1990-2030)

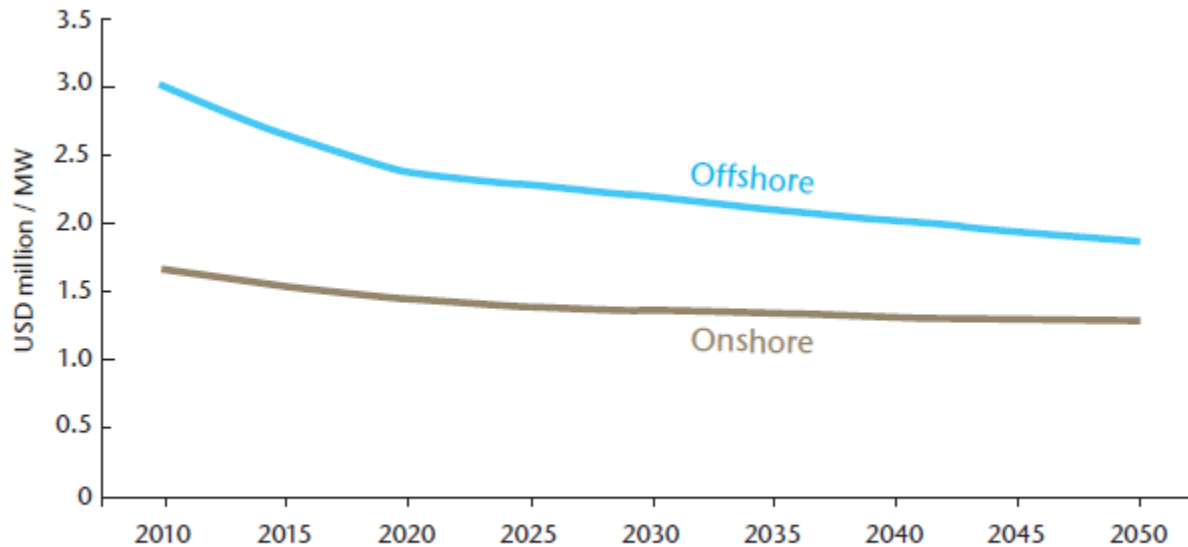
FIGURE 7.1



Prévisions d'investissement éolien onshore / offshore UE 2000 -2030

(source: EWEA)

Eolien offshore



Source: IEA (2008a).

Scénario optimiste baisse des coûts
Eolien Onshore et Offshore pour 2050

Eolien offshore peu profond

Economiquement c'est sur le littoral que la rentabilité de l'éolien est la meilleure

Mais conflits d'usages.



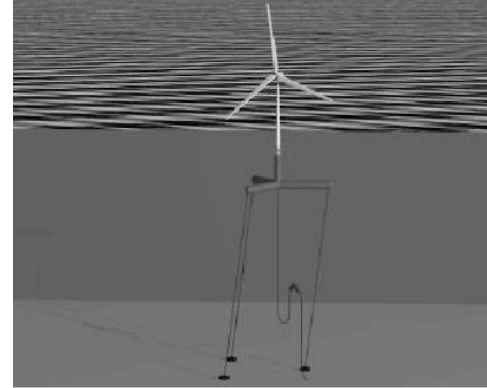
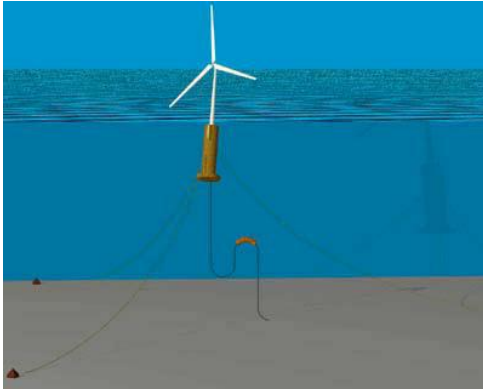
Jean Guichard - Phare du Four, Bretagne

En offshore peu profond le mat est ancré dans le sol et c'est la force des vagues qui est dimensionnante.

Le coût de rachat du kWh passe de 5 à 8 c€ à terre à 13 c€ en mer.

Raccordement aux zones de consommation problématique.

Eolien offshore profond



Il devient nécessaire de recourir aux systèmes flottants à partir de quelques dizaines de mètres de profondeur. Les technologies sont inspirées des technologies pétrolières (à gauche type Spar; à droite type PLT).

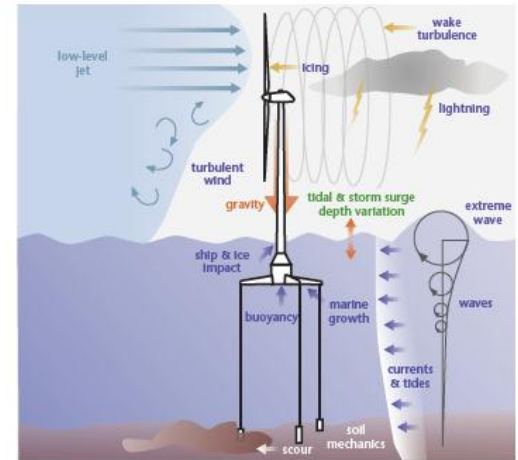
Les norvégiens envisagent des champs d'éoliennes par grande profondeur d'eau. Ils viennent de mettre en place la première éolienne flottante (Hywind).

Eolien offshore profond

Le design d'une éolienne flottante est très complexe, d'autant qu'il y a des interactions entre l'éolienne et son support.

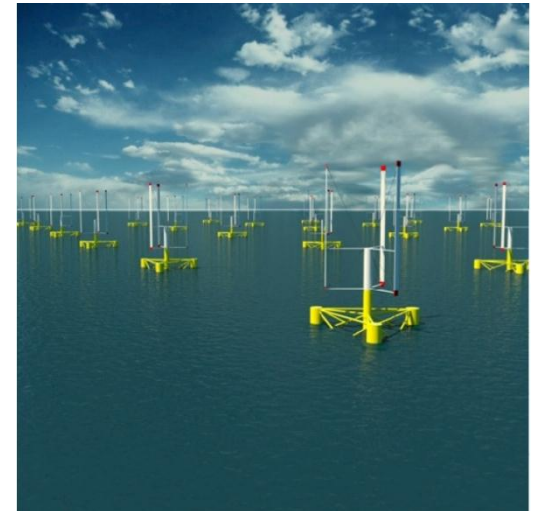
L'industrie pétrolière maîtrise parfaitement l'aspect support flottant.

Les coûts engendrés risquent d'être importants et nécessitent de repenser les solutions.



Eoliennes géantes ?

Nouveaux concepts?



Production mondiale 2010

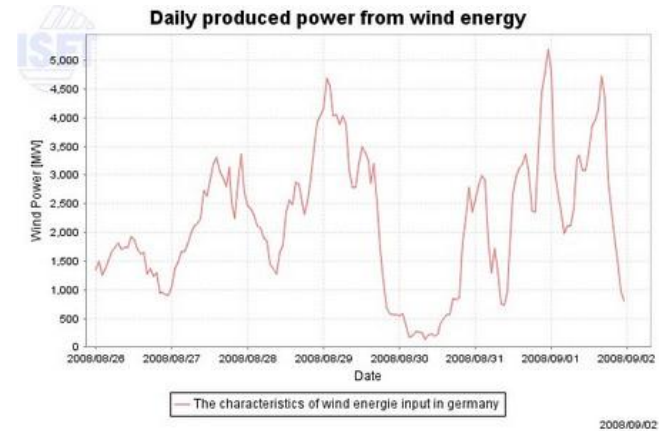
La puissance installée correspond au maximum de production possible. La production réelle dépend bien entendu du vent.

La production mondiale d'électricité éolienne en 2010 a été de 388 TWh pour une puissance installée de 194 GW, soit un coefficient de charge moyen de 22,8%.

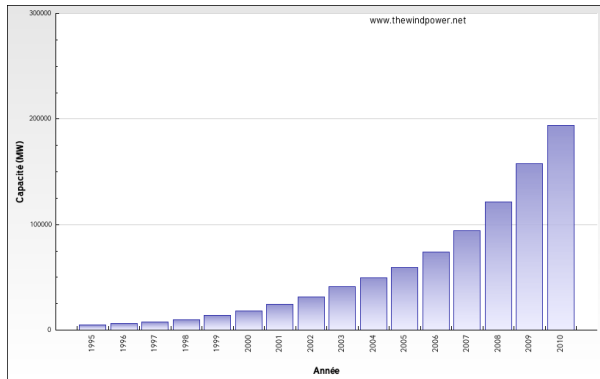
Le coefficient de charge en France est de l'ordre de 25%, en Allemagne de 16%. On rappelle qu'en offshore il est plutôt de l'ordre de 35%. En 2008 la production mondiale d'électricité était de 20 260 TWh dont 2 730 d'origine nucléaire.

Fin 2010 toutefois la production d'électricité éolienne représente 8% du total allemand, 25% au Danemark, 15% en Espagne, et 5,3% pour l'UE 27 (2,3% en France).

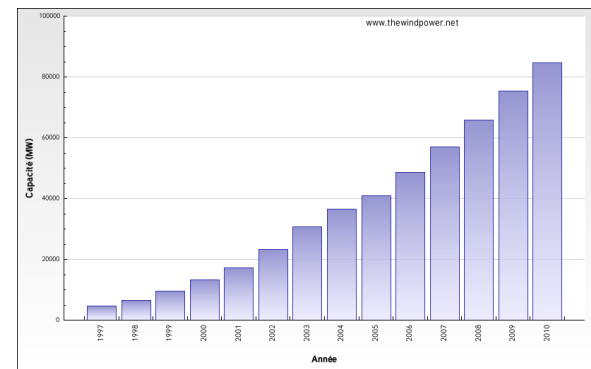
Les projections de l'EWEA sont de 15% pour l'UE 27 en 2020.



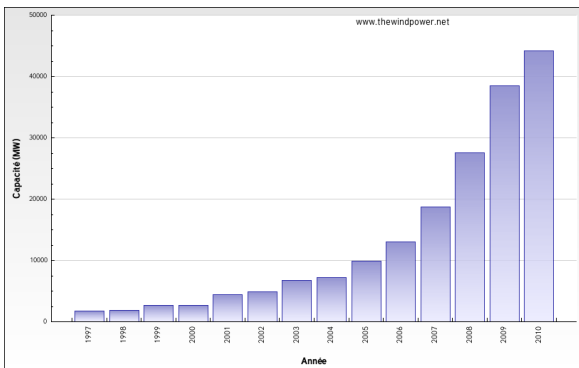
Puissance mondiale installée (1995 – 2010)



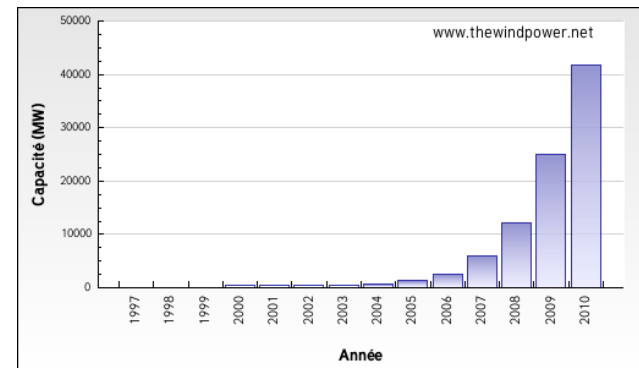
Monde 2010: 196 GW



Europe 2010: 84 GW

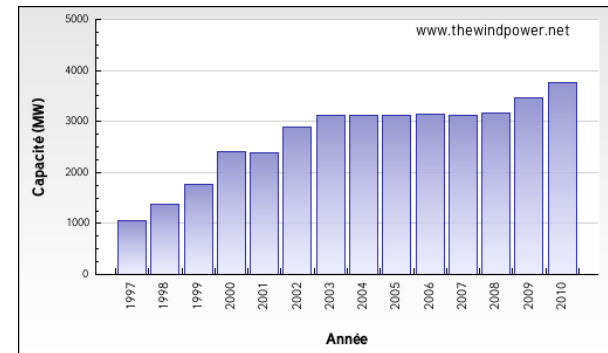
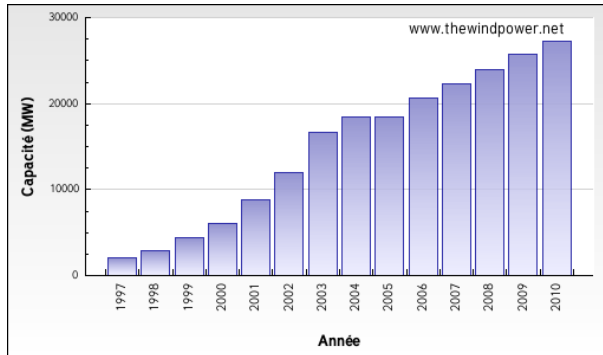


Etats Unis 2010: 44 GW



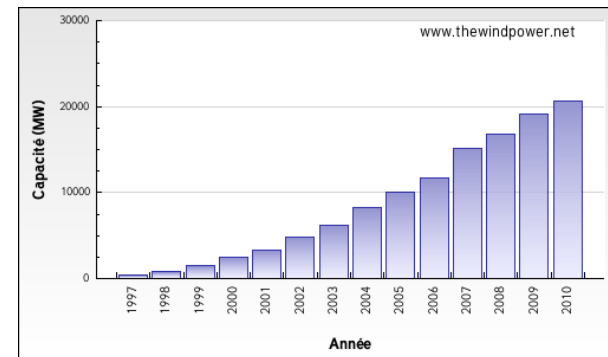
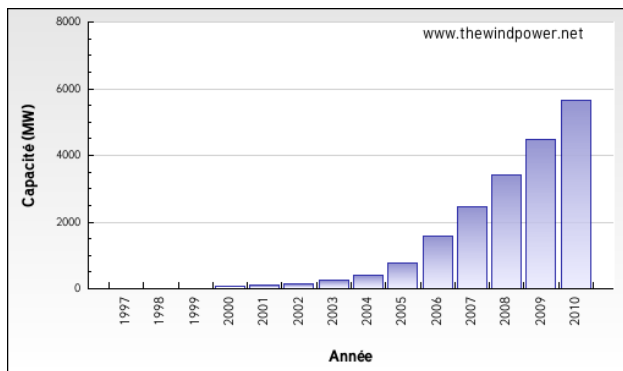
Chine 2010: 42 GW

Puissance mondiale installée (1995 - 2010)



Allemagne 2010: 28 GW

Danemark 2010: 3,8 GW



France 2010: 5,9 GW

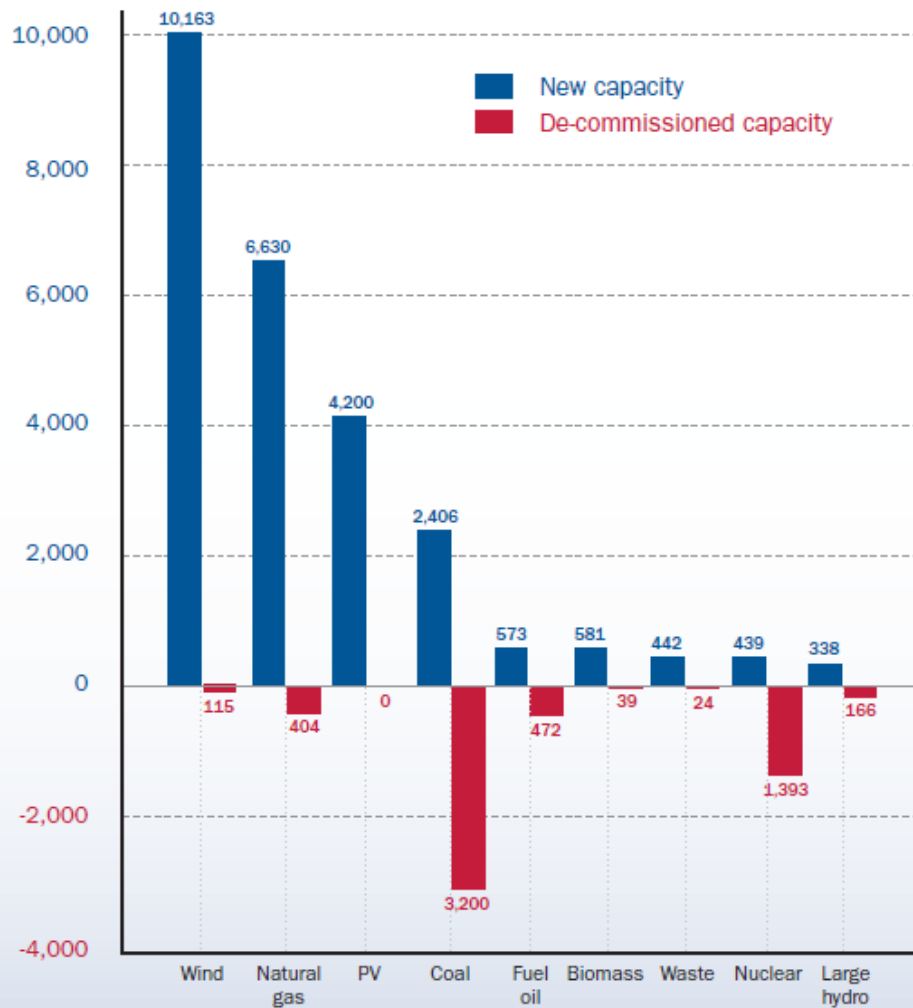
Espagne 2010: 21 GW

Nouvelles capacités installées en Europe en 2009.

L'éolien est très largement en tête, devant le gaz.

Attention, capacité ne signifie pas production. La production doit être divisée par un facteur de l'ordre de 4 pour l'éolien.

New Installed capacity and de-commissioned capacity in EU 2009 in MW. Total 25,963 MW



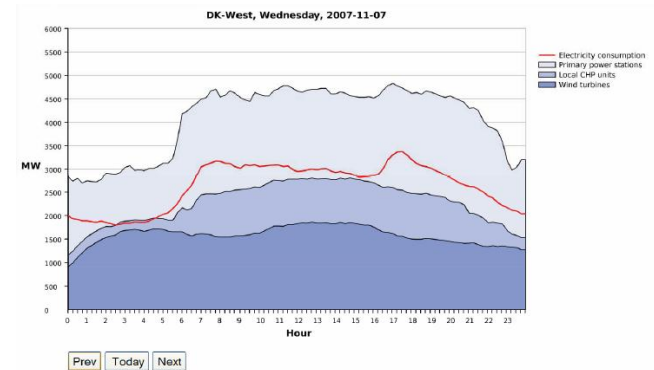
Le cas du Danemark

Le Danemark s'est lancé le premier dans l'énergie éolienne à grande échelle, ne voulant pas du nucléaire, et constatant le très fort contenu en carbone de son mix énergétique.

Il est à l'origine du concept moderne d'éolienne tripale, son laboratoire Riso est en pointe, et la firme Vestas est un acteur majeur du marché.

La production électrique éolienne y fut encouragée par des subventions, puis celles-ci arrêtées, les implantations stoppèrent avant de légèrement reprendre récemment.

- balance entre les extrêmes de production éolienne initialement par l'électro hydraulique norvégienne, première capacité d'Europe;
- Avec l'augmentation de production dans les pays nordiques, création d'une bourse (Nordpol) dans laquelle l'électricité peut avoir un coût négatif.



Journée de forte production éolienne

Installed Wind Turbine Market Shares 2008-2010

THE TABLE CONTAINS PRELIMINARY DATA, LAST UPDATE: 04/19/2011

Manufacturer	2010		2009		2008	
	Share 2010, % (according to BTMConsult, installed capacity 2010: 39.4GW) (5)	Share 2010, % (according to MAKE) (1)	Share 2009, % (according to BTMConsult, installed capacity 2009: 38.1GW)(4)	Share 2009, % (according to MAKE, installed capacity 2009: 37.6GW) (3)	Share 2008, % (according to EER, installed capacity 2008: 29.7GW) (2)	Share 2008, % (according to MAKE, installed capacity 2008: 27.5GW) (1)
Vestas (DK)	14.8	12	12.5	14.5	19	19
Sinovel (CN)	11.1	11	9.2	9.3	5	5
GE Energy (US)	9.6	10	12.4	12.5	18	18
Goldwind (CN)	9.5	10	7.2	7.3	4	4
Enercon (GE)	7.2	7	8.5	8.5	9	10
Suzlon (IN)	6.9	6	6.4	5.8	7	7
Dongfang, DEC (CN)	6.7	7	6.5	5.4	4	n/a
Gamesa (ES)	6.6	7	6.7	6.0	11	11
Siemens (GE)	5.9	5	5.9	6.7	7	5
Guodian United Power (CN)	4.2	4	n/a	2.1	n/a	n/a
MingYang WindPower (CN)	n/a	3	n/a	2.0	n/a	n/a
REpower (GE)	n/a	2	3.4	3.4	3	2.5
Nordex (GE)	n/a	2	n/a	2.5	4	3.2
Sewind (CN)	n/a	2	n/a	n/a	n/a	n/a

Entre 2008 et 2010 la part de marché européenne passe de 53% à 39%, celle de la Chine de 13 à 35%.

Table 1. Estimated Levelized Cost of New Generation Resources, 2016.

Plant Type	Capacity Factor (%)	U.S. Average Levelized Costs (2009 \$/megawatthour) for Plants Entering Service in 2016				
		Levelized Capital Cost	Fixed O&M	Variable O&M (including fuel)	Transmission Investment	Total System Levelized Cost
Conventional Coal	85	65.3	3.9	24.3	1.2	94.8
Advanced Coal	85	74.6	7.9	25.7	1.2	109.4
Advanced Coal with CCS	85	92.7	9.2	33.1	1.2	136.2
Natural Gas-fired						
Conventional Combined Cycle	87	17.5	1.9	45.6	1.2	66.1
Advanced Combined Cycle	87	17.9	1.9	42.1	1.2	63.1
Advanced CC with CCS	87	34.6	3.9	49.6	1.2	89.3
Conventional Combustion Turbine	30	45.8	3.7	71.5	3.5	124.5
Advanced Combustion Turbine	30	31.6	5.5	62.9	3.5	103.5
Advanced Nuclear	90	90.1	11.1	11.7	1.0	113.9
Wind	34	83.9	9.6	0.0	3.5	97.0
Wind – Offshore	34	209.3	28.1	0.0	5.9	243.2
Solar PV ¹	25	194.6	12.1	0.0	4.0	210.7
Solar Thermal	18	259.4	46.6	0.0	5.8	311.8
Geothermal	92	79.3	11.9	9.5	1.0	101.7
Biomass	83	55.3	13.7	42.3	1.3	112.5
Hydro	52	74.5	3.8	6.3	1.9	86.4

¹ Costs are expressed in terms of net AC power available to the grid for the installed capacity.

Source: Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2011, December 2010, DOE/EIA-0383(2010)

Financement de l'éolien

Coût de rachat de l'éolien en France (2008):

- 82 € le MWh à terre pendant 10 ans
- 130 € le MWh en mer, entre 115 et 200 € pour l'appel d'offre, pendant 10 ans.

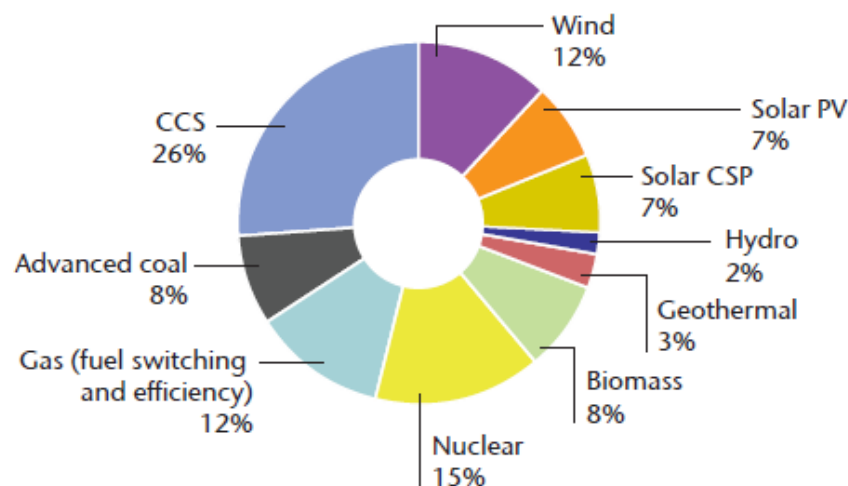
Coût de rachat du MWh nucléaire EDF: entre 39 et 46 € le MWh.

Mais il faut tenir compte des externalités:

- Le coût de l'éolien terrestre est essentiellement l'investissement initial, la ressource est gratuite; de ce fait il permet d'économiser des ressources fossiles ou nucléaires qui sont limitées; ainsi que d'éviter le rejet du CO₂ ou de produire des résidus radioactifs de longue période;
- Il est intermittent et décalé par rapport à la demande; lorsqu'il ne fonctionne pas il faut assurer l'approvisionnement électrique par d'autres moyens, en assurant le capex et l'opex correspondant; les interactions avec le réseau sont importantes.

Scénario Blue Map AIE 2050

Figure 1: Shares in power sector CO₂ emissions reductions in the BLUE Map scenario by 2050



Source: IEA (2008a).

KEY POINT: Wind power accounts for 12% of global CO₂ emissions reductions in the power sector by 2050.

Eolien et CO2

Analyse de cycle de vie:

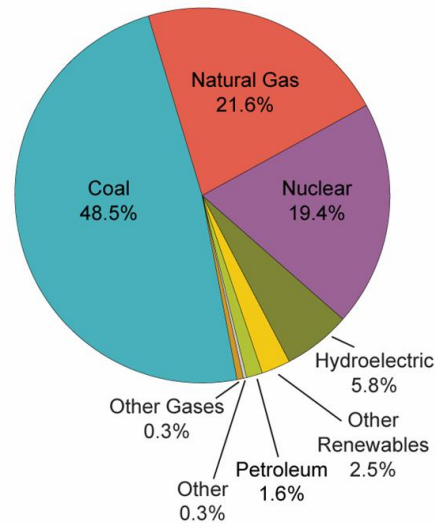
- Un kilowattheure éolien génère entre 3 et 22 g de CO2 (source EDF) contre 6 pour le nucléaire, 750 à 1100 pour une centrale à charbon.
- Pour un aérogénérateur de 2 MW la dette énergétique est remboursée en 8 à 9 mois pour une durée de vie de 20 ans.

En 2008 l'éolien a sauvé 157 MT CO2, 16% de l'objectif de Kyoto

En offshore, notamment profond, l'investissement est plus lourd (structure, installation) et se traduira par un bilan CO2 plus important qu'à terre.

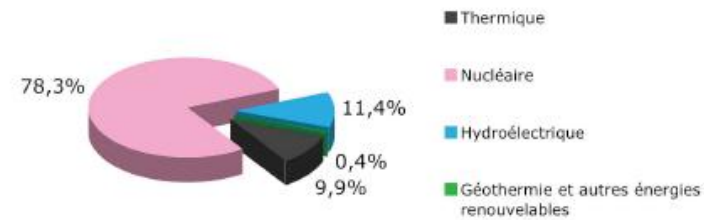
Eolien et CO2 / mix énergétique

Total = 4,157 billion kilowatthours



**Mix énergétique électrique
Etats Unis
2007**

Mix électrique français moyen de l'année 2006



**Mix énergétique électrique français
2006**

Le mix énergétique français étant très décarboné, les gains en CO2 apportés par l'éolien sont faibles, contrairement aux pays utilisant de grandes quantités de charbon (Etats Unis, Chine, Allemagne...).

Eolien et CO2 / intermittence

Lorsque l'éolien ne souffle pas il peut être remplacé par de l'hydraulique (dans ce cas il reste vert, cas des échanges entre le Danemark et la Norvège).

Mais le plus souvent il est remplacé par des centrales à flammes ou des turbines à gaz, dont la mise en service s'accompagne de fortes émissions. Le bilan des éoliennes en est diminué, mais reste largement positif dans les pays dont le mix énergétique électrique est fortement carboné.

Dans le cas de la France une puissance éolienne supérieure à 15 GW nécessitera, compte tenu des impératifs de fonctionnement du nucléaire, un accroissement du recours aux combustibles fossiles (notamment TAG) avec augmentation de l'émission des gaz à effet de serre (conclusion de l'Académie des Technologies).

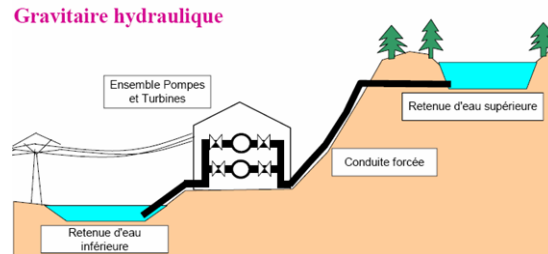
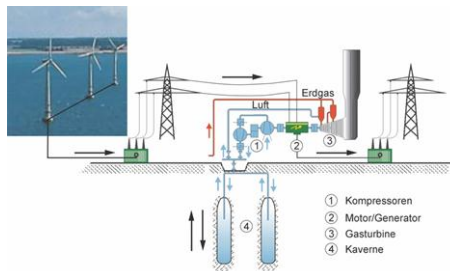
Nécessité de prévisions météo très fiables.

Eolien et CO2 / intermittence

L'introduction de grande quantité d'électricité d'origine éolienne intermittente et décalée par rapport à la demande va nécessiter le renforcement et des modifications importantes dans le fonctionnement des réseaux électriques.

Une autre solution d'avenir, le stockage d'énergie?

STEP, CAES, batteries, hydrogène...



Autres aspects environnementaux

N'utilise pas d'eau, laisse l'essentiel de l'espace libre, mais impact paysager important.



Bruit, impact sur la faune (oiseaux), y compris en mer.

L'éolien peut-il être auto suffisant?

Au niveau mondial, que peut l'éolien?

Suite à l'accident de Fukushima et à la position allemande, la France pourrait-elle sortir du nucléaire à partir de l'éolien?

Éléments non exhaustifs, pour introduire la réflexion.

L'éolien peut-il être autosuffisant?

Données France:

- Production d'électricité totale 2008: 575 TWh, dont nucléaire: 440 TWh, soit 50 GW de puissance moyenne.
- Eolien 2010: 5,5 GW installés, 3 550 éoliennes, 1,5 MW de moyenne.
- Appel d'offre offshore: 3 GW, 600 éoliennes, 5 MW individuelles.

Hypothèse de remplacement éolien:

- 65 % terrestre, éoliennes 2MW, 25% coefficient de charge;
- 35 % marin, éoliennes 5MW, 35% de charge.

Nombres d'éoliennes nécessaires:

- 65 000 éoliennes terrestres, 18,3 fois le nombre actuel.
- 10 000 éoliennes offshore, 17 fois l'appel d'offre actuel.

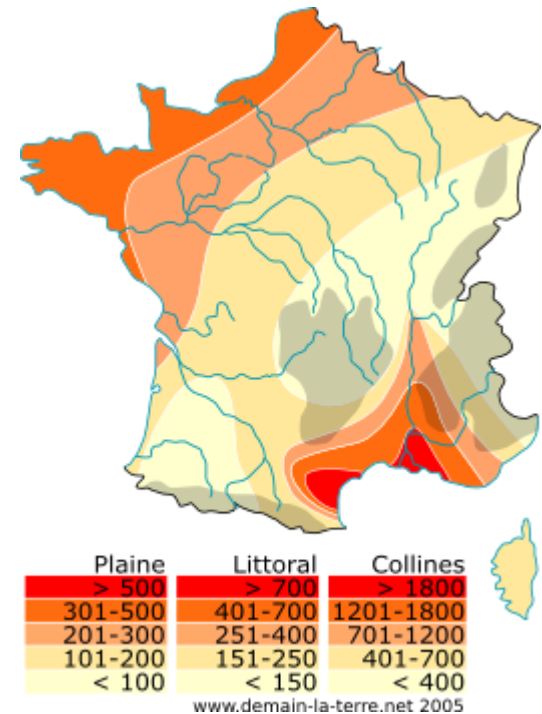
L'éolien peut-il être autosuffisant?

65 000 éoliennes peuvent, en théorie, trouver facilement place sur 5 à 10% du territoire français venté.

Mais en pratique?

Littoral français (4000 km) peu favorable à l'implantation aisée de 10 000 éoliennes (2,5 éoliennes par km).

Nécessité de revoir très en profondeur le réseau.



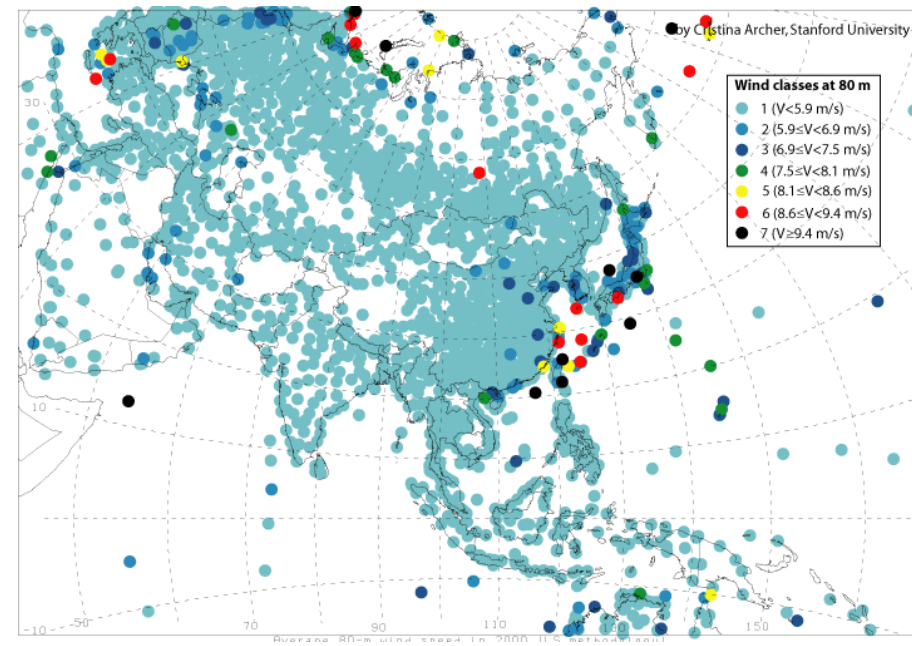
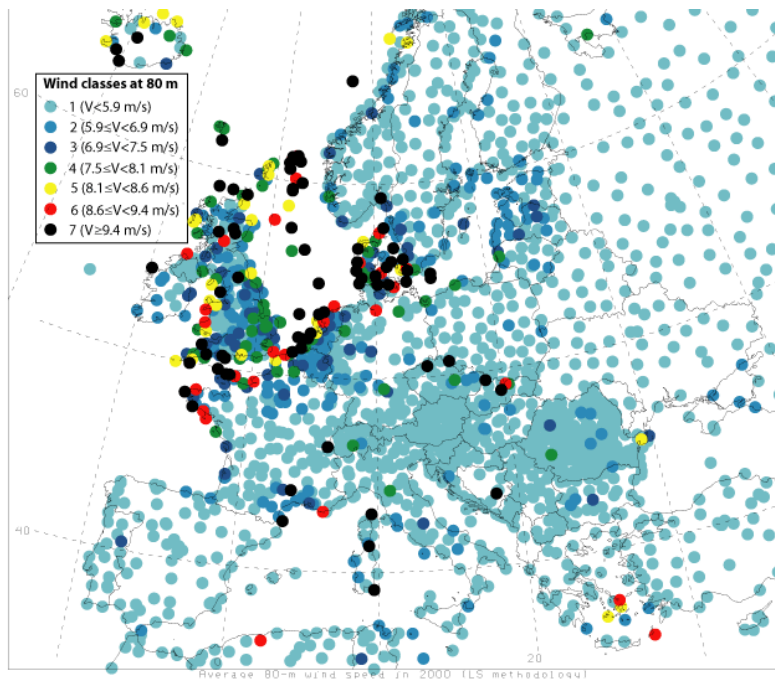
Le problème de l'intermittence

Reprenant les hypothèses précédentes, la puissance installée serait de 180 GW pour un besoin moyen de 50 GW. La puissance fournie évoluerait donc entre 0 et 180 GW. Dans la réalité la France ayant trois régime de vents indépendants on peut admettre que la descente à zéro est improbable, mais qu'on puisse compter toujours sur au moins 30% de la production moyenne, soit 15 GW environ.

Les 35 GW nécessaires supplémentaires peuvent être produits par des turbines à gaz, moyennant les investissements complémentaires nécessaires et le CO2 induit. Ceci ne concerne que les moyennes, sans tenir compte des pointes de consommation (jusqu'à 85 GW en hiver).

Ils n'existe aucun moyen viable de stocker l'électricité au niveau demandé:

- Une journée stockée correspond à 28 millions de tonnes de plomb minimum;
- Le plus grand Step de France a une capacité de 1,6 GW pendant 20 heures.



Selon une étude (www.stanford.edu/group/efmh/winds/global_winds.html) l'équipement éolien de 13% de la surface des continents ou de l'offshore proche suffirait à satisfaire la consommation mondiale d'énergie. On note que certaines régions côtières sont privilégiées.

MERCI DE VOTRE ATTENTION