

**EOLIEN,
UNE TECHNOLOGIE MATURE,
UNE REALITE,
DES LIMITES.**



1780: jardin de l'Elysée

28 mai 2009



2008 Off shore

SLC - J.P. Pervès

Une vieille idée, même pour l'électricité

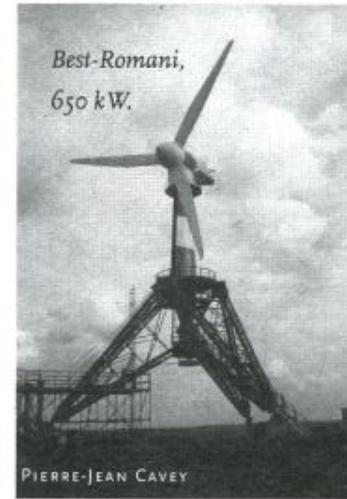
LES GÉANTES DU PASSÉ



1939

en... 1939 ! Le rotor, composé de deux pales, affichait 53 mètres de diamètre, la tour 33 mètres. L'éolienne fut raccordée au réseau en 1941. Malheureusement, l'histoire a tourné court en 1945, avec la chute d'une pale. En cette période de guerre, les coûts de l'acier empêchèrent son remplacement. Toutefois, si l'expérience fut un échec commercial, l'exploit technologique a été largement reconnu. De ce côté de l'Atlantique, des prototypes gigantesques ont

Le record de la plus grande éolienne a long-temps été détenu par le prototype mis au point par le génial Palmer Putnam et le fabricant de turbines hydroélectriques Morgan Smith. D'une puissance de 1,25 MW, la machine a été montée dans le Vermont, aux États-Unis,



1956/1960

aussi marqué l'histoire de l'éolien. À Nogent-le-Roi (28), la machine expérimentale Best-Romani de 650 kW, montée en 1956, présentait un rotor de 30 mètres de diamètre. À la même période, une Neyrpic de 1 MW était testée à Saint-Rémy-des-Landes (50). Les machines furent démontées dans le milieu des années 1960,

EDF ayant suspendu ses recherches dans l'éolien.

Pour voir la Putnam-Smith en action :

www.ceere.org/rerl/publications/movies/

Site détaillé sur la Best-Romani :

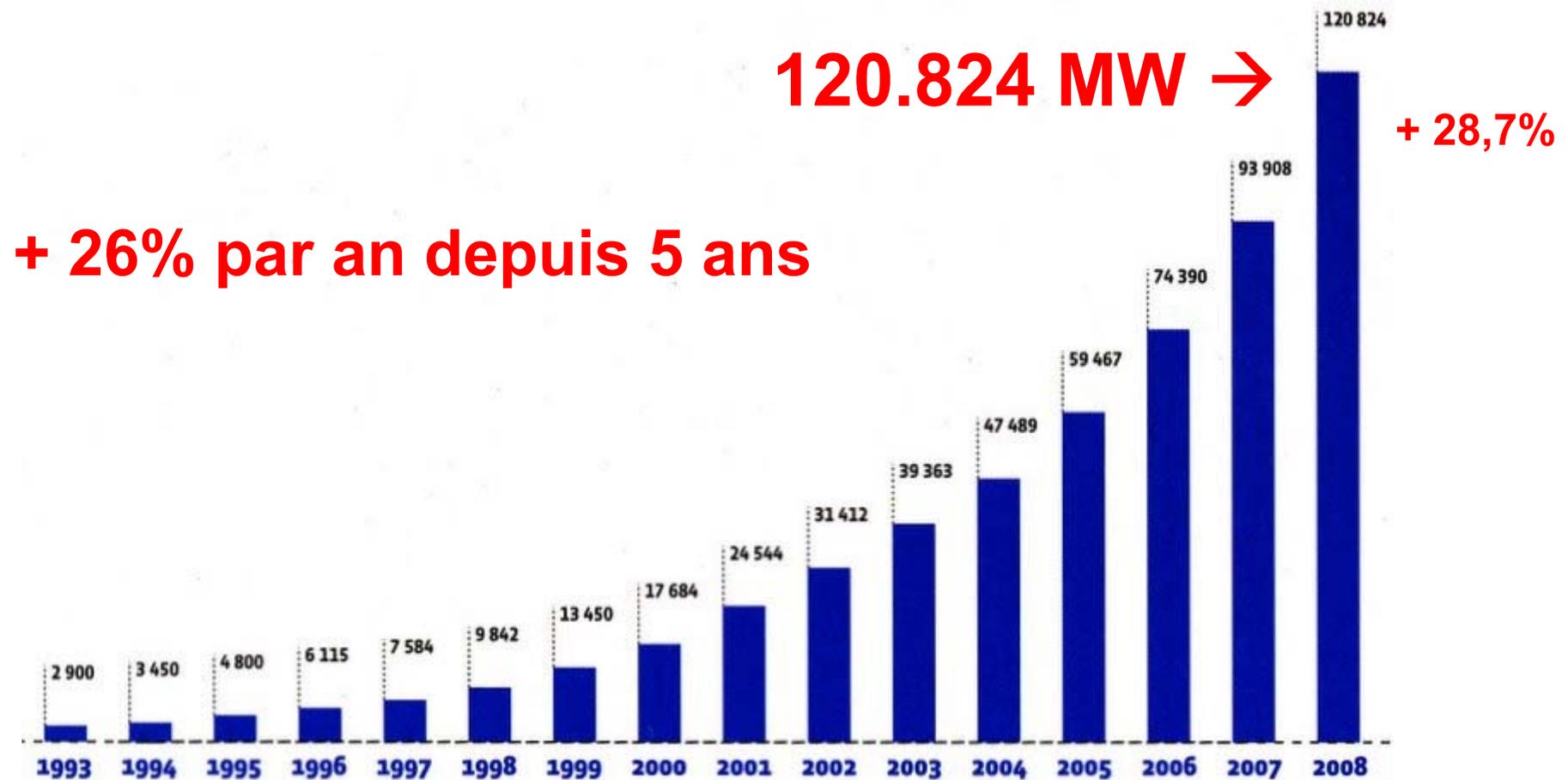
<http://eolienne.cavey.org>



Et en 1983 sur les bords de Saint-Laurent une éolienne Darrieus de 4 MW

L'éolien dans le monde

Monde: évolution de la puissance éolienne cumulée 1993/2008 (MW)



Source: E.ON Energy Research Center (ERC) 2009

SLC - J.P. Pervès

L'éolien fin 2008

- **Puissance installée**
 - Monde (+ 28,7%): 120.823 MW
 - Europe (+14,2%): 66.000 MW
 - Amérique du Nord (+ 47,5%): 27.539 MW
 - Asie (+54,3%): 24.368 MW
 - **Part de la production d'électricité: 0,9 %**
- **Détails Europe**
 - Energie produite (+18,6%): 122,7 TWh
 - Rendement annuel: 23 %
 - Heures équivalent pleine puissance: 2014 h
 - **Part de la production d'électricité: 3,1 %**
- **Détails France**
 - Puissance installée fin année (+38,6%): 3.404 MW
 - Energie produite (+39,6%): 5,6 TWh
 - Rendement annuel moyen: 22 %
 - Heures équivalent pleine puissance: 1927 h
 - **Part de la production d'électricité: 1,03 %**

Monde: production d'électricité par sources (TWh)

| | <u>MONDE(2007)</u> | <u>EUROPE(2007)</u> | <u>France (2008)</u> |
|----------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| • Eolien: | 169 | 104 | 5,6 |
| • Fossiles: | 13.442 | 1699 | 53 |
| • Hydraulique: | 3.145 | 521 | 68 |
| • Nucléaire: | 2.788 | 968 | 418 |
| • Biomasse: | 218 | 84 | 4 |
| • Géothermie: | 59 | 10 | |
| • Déchets: | 40 | 20 | |
| • Solaire: | 8 | 4 | 0,01 |
| TOTAL | 19.824 | 3309 | 549 |

Energie éolienne produite en Europe en 2008

En 2008: 122,7 TWh soit 3,8% de l'électricité
(+ 18,6% et + 19,2 TWh par rapport à 2007)

| | <u>fin 2008</u> | <u>2008/2007</u> | <u>HEPP</u> | <u>η</u> | <u>fossiles</u> |
|---------------|-------------------|------------------|---------------|--------------|-----------------|
| Allemagne | 41923 GWh | → + 7,4% | 1813 h | 20,7 % | 60 % |
| Espagne | 34207 GWh | → + 10,5% | 2146 h | 24,5 % | 61 % |
| Danemark | 7300 GWh | → + 1,8% | 2312 h | 26,4 % | 70 % |
| Royaume-Uni | 6571 GWh | → + 36,0% | 2312 h | 26,4 % | 72 % |
| Italie | 5957 GWh | → + 37,0% | 1840 h | 21,0 % | 75% |
| Portugal | 5700 GWh | → + 33,2% | 2233 h | 25,5 % | |
| France | 5654 GWh | → + 38,7% | 1927 h | 23,0 % | 10 % |
| Pays Bas | 4200 GWh | → + 27,3% | 2111 h | 24,4 % | 85 % |
| Suède | 2021 GWh | → + 24,9% | 2181 h | 24,9 % | 3 % |
| EUROPE | 122687 GWh | → + 23,0% | 2014 h | 23,0% | |

Attention approximation! On suppose que la puissance est la moyenne entre les puissances fin 2007 et fin 2008

Effacement des éoliennes si trop de vent
Espagne et Danemark saturés

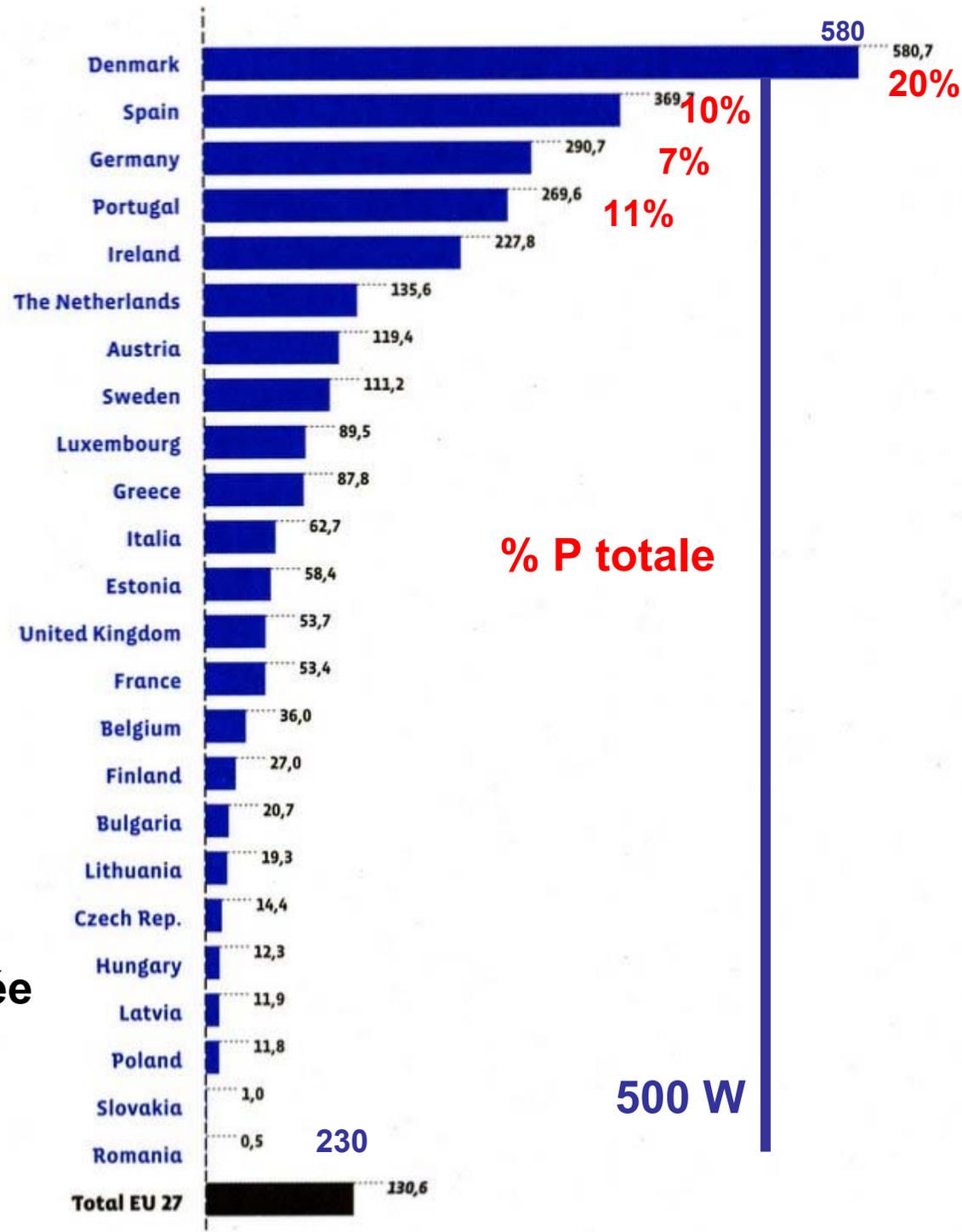
Source (EurObserv'ER 2009): UE, AWEA (US), GWEC

Puissance installée par personne en Europe fin 2008: W/Habitant

Danemark: 580 W/p
Espagne: 370 W/p
Allemagne: 270 W/p

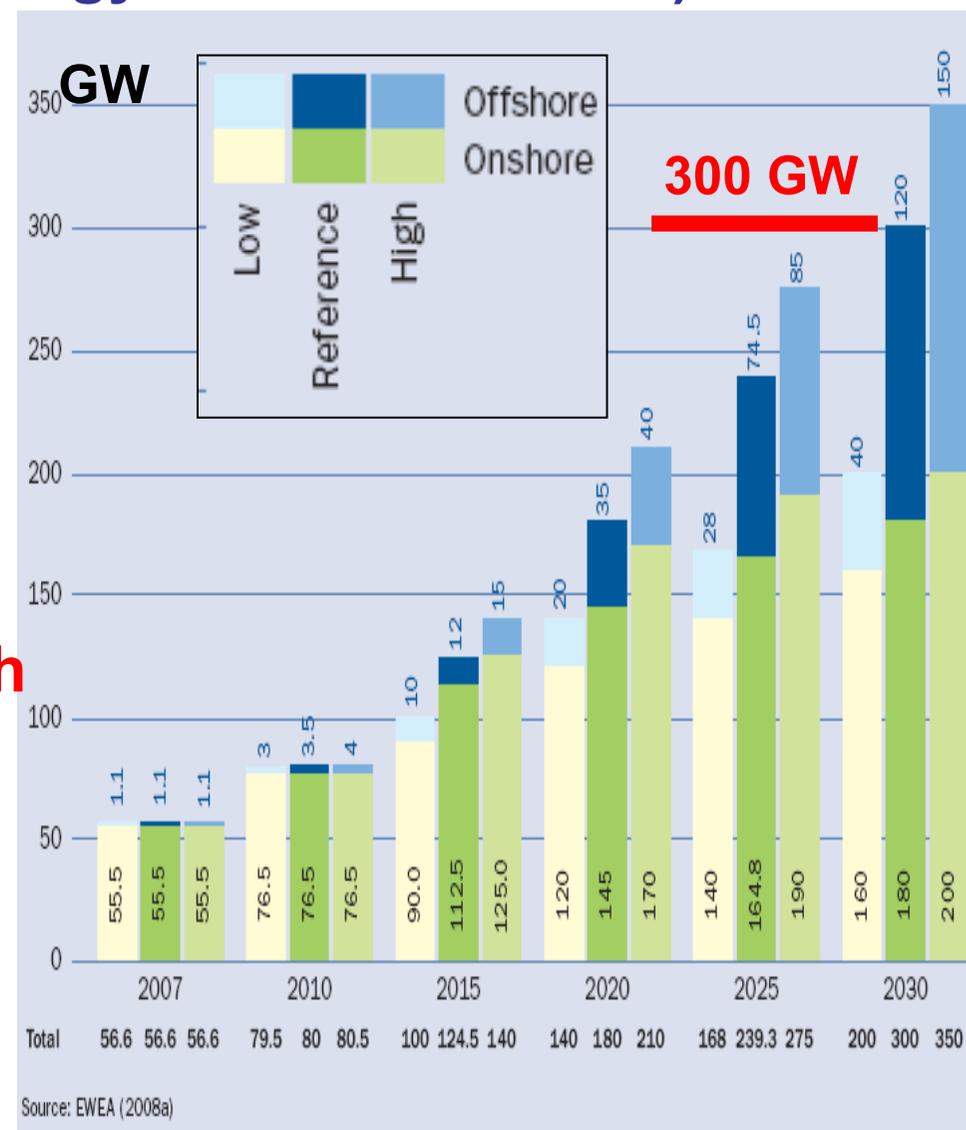
**De quoi alimenter une
ampoule à incandescence
de ~100 W pendant une année**

28 mai 2009



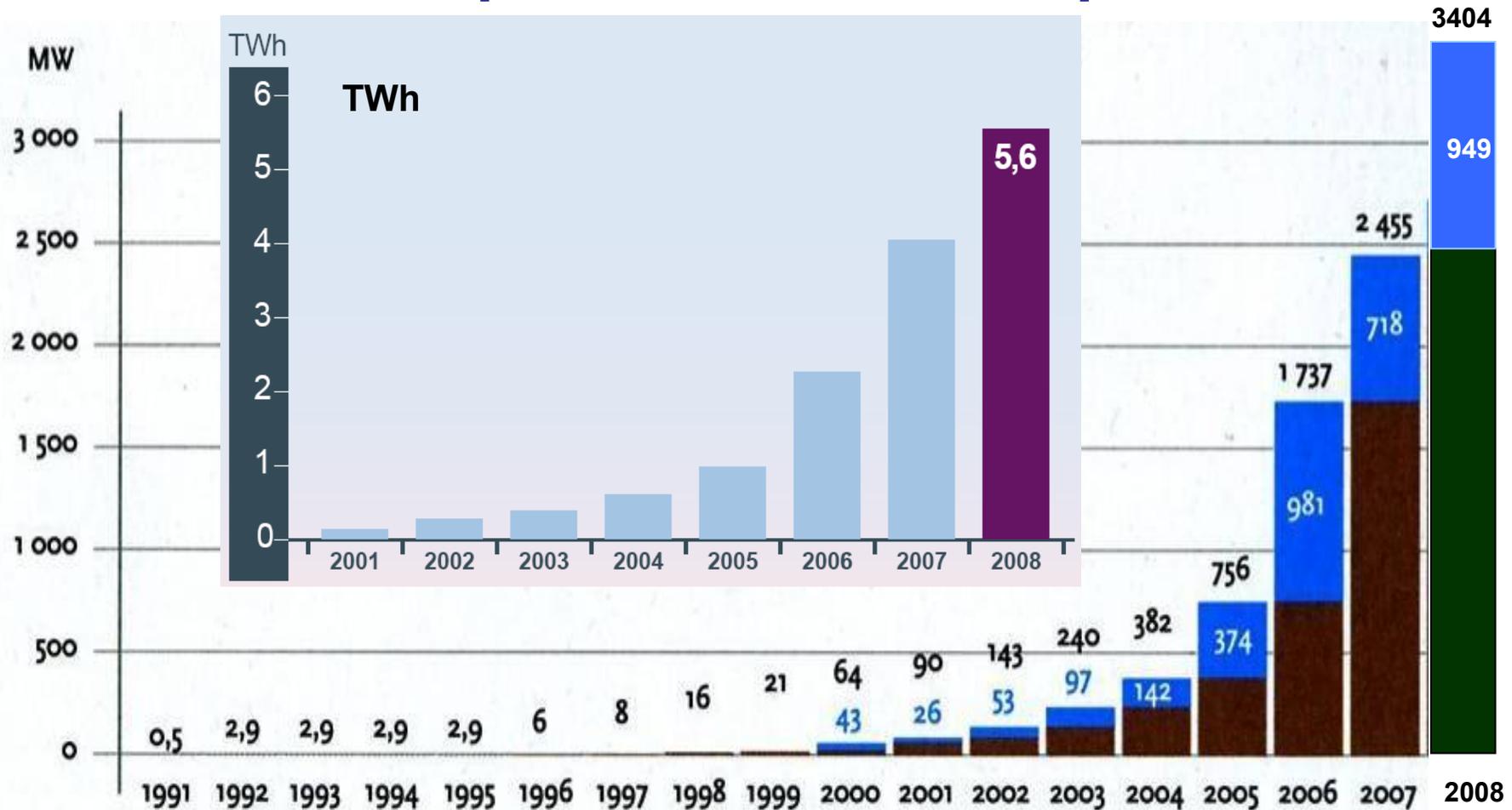
Scénarios d'évolution de l'éolien en Europe 2007/2030 (European wind energy association 2008)

- **Puissance installée:**
 - 300 GW (x 4,6 / 2008)
- **Production:**
 - 935 TWh (x 7,6 / 2008:
(effet offshore?))
- **Besoins d'électricité:**
 - entre 3400 et 4400 TWh
 - (x 1,33 / 2008)
- **Part de l'éolien:**
 - entre 21,2% et 28%



L'énergie éolienne en France

Evolution puissance installée/production



Sources : Ademe jusqu'en 1998, DGEMP de 1999 à 2004, Observ'ER de 2005 à 2008.

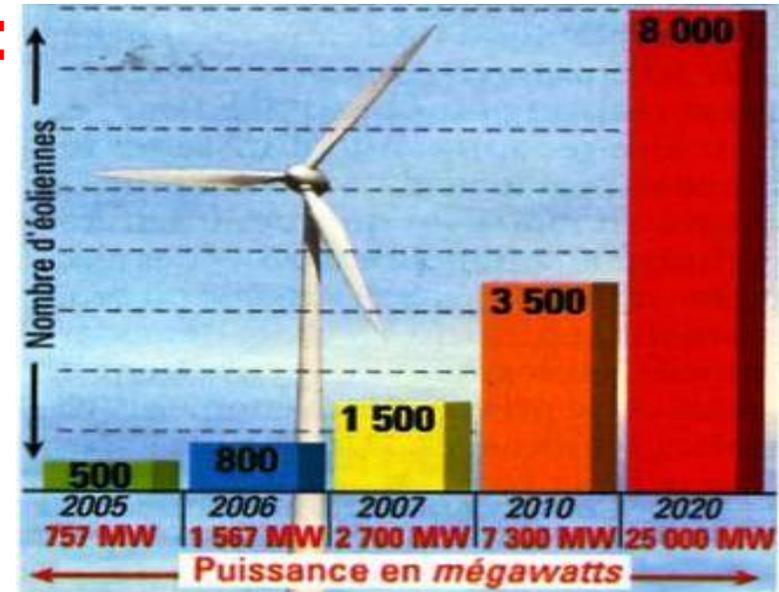
LE PLAN BORLOO (nov. 2008)

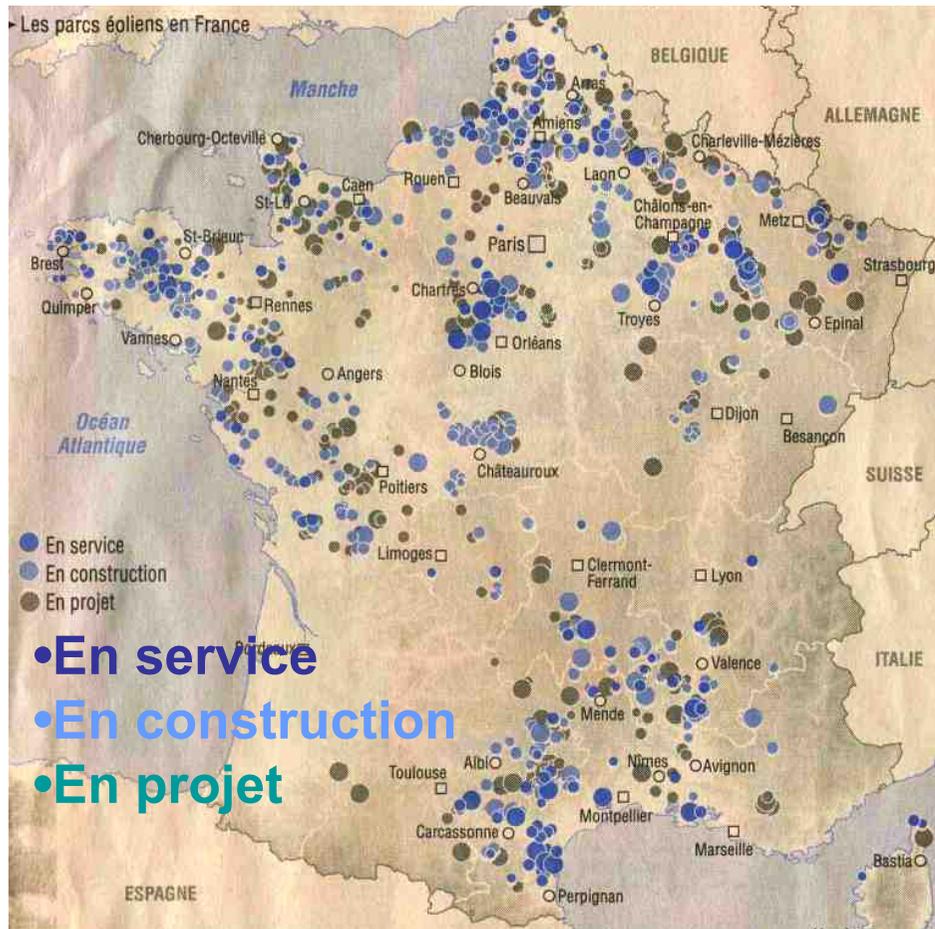
- **Situation actuelle (fin 2008):**

- 2300 éoliennes, soit 3400 MW
- Production 5,6 TWh

- **Objectifs 2020**

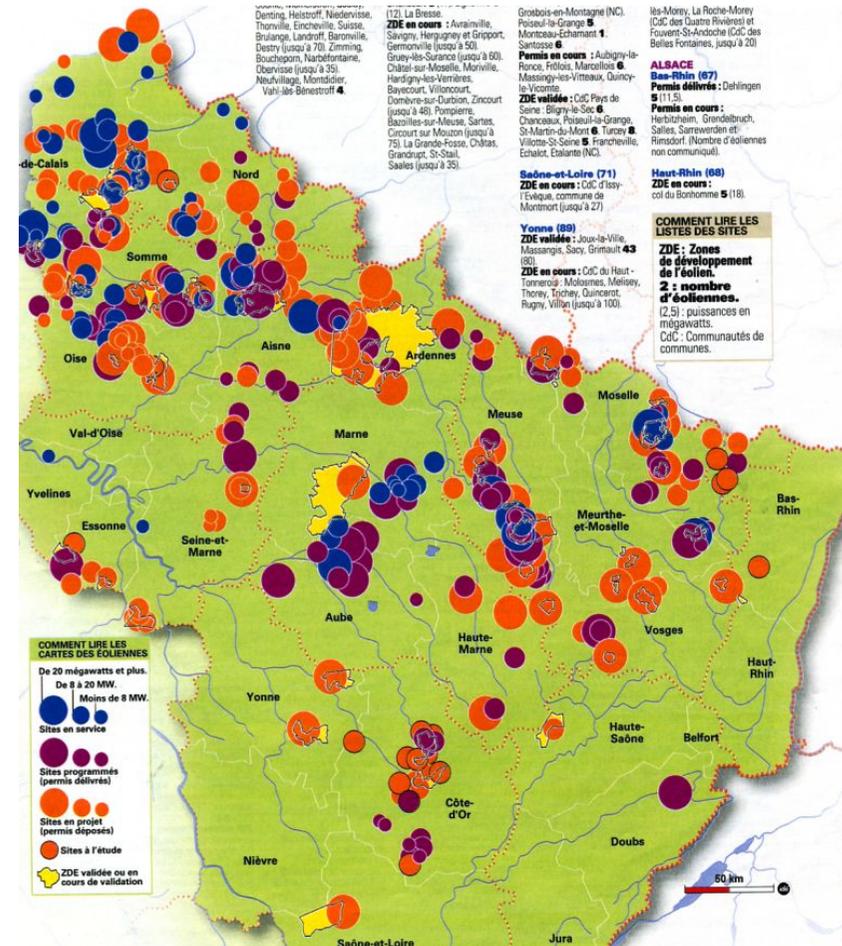
- + 6.500 éolienne de 3 à 5 MW
- Surface des parcs 2500 km²
- **Puissance totale: 25.000 MW**
- **Coût d'investissement:**
 - ~ 1,5 M€/ MW on shore et ~ 3 M€/MWh off shore
 - soit environ 46 milliards € d'investissements
- **Production d'énergie: environ 54 TWh**
- **Part dans la production française en 2020:**
 - 54 TWh / 600 TWh = 9 % ou ± 4,5 centrales nucléaires/60
- **Economie de CO² : 16 millions de tonnes selon l'ADEME ???**





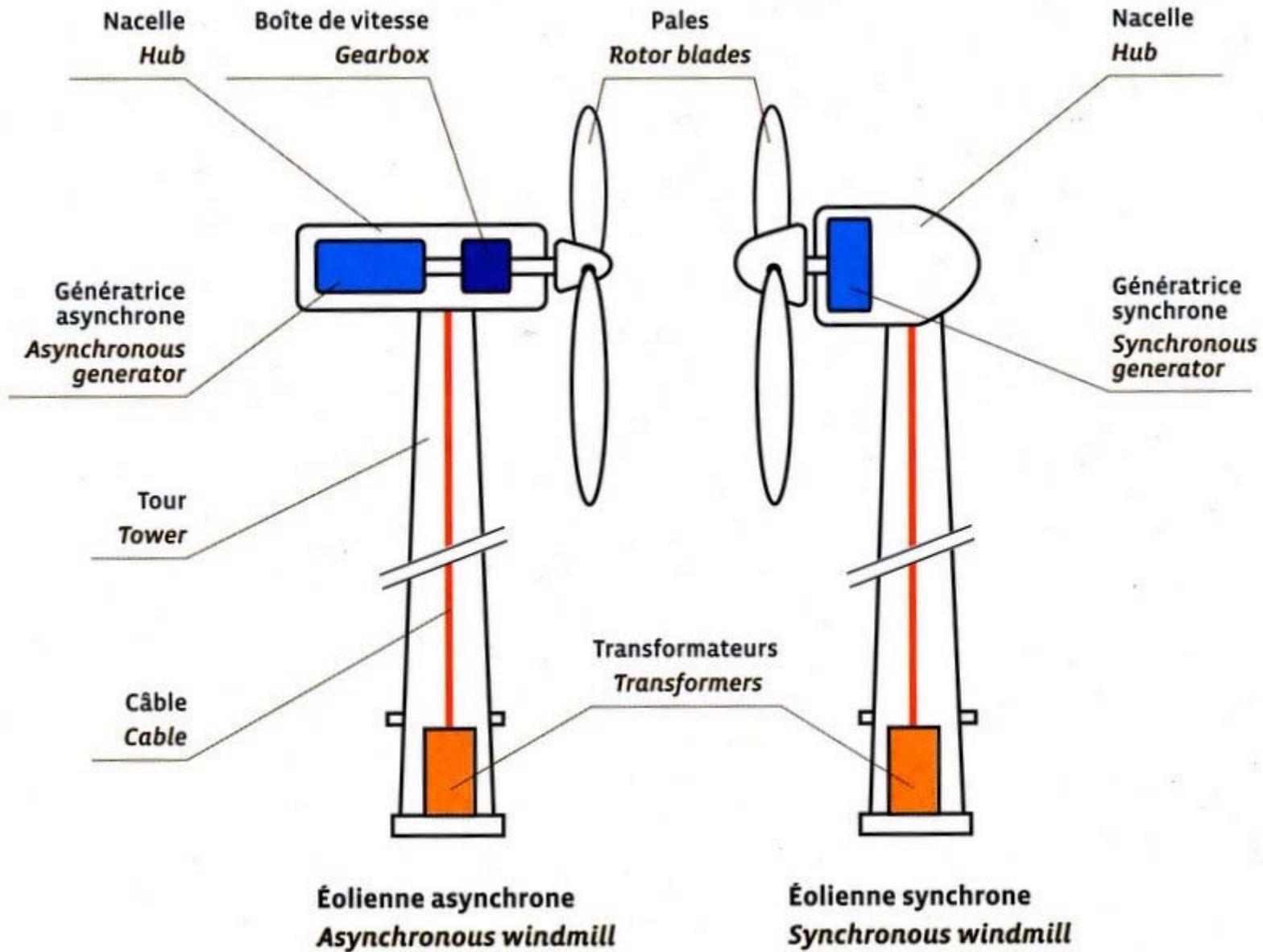
Une tendance au mitage du territoire

Un correctif: mise en place de Zones de Développement des Eoliennes (ZDE)

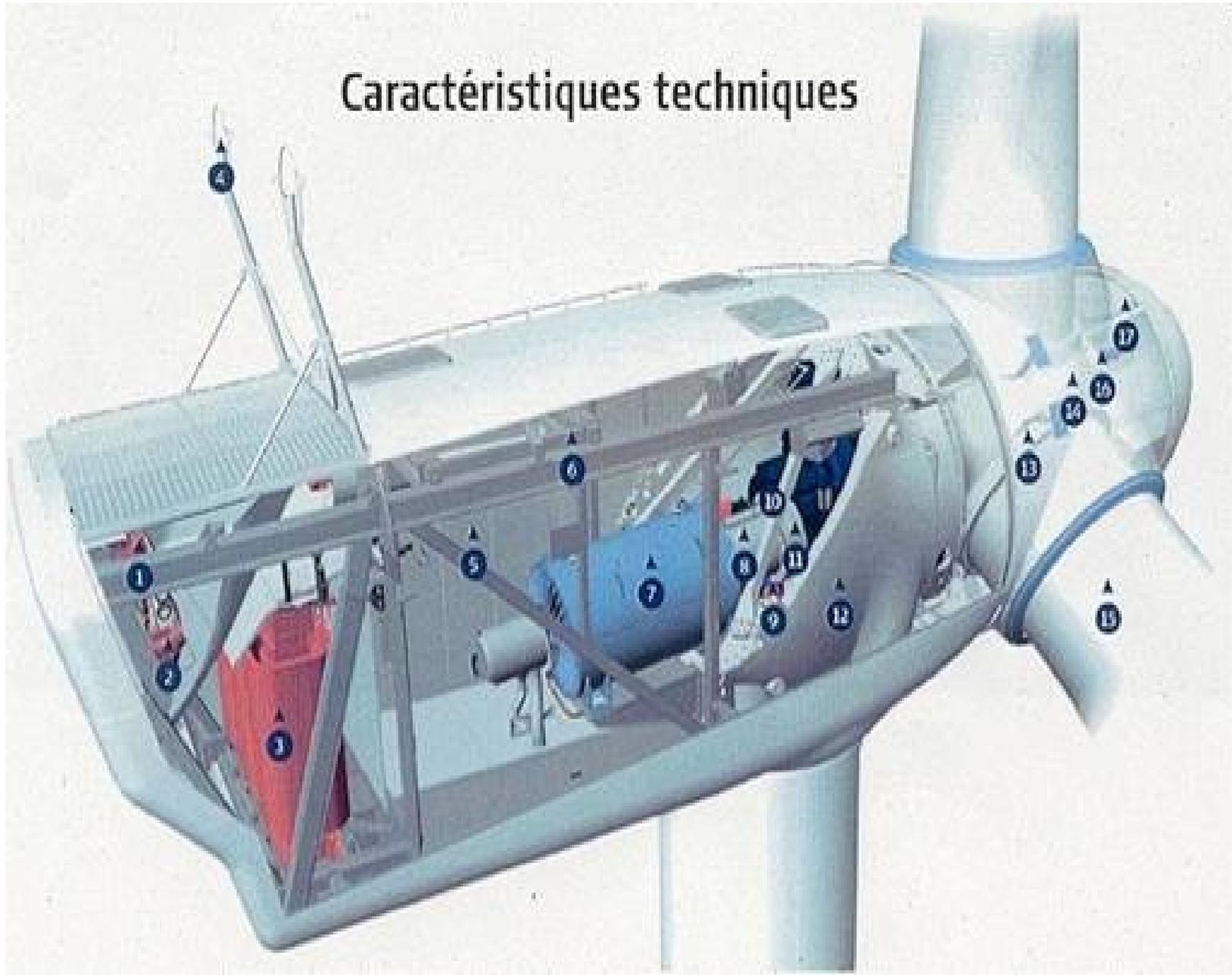


Aspects techniques

DEUX GRANDS PRINCIPES



Caractéristiques techniques

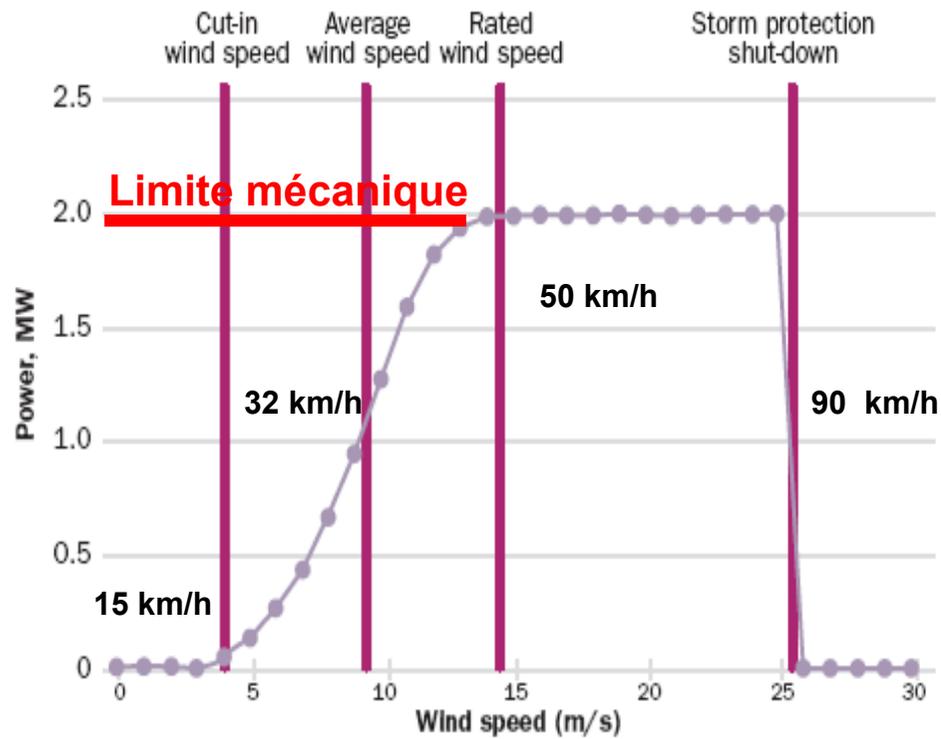


La physique de l'éolienne

- **Puissance = $\frac{1}{2}$ Masse x Vitesse de l'air²**
 - Masse traversante proportionnelle à la vitesse: $M = k V$
 - D'où puissance proportionnelle à la vitesse au cube: $P = k' V^3$

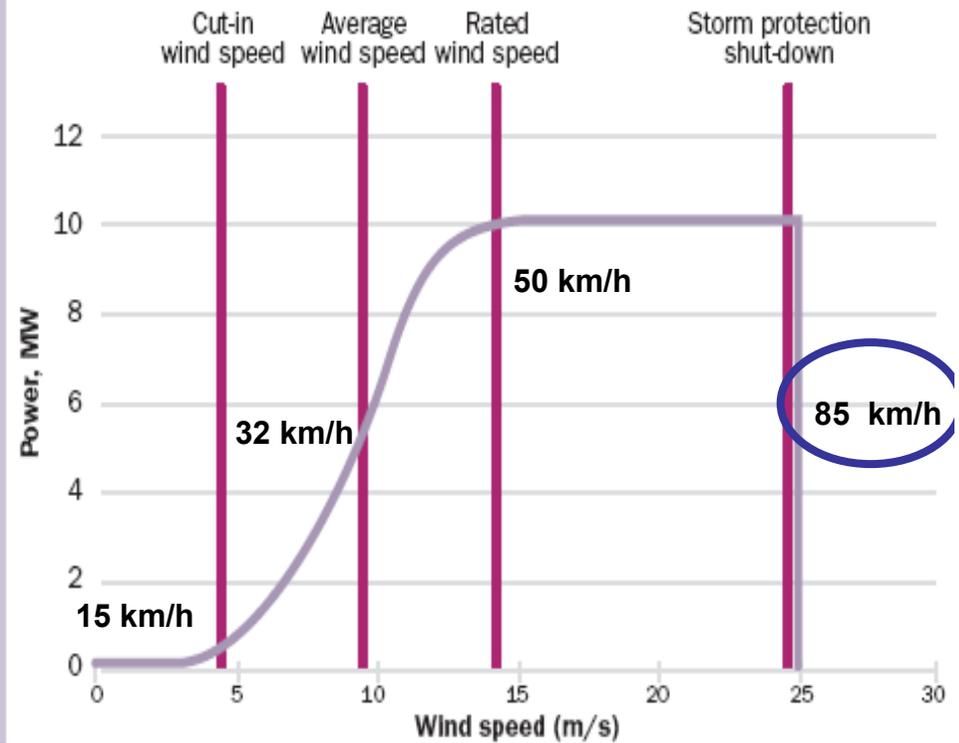
Avec $k' = C_p/2 \cdot \rho \cdot S$
 C_p = rendement fonction du pas des pales, de 0 à 0,5
 $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$
 S = surface balayée par les pales)
- **La loi de Albert BETZ (Allemagne 1919) montre une limite théorique correspondant à de 59% de l'énergie cinétique du vent (éolienne moderne: 85% de cette limite soit rendement de 50%)**
 - espacer les éoliennes
- **Exemple pour $V = 10 \text{ m/s}$ et $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$**
 - la puissance maximale est de **370 W/m²** de surface balayée
 - Soit 1 MW pour une hélice de 60 m de diamètre
- **Gain de 1% pour une hauteur supplémentaire de 10 m (force du vent)**
 - d'où une course au diamètre et à la hauteur

Figure 1: Wind turbine power curve and aggregated wind farm power curve used e.g. for regional assessments and forecasts



90 km/h

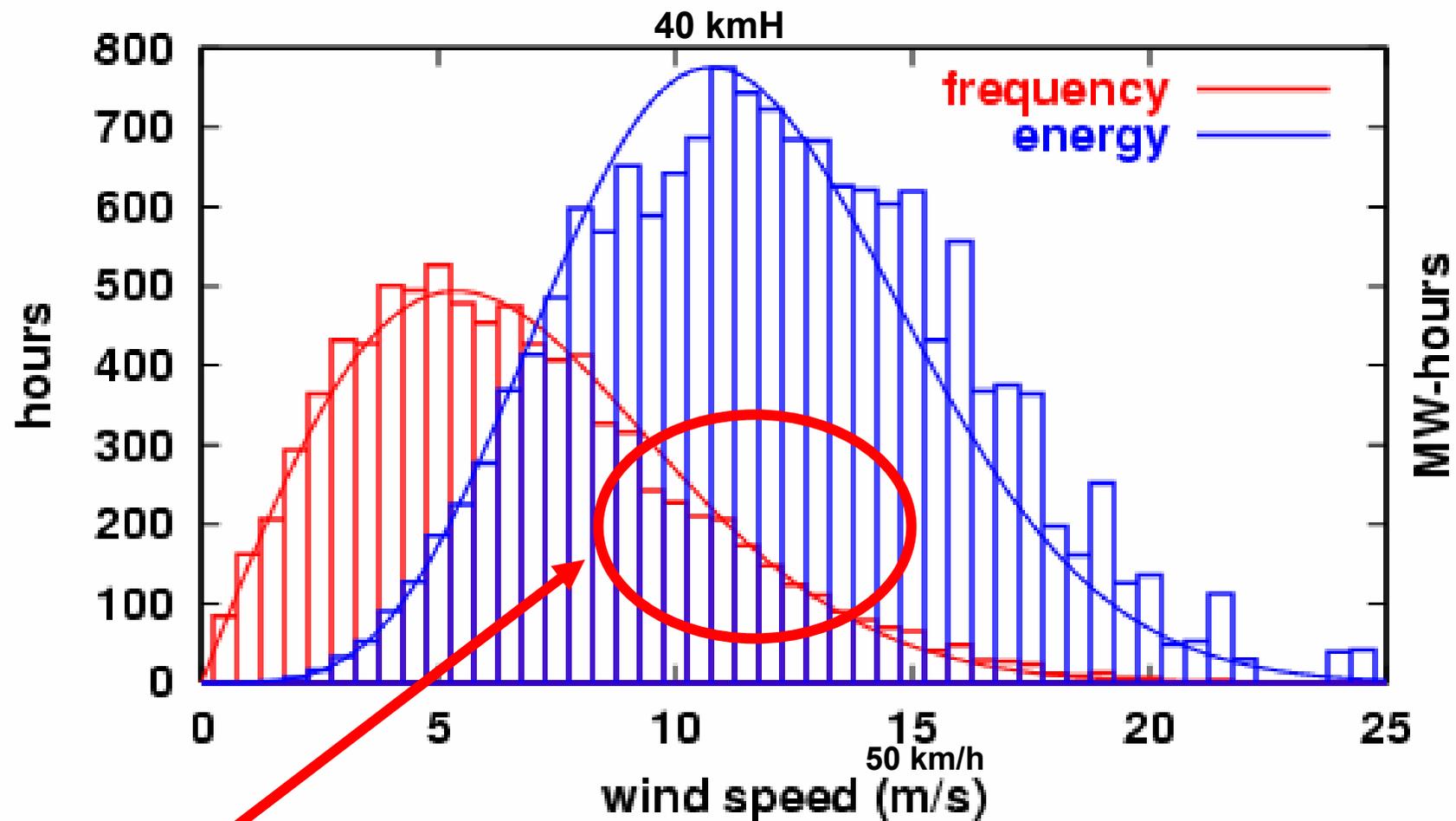
EOLIENNE ISOLEE



PARC D'EOLIENNES

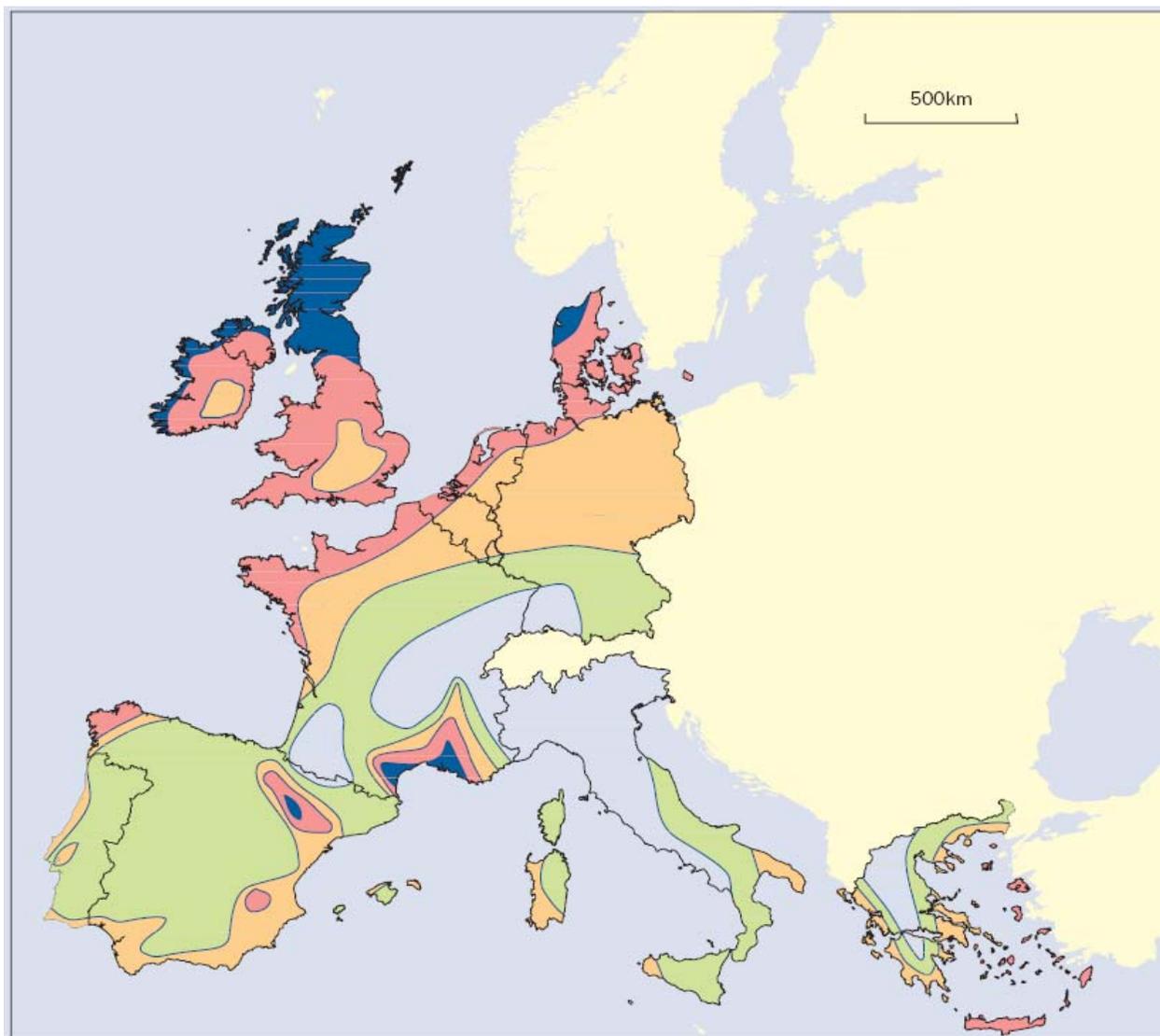
Source EWEA

Corrélation vitesse du vent/ puissance et énergie (US)



Peu d'heures avec beaucoup d'énergie produite

**Europe
Carte des vents
on shore:
choisir les lieux
d'implantation**



Wind resources at 50 metres above ground level for five different topographic conditions

| | Sheltered terrain | | Open terrain | | At a sea coast | | Open sea | | Hills and ridges | |
|--|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | ms ⁻¹ | Wm ⁻² | ms ⁻¹ | Wm ⁻² | ms ⁻¹ | Wm ⁻² | ms ⁻¹ | Wm ⁻² | ms ⁻¹ | Wm ⁻² |
| | >6.0 | >250 | >7.5 | >500 | >8.5 | >700 | >9.0 | >800 | >11.5 | >1800 |
| | 5.0-6.0 | 150-250 | 6.5-7.5 | 300-500 | 7.0-8.5 | 400-700 | 8.0-9.0 | 600-800 | 10.0-11.5 | 1200-1800 |
| | 4.5-5.0 | 100-150 | 5.5-6.5 | 200-300 | 6.0-7.0 | 250-400 | 7.0-8.0 | 400-600 | 8.5-10.0 | 700-1200 |
| | 3.5-4.5 | 50-100 | 4.5-5.5 | 100-200 | 5.0-6.0 | 150-250 | 5.5-7.0 | 200-400 | 7.0-8.5 | 400-700 |
| | <3.5 | <50 | <4.5 | <100 | <5.0 | <150 | <5.5 | <200 | <7.0 | <400 |

La conception d'une éolienne moderne

- L'axe des pales est incliné de 4 à 5° pour compenser le gradient vertical de la vitesse du vent et éloigner la pale du mât
- Les hélices tripales ont un rendement théorique de 2 à 3% supérieur à celui des machines bipales (seuls Nordic et Vernet font des bipales)
- Régulation de puissance par calage variable: mise en drapeau ou décrochage forcé (diminution ou augmentation de l'angle d'incidence)
- Le rendement aérodynamique est une fonction de $\lambda = \Omega R/V$
 - (Ω = vitesse de rotation, R = rayon de pale et V = vitesse du vent)
 - Pour une éolienne à vitesse fixe on vise $\lambda = 6$
- Les machines sont généralement à V variable (Ex de 6 t/mn pour
 - V = 4 m/s à 14 t/mn pour l'E70 de Vesta)
- La variation de fréquence sur le réseau est limitée à 2% soit 1 Hz
- La hauteur du mât est généralement égale au diamètre des pales et le mât est tubulaire (Europe) ou à treillis (USA: -35% de poids)
- Isolation phonique des nacelles pour limiter le bruit mécanique
- dessin optimisé des bouts des pales et inclinaison de 4,5° pour limiter le bruit aérodynamique

**Deux progrès majeurs des années 80/90: matériaux composites
et électronique de puissance**

Evolution du diamètre des éoliennes

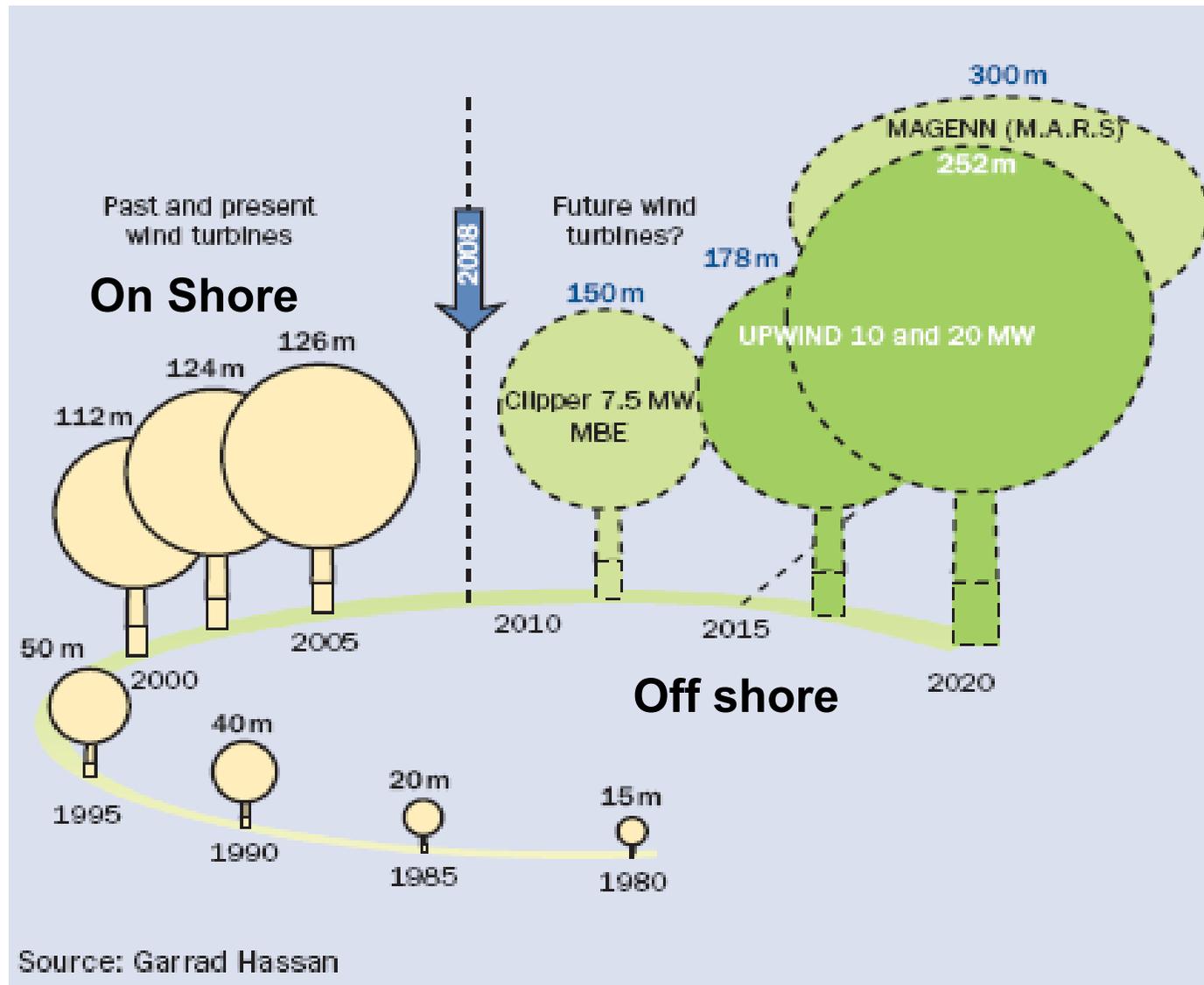
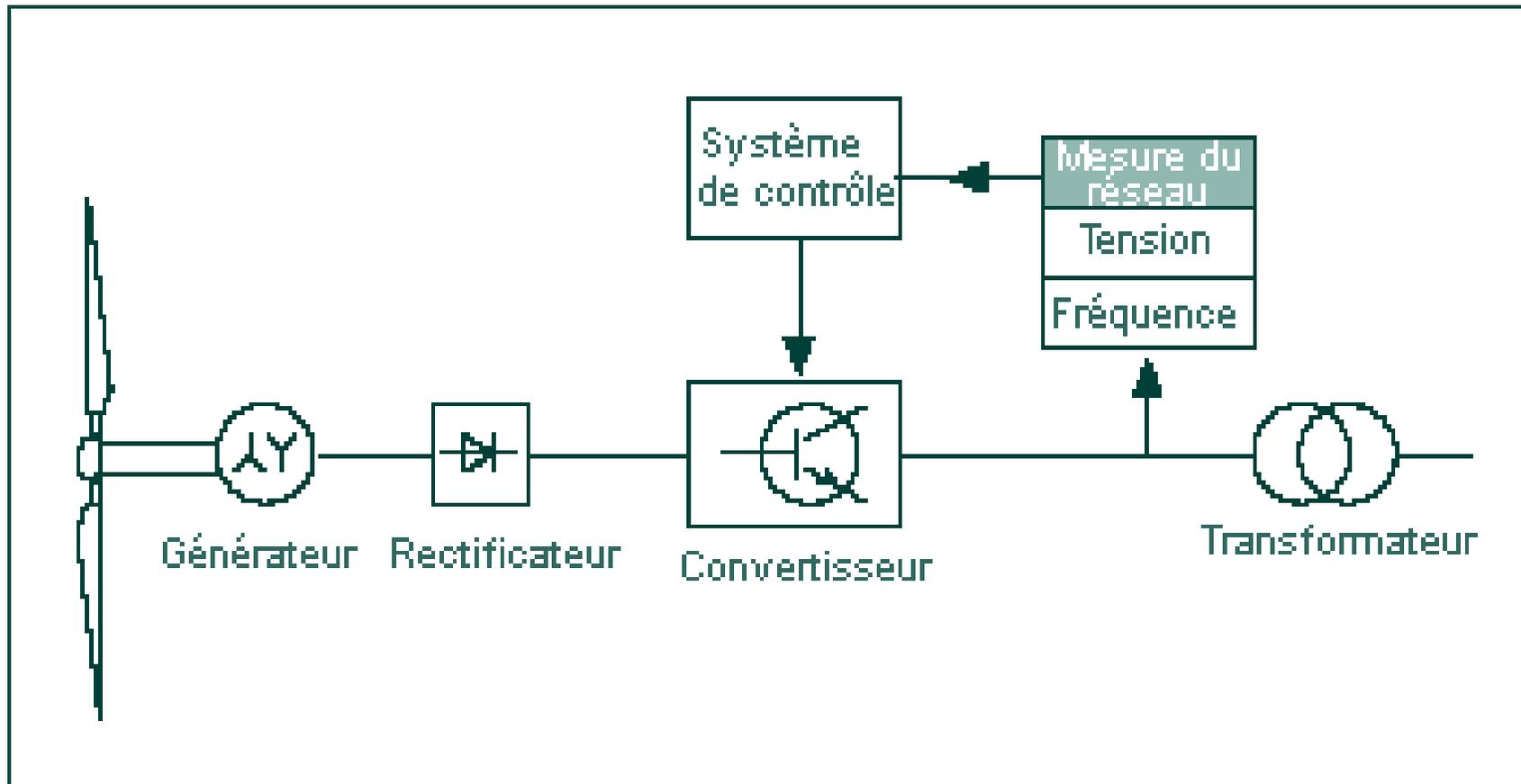


Schéma électrique général

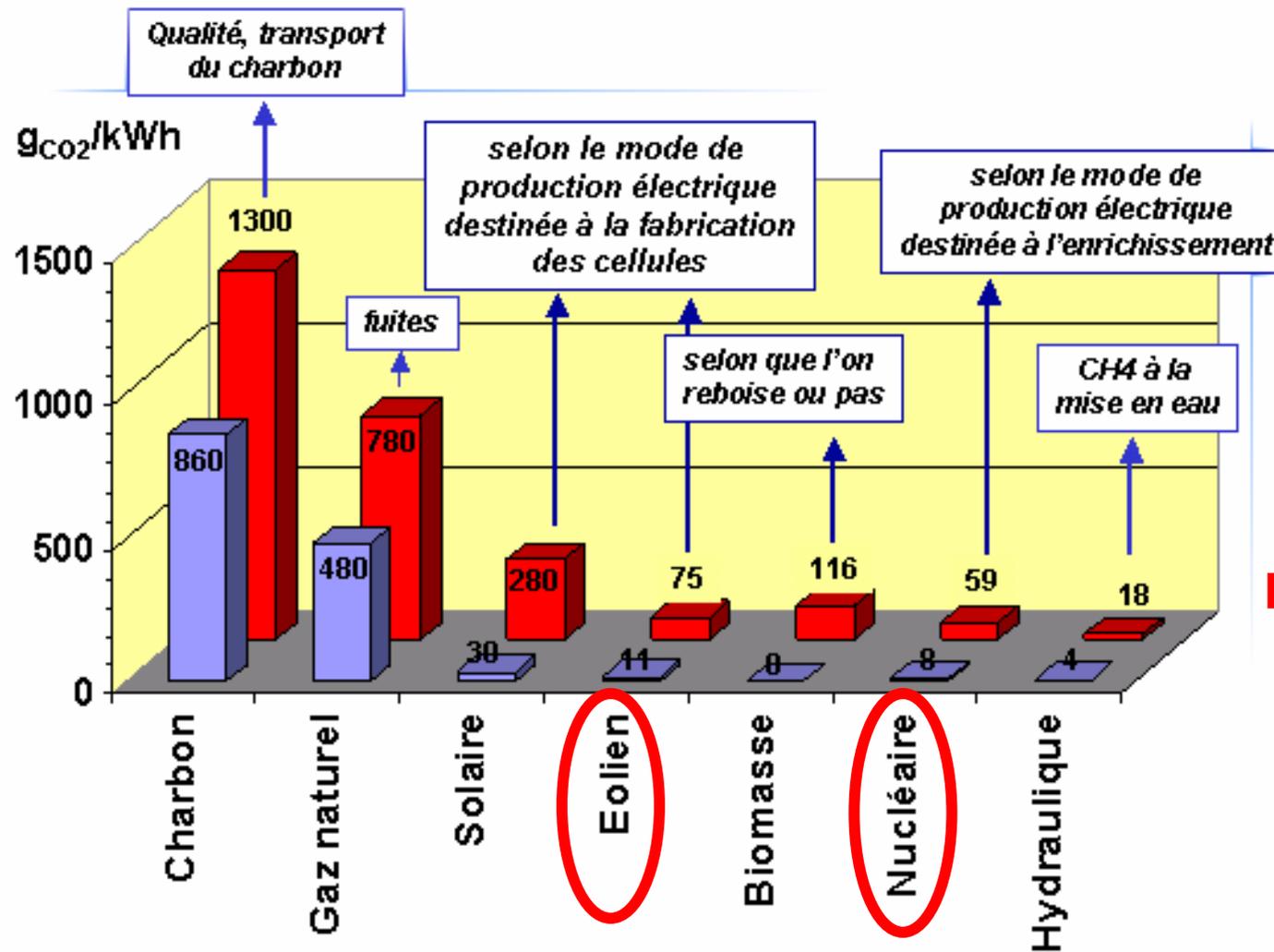


Electromécanique des machines: grande variété liée à la propriété industrielle

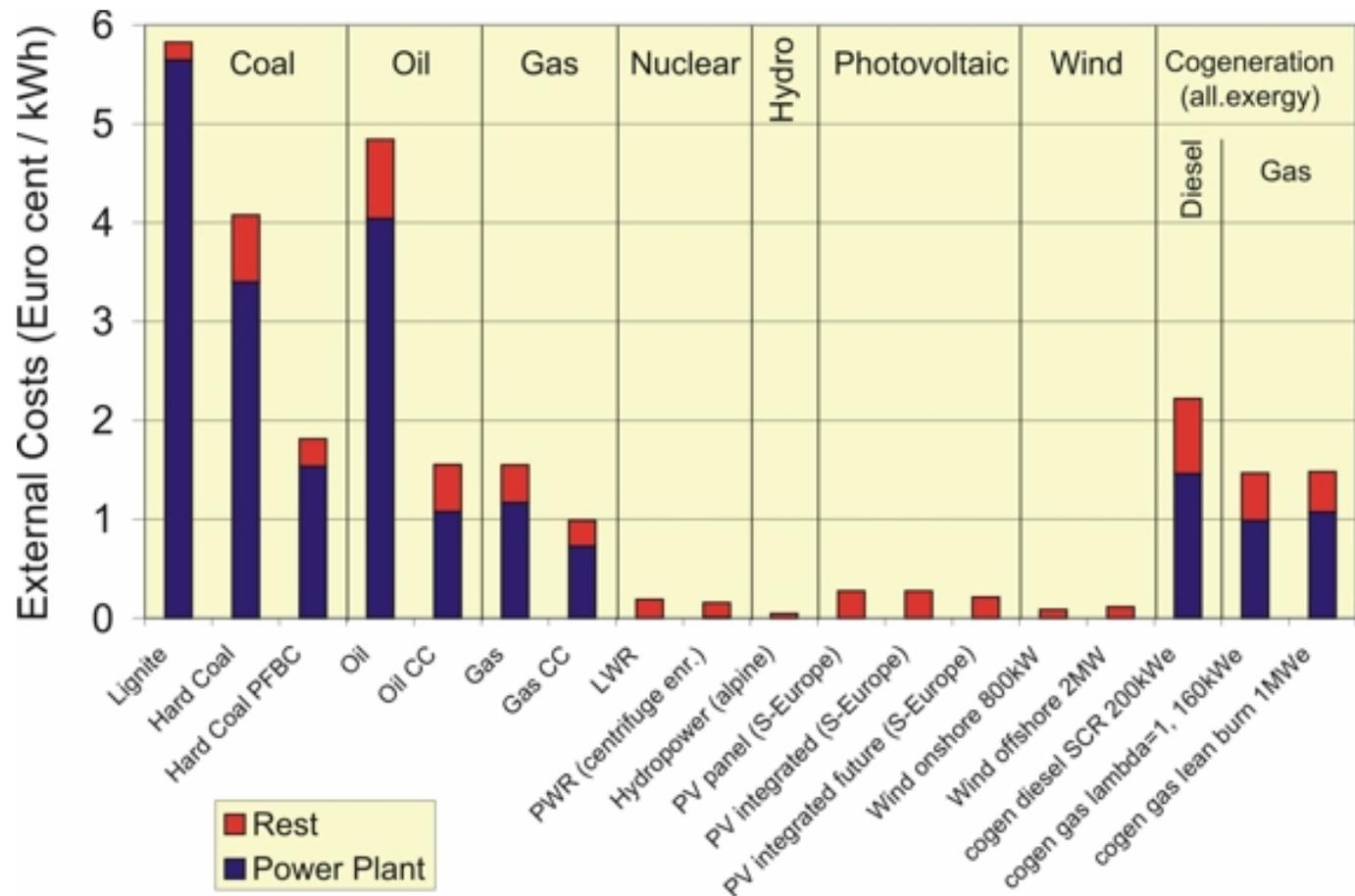
- **MULTIPLICATEUR DE VITESSE (10 à 1500 t/mn) QUI RELIE LE MOYEU DU ROTOR A UNE GENERATRICE ASYNCHRONE (Repower)**
- **GENERATEUR SYNCHRONE A ROTOR BOBINE ET CASCADE HYPOSYNCHRONE (redresseur et onduleur)**
- **GENERATEUR SYNCHRONE (grand diamètre et rotor bobiné) ASSOCIE A UN CONVERTISSEUR DE FREQUENCE**
- **GENERATRICES SYNCHRONES A AIMANTS PERMANENTS MULTIPOLAIRES (sans multiplicateur): elles réclament une génératrice de 10 m de diamètre (Enercon)**
- **CONCEPT INTERMEDIAIRE AVEC PLUS FAIBLE RAPPORT DE MULTIPLICATION (Multibrid), permet une réduction du poids**
→ **Vitesse variable pour améliorer le rendement**

EOLIEN ET CO² : construction et fonctionnement

Emissions globales de CO₂/kWh



**EOLIEN
et
NUCLEAIRE
sont
PERFORMANTS**



Paul Sherrer Institute

28 mai 2009

SLC - J.P. Pervès

25

QUELQUES IMAGES UNE REALITE INDUSTRIELLE

PUISSANCE : JUSQU'OU IRONT-ELLES ?

PAR CHARLOTTE RIGAUD

En vingt-cinq ans, la puissance des éoliennes a été multipliée par 100, le diamètre du rotor par 8. Aujourd'hui, la course continue avec l'offshore en ligne de mire. Chercheurs et industriels planchent désormais sur des machines de 10 MW et au-delà.

SIEMENS 3,5 MW

28 mai 2009





Ecosse 5 MW
900 tonnes

28 mai 2009

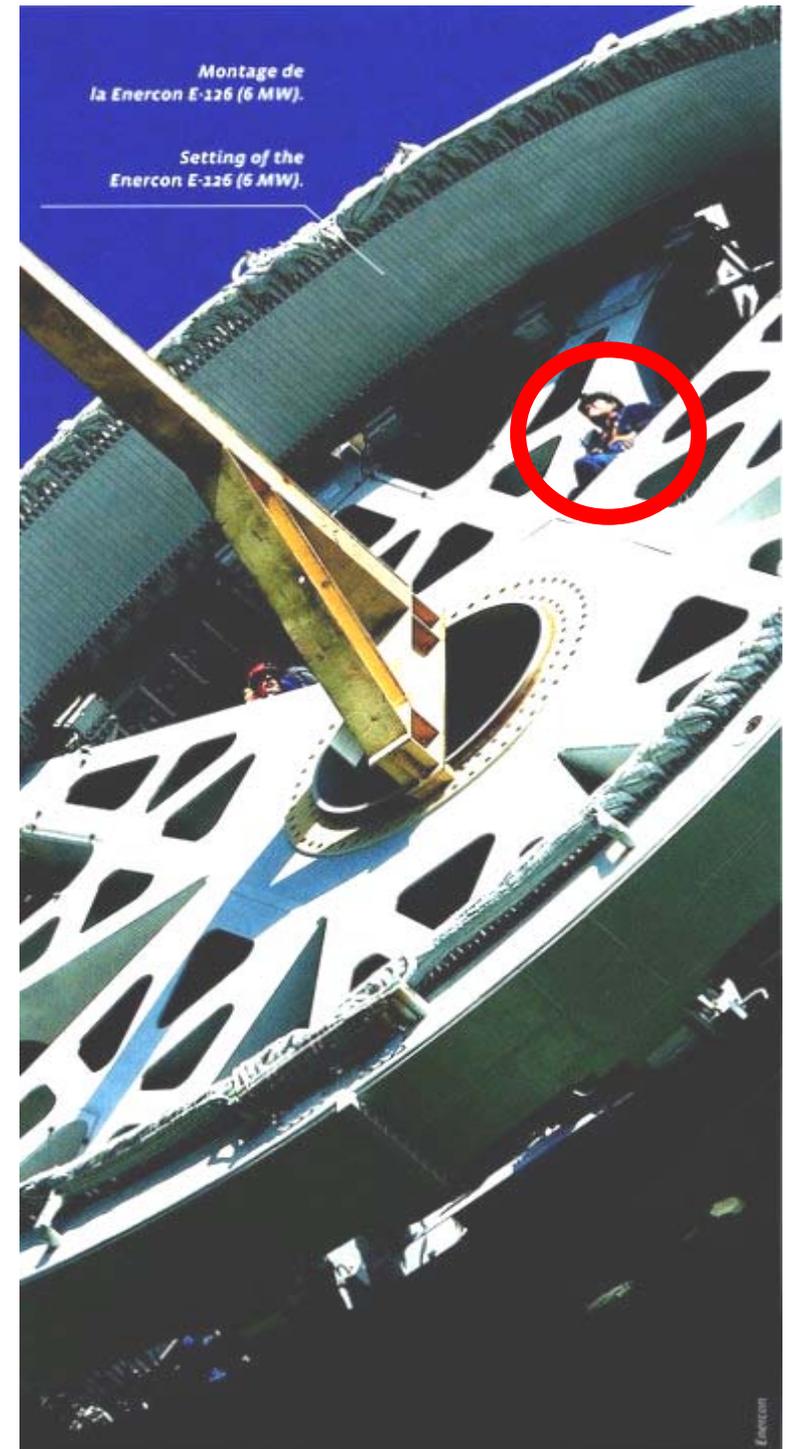
SLC - J.P. Pervès

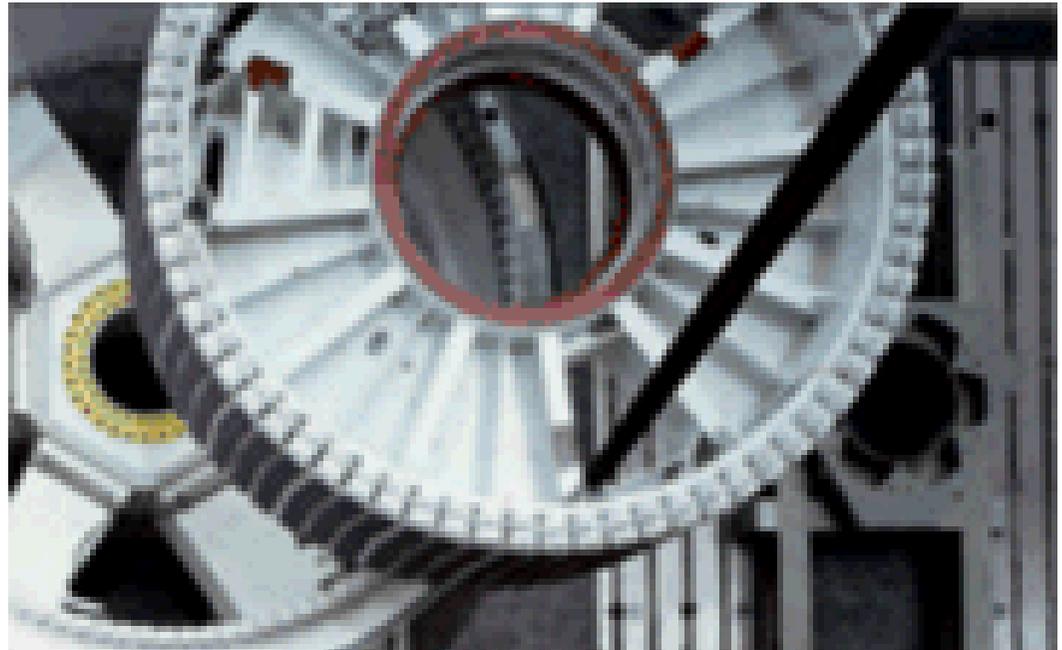
29

Génératrice synchrone ENERCON 6 MW

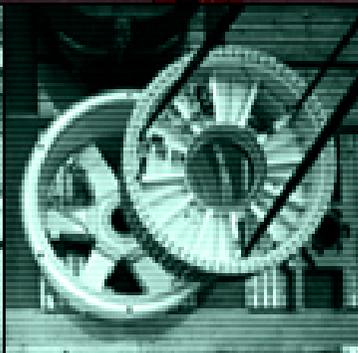
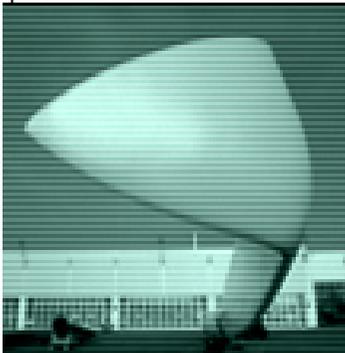
28 mai 2009

SLC - J.P. Pervès



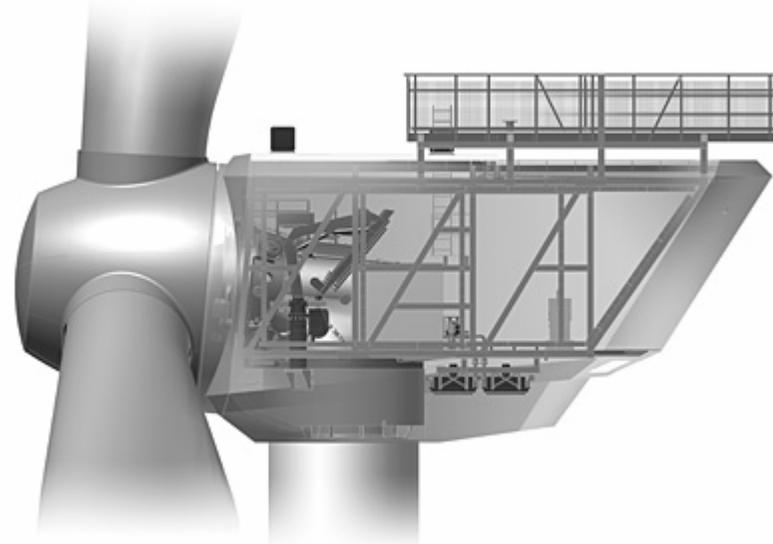


USINE ENERCON



MULTIBRID (filiale d'Areva): avril 2009

- **Wetfeet Offshore Windenergy**
- **80 éoliennes M5000 de 5 MW**
- **parc éolien offshore Global Tech I**
- **Mer du Nord, 90 km côtes allemandes**
- **400 MW**
- **700 millions d'euros: 1,5 G€/GW**
- **1,4 milliards de kWh: I = 2€/kWh/an**



**Engrenage d'entraînement
par le rotor**



**Roulement du rotor
multiplicateur**



**Générateur à
aimants permanent**

Parc offshore de 108 MW (Lillgrund, Suède, 2008)



Quelques chiffres

Taille moyenne des éoliennes terrestres installées

| Année | RFA | Esp. | France | UK |
|--------------|-------------|-------------|---------------|-------------|
| 1999 | 919 | 619 | 135 | 617 |
| 2000 | 1101 | 423 | 376 | 795 |
| 2001 | 1281 | 716 | 509 | 941 |
| 2002 | 1397 | 952 | 713 | 843 |
| 2003 | 1650 | 951 | 795 | 1773 |
| 2004 | 1696 | 1123 | 1162 | 1637 |
| 2005 | 1723 | 1342 | 1132 | 1732 |
| 2006 | 1849 | 1375 | 1689 | 2103 |
| 2007 | 1888 | 1562 | 1752 | 2017 |
| 2008 | 1923 | 1775 | 1907 | 2124 |

**→ Tendance vers des éoliennes de 3MW on shore
et 5 MW off shore**

Source: EurObserv'Er 2009

Développement des éoliennes offshore (MW 2008)

| | En service | En chantier | En projet | Total |
|-----------------|-------------------|--------------------|------------------|--------------|
| RFA | 12 | 732 | 10183 | 10927 |
| UK | 566 | 1424 | 6773 | 8763 |
| France | | | 3345 | 3345 |
| Suède | 133 | 30 | 3149 | 3312 |
| Pays-Bas | 247 | | 2587 | 2834 |
| Espagne | | | 1976 | 1976 |
| Irlande | 25 | | 1578 | 1603 |
| Norvège | 3 | | 1550 | 1553 |
| Belgique | 30 | | 1416 | 1446 |
| Danemark | 426 | 449 | 418 | 1293 |
| Finlande | 24 | | 1306 | 1330 |
| Italie | | | 827 | 827 |
| total | 1466 | 2635 | 35108 | 39209 |



REpower Installs World's Largest Wind Turbine in Brunsbüttel, Schleswig-Holstein

**P = 5 MW
Offshore**

**Nacelle (à 120 m)
LxHxl: =18x6x6
Poids= 290 t**

**Hélice
D=126 m
Poids=120 t
S = 12500 m²**

**Mât
H=114m D=6m
Poids=750t**

**Total 1160 t
+ fondations**

28 mai 2009

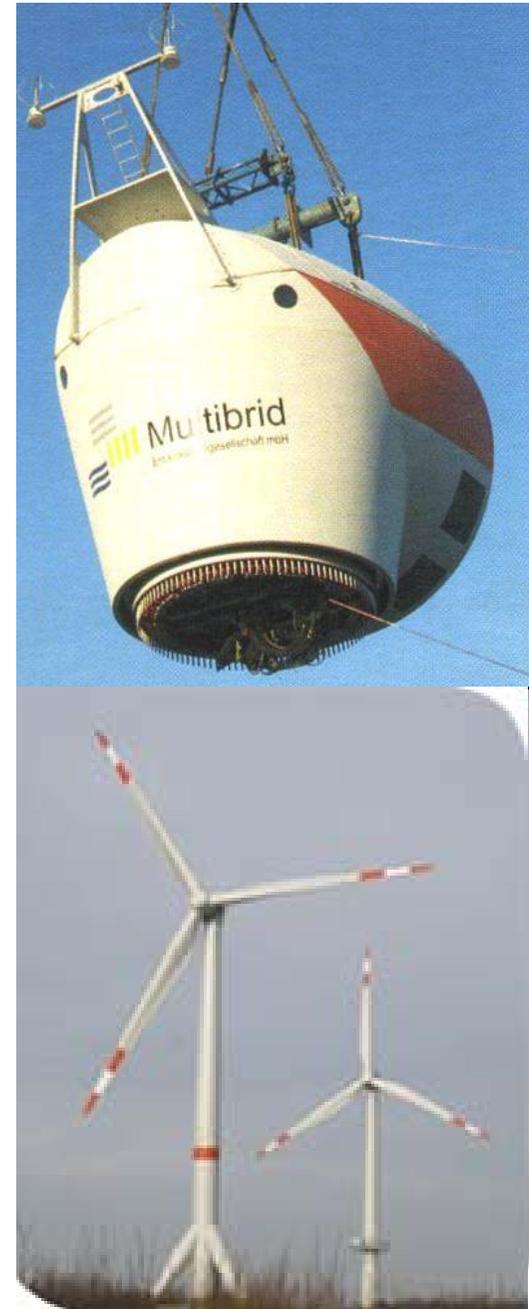
| Technical Data – REpower 5M | |
|--|--|
| Nominal power | 5 megawatts |
| Energy yield / year at the prototype site in Brunsbüttel | Approx. 17 gigawatt-hours. Equivalent to the annual consumption of approx. 4,500 three-person households |
| Rotor diameter | 126 m |
| Rotor blade length | 61.5 m |
| Nacelle specifications | |
| Structure | Modular structure of the nacelle: <ul style="list-style-type: none"> - modular drive train with two bearing supports for the rotor shaft - combined planetary/spur wheel gear system - doubly-fed asynchronous generator |
| Dimensions | Length: 18 m Width 6 m Height 6 m |
| Weight | Motor (total): approx. 290 t (incl. offshore features; excl. transformer) |
| Technical Data – Rotor | |
| Type | Three blade rotor with electrical blade angle adjustment |
| Dimensions | Rotor blade length: 61.5 meters Rotor diameter: 126 m Rotating rotor area: 12,469 m² |
| Weights | Overall weight: approx. 120 t Weight of rotor blade: 18 t |
| Tower specifications | |
| Structure | Tubular steel tower with 5 segments |
| Diameter | Top: 5.5 m Bottom: 6 m |
| Weight (total) | 750 t |
| Tubular steel tower length | 114 m |
| Hub height | 120 m |

MULTIBRID 5 MW (Areva) Off shore

- **Diamètre rotor: 116 m**
- **Hauteur mât: 100m**
- **Poids rotor/nacelle: 310t**
- **Technologie: hybride**
- **Réglage indépendant pales**
- **Roulement à 2 rangées
rouleaux conique**
- **multiplicateur à engrenages
planétaires**
- **générateur synchrone à
aimants permanents**
- **Confinement intégral**

28 mai 2009

SLC - J.P. Pervès



37

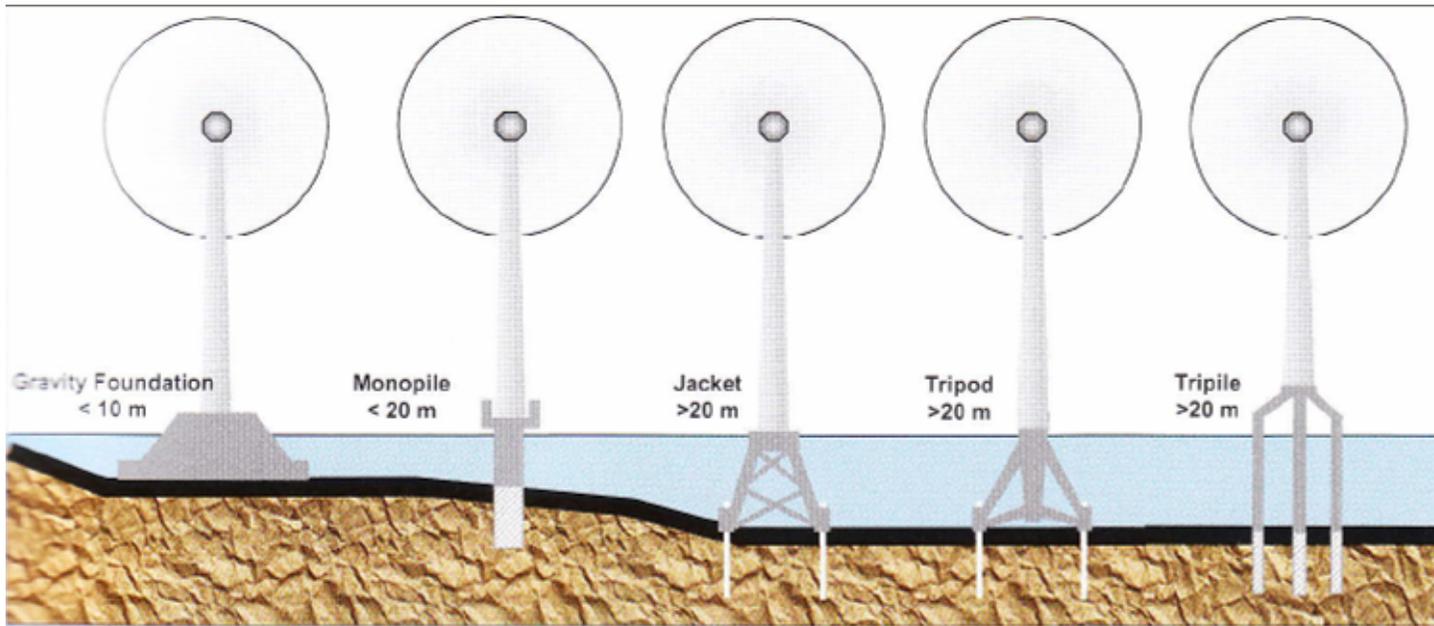


Fig. 12: Different offshore foundation solutions according to the water depth

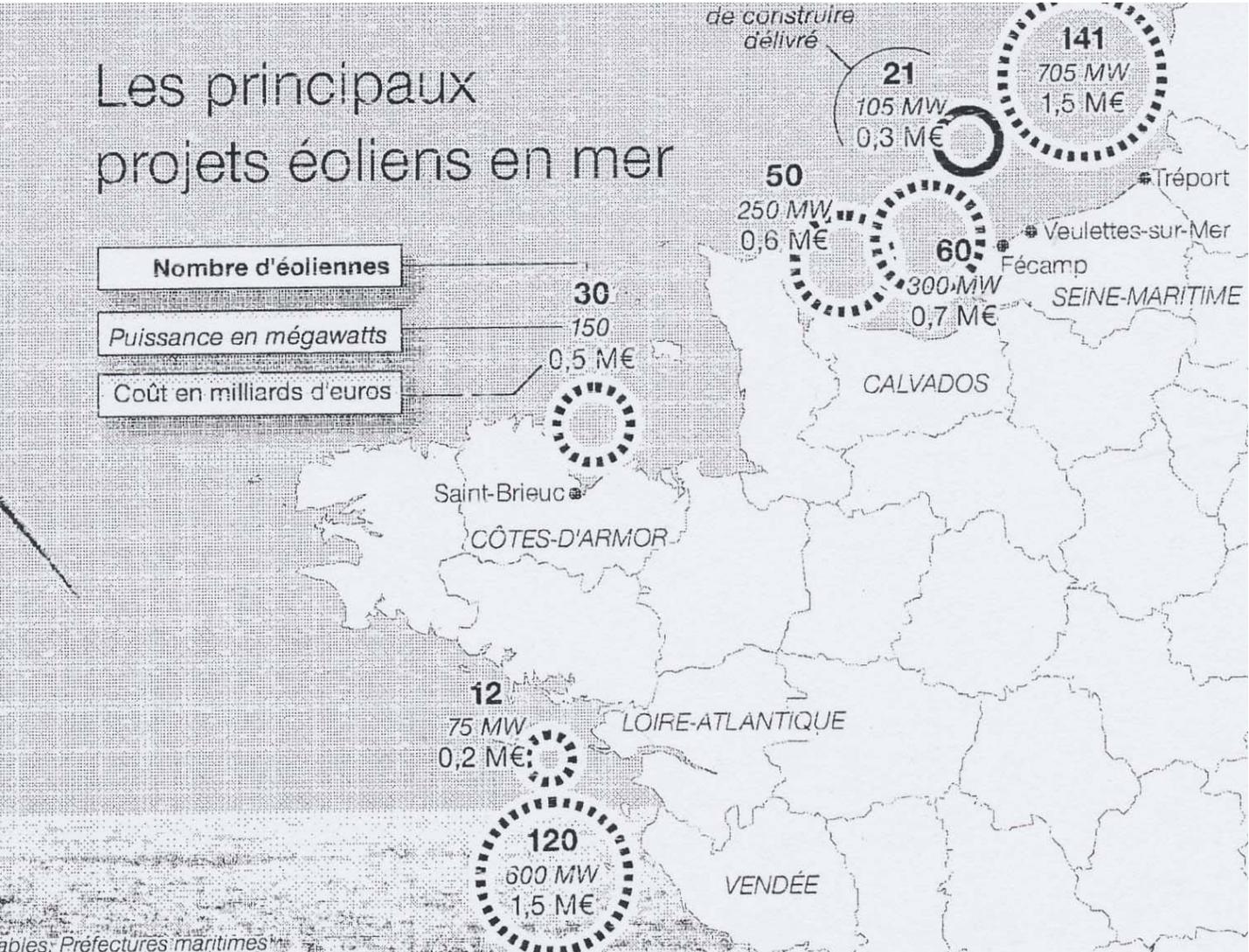


Fig. 13: Four different offshore foundation designs for wind turbines of the multi-megawatt size

La course au gigantisme des parcs off shore

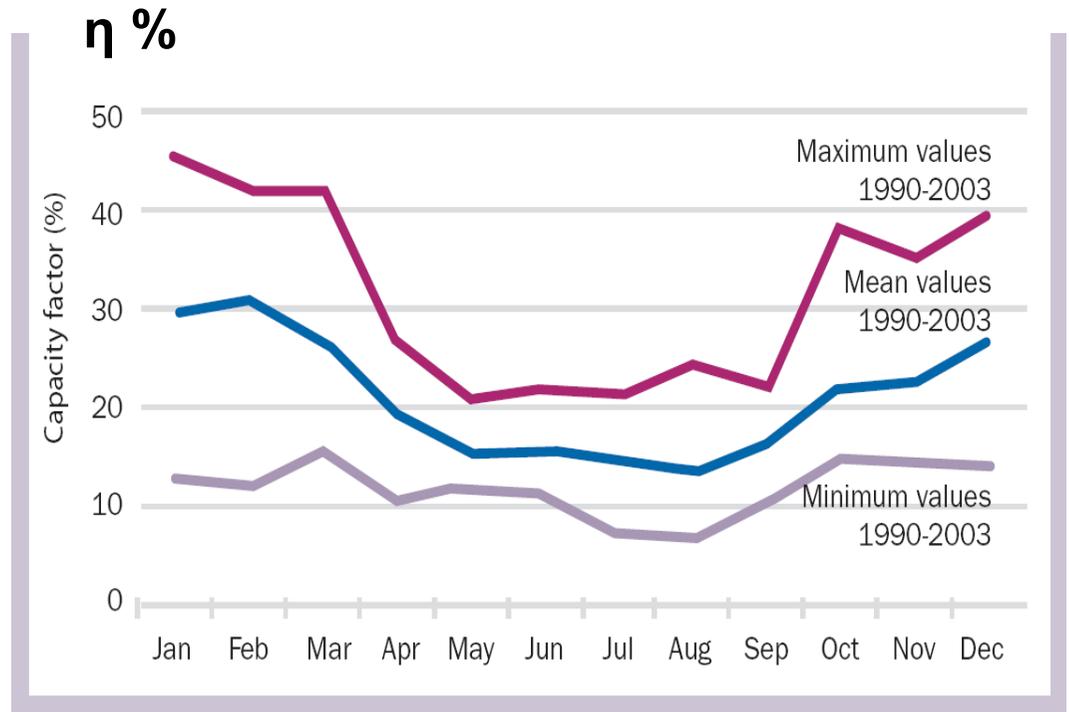
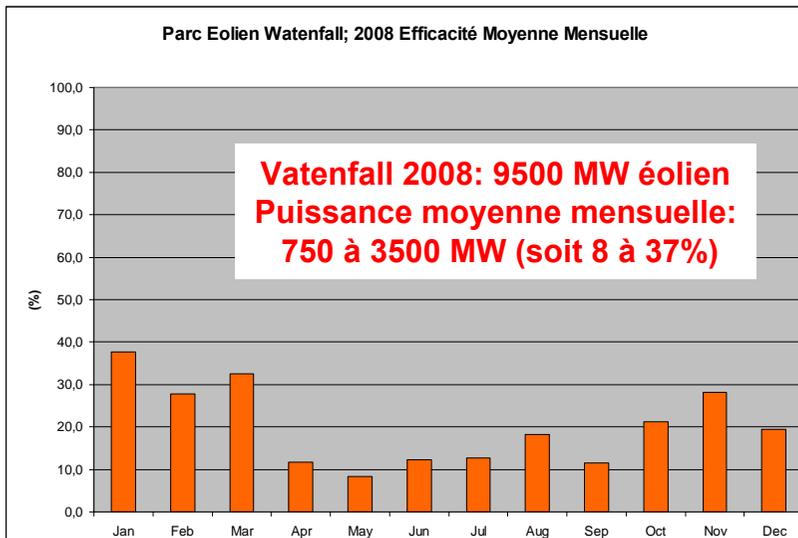
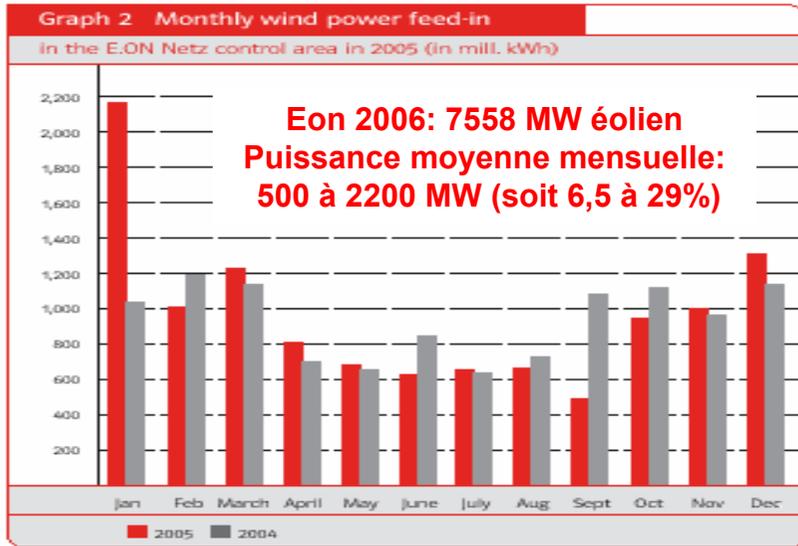
- **Suède:** **1100 éoliennes, 3.000 MW**
- **Innogee Nordsee All.:** **250 éoliennes, 1000 MW**
- **E.ON et London Array: 2** **71 éoliennes, 1000 MW**
- **ENEL et Gamesa:** **1700 MW**
- **Kent offshore:** **100 éoliennes, 300 MW**
- **YEU - NOIRMOUTIER:** **120 éoliennes, 600 MW**

Les projets off shore français



LE FONCTIONNEMENT DES EOLIENNES

Production éolienne mensuelle distribuée (Allemagne)

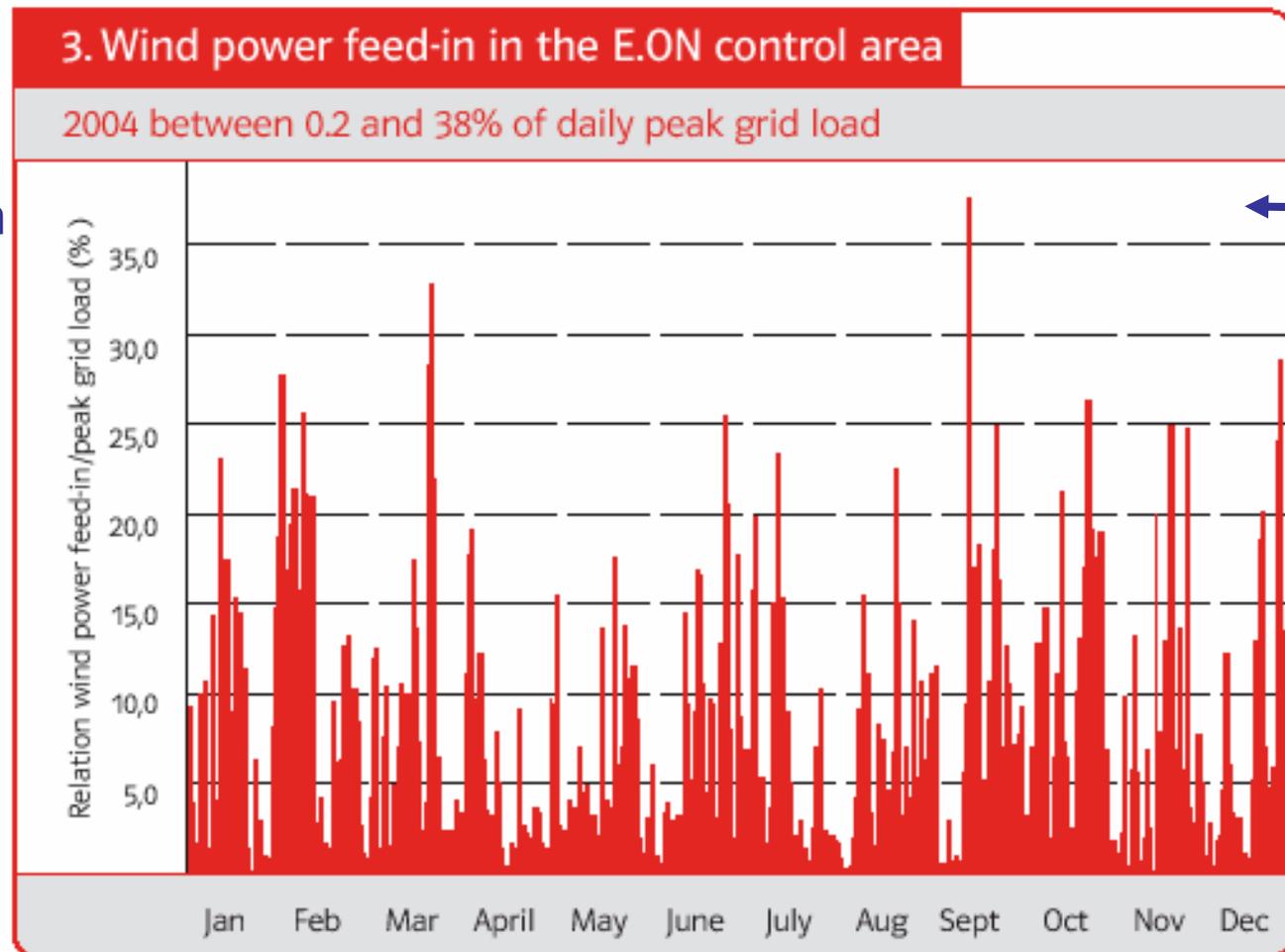


**Une grande variabilité
annuelle et mensuelle
(EWEA)**

Intermittence: l'exemple E-ON

Contribution sur un an d'un parc éolien de 7558 MW

Contribution
Éolien en %

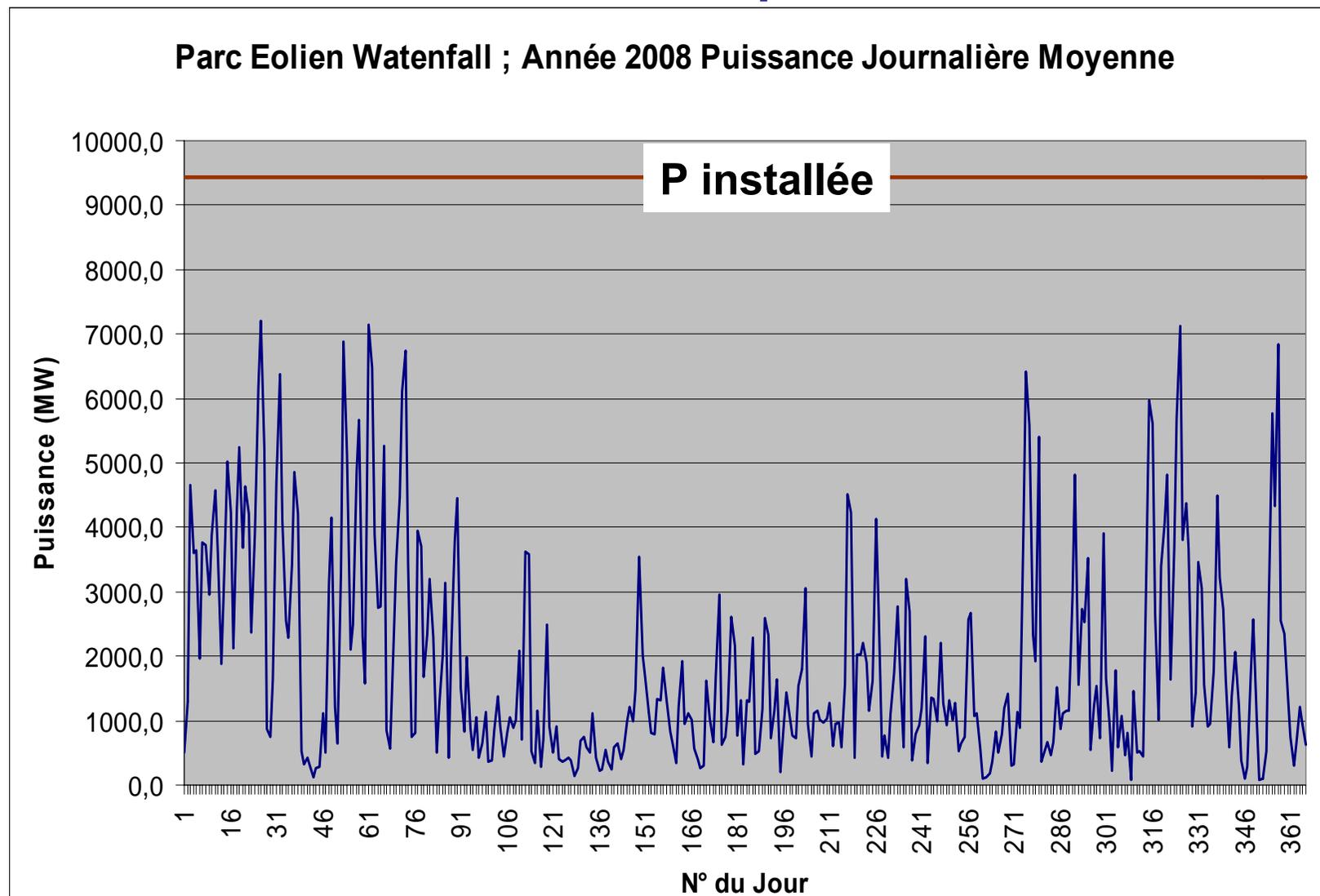


Puissance installée: 33.200MW dont éolien 7.558 MW (23%)

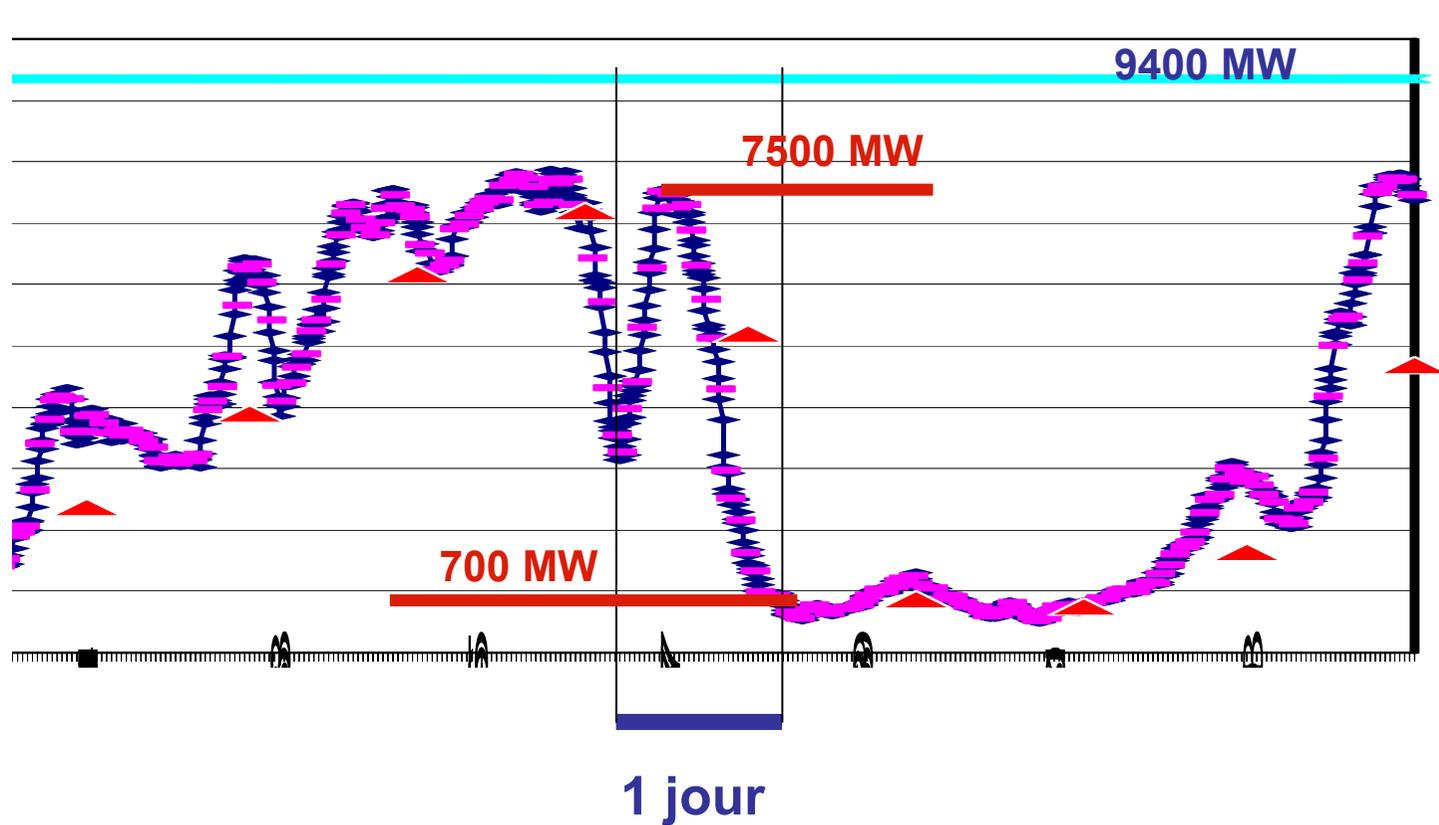
Production: 271.300 MWh dont éolien 11.300 MWh (4,16%)

Intermittence: l'exemple Vatenfall

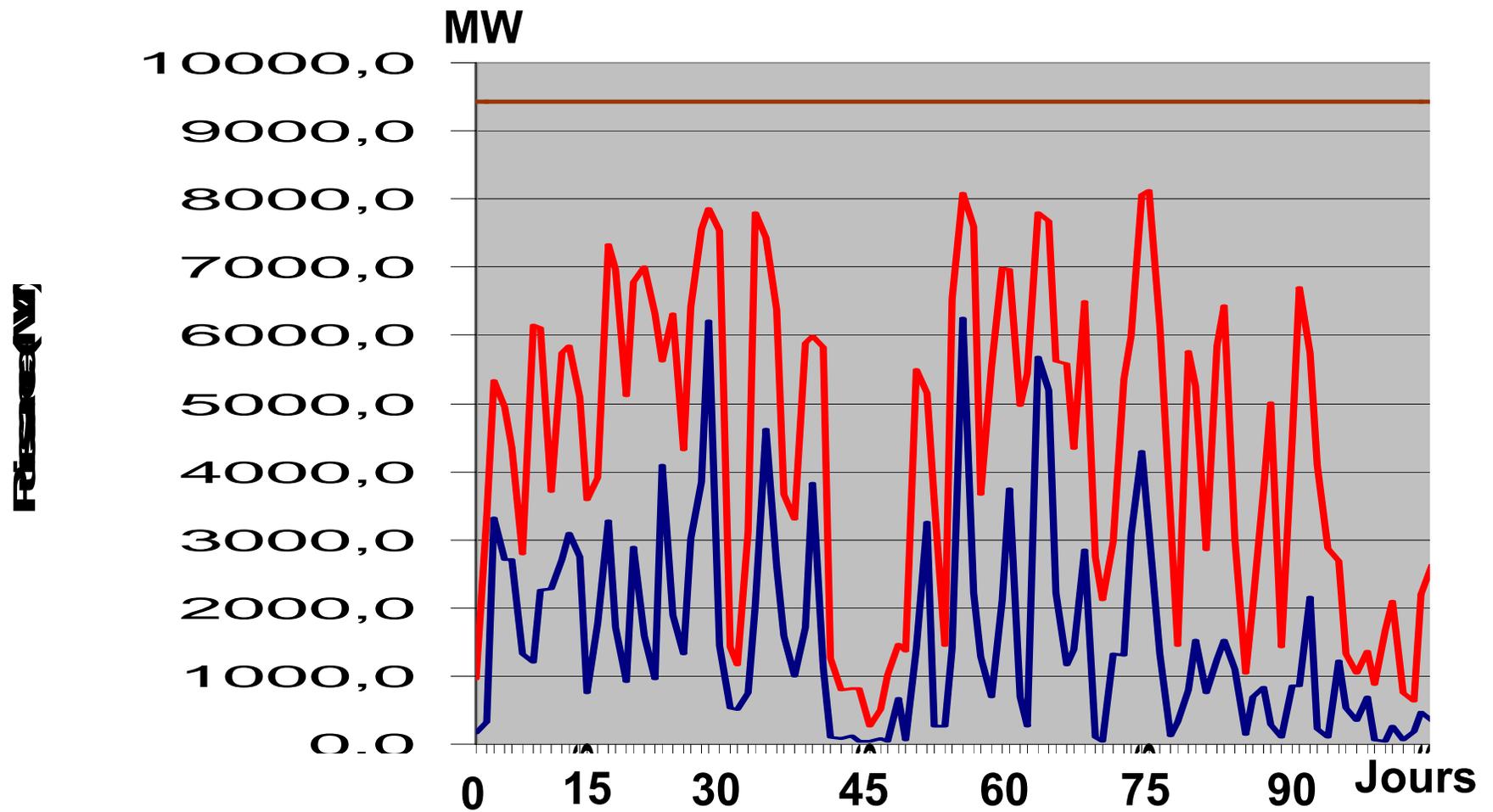
Contribution sur un an d'un parc éolien de 9400 MW



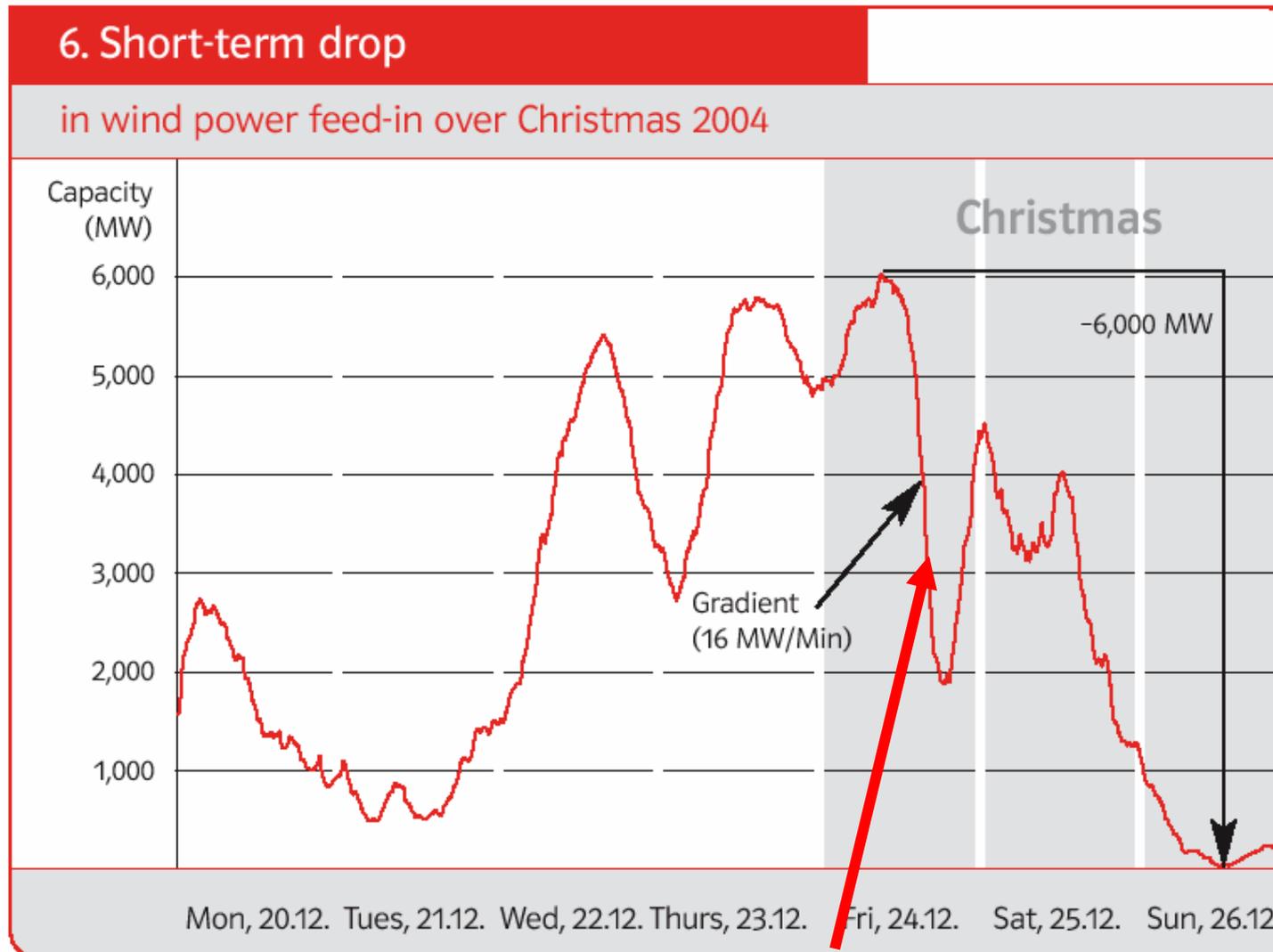
Variabilité quotidienne/quart d'heure Vattenfall



Vatenfall: extrema de puissance journalière

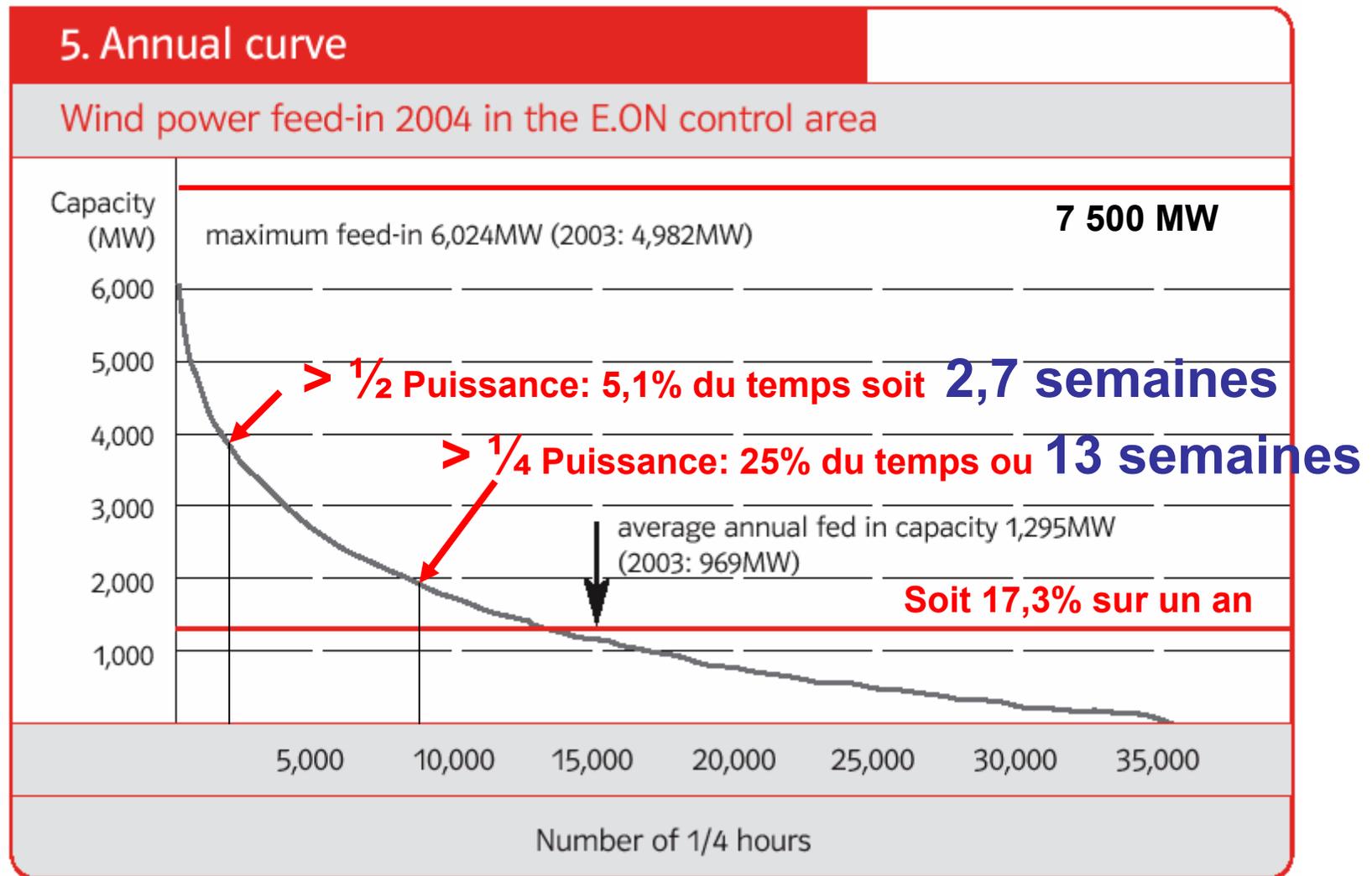


Puissance éolienne hebdomadaire délivrée: détail



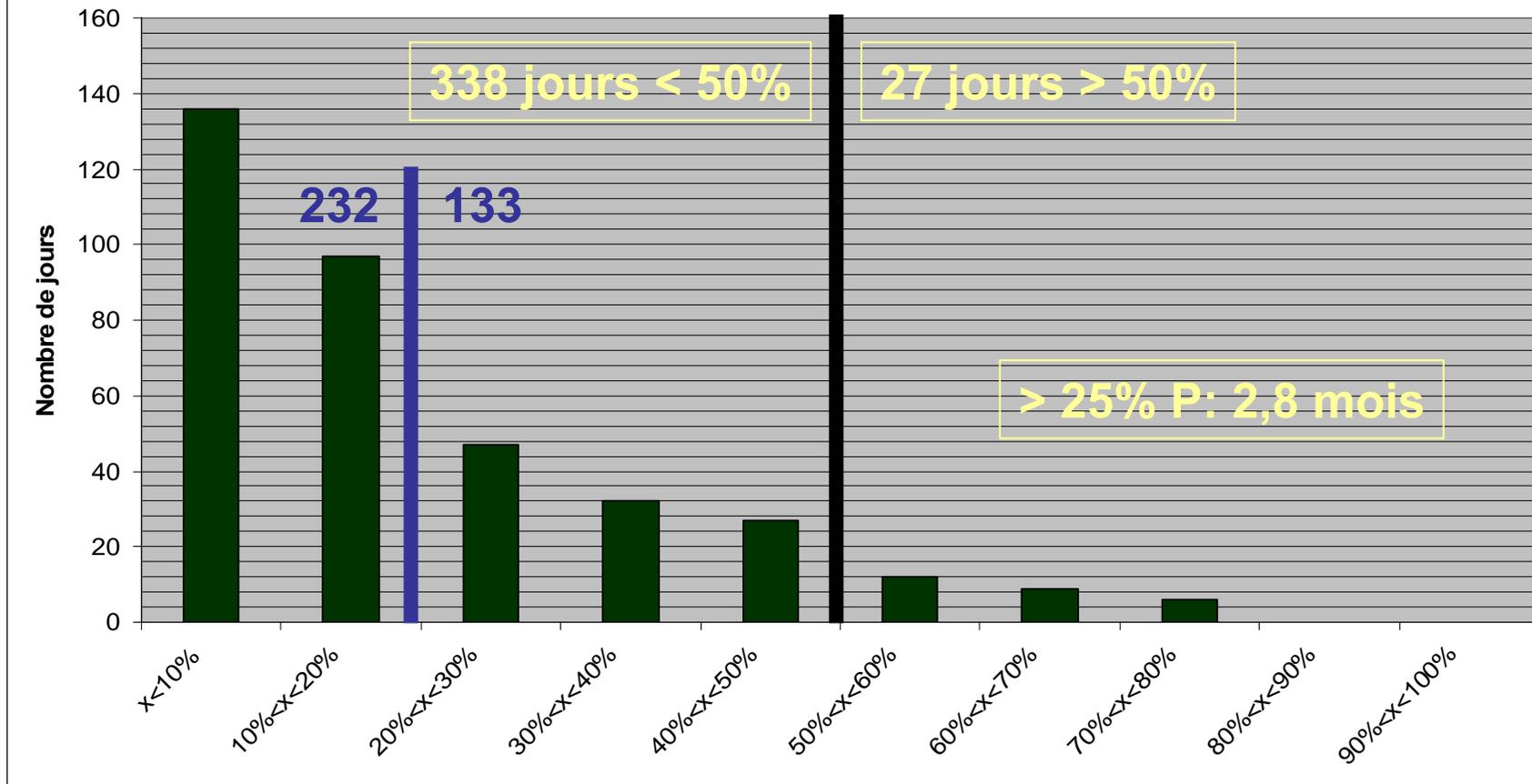
Pente: 1000 MW par heure

Le rendement d'un grand parc de 7500 MW avec 6000 éoliennes en Allemagne (2004: année défavorable)



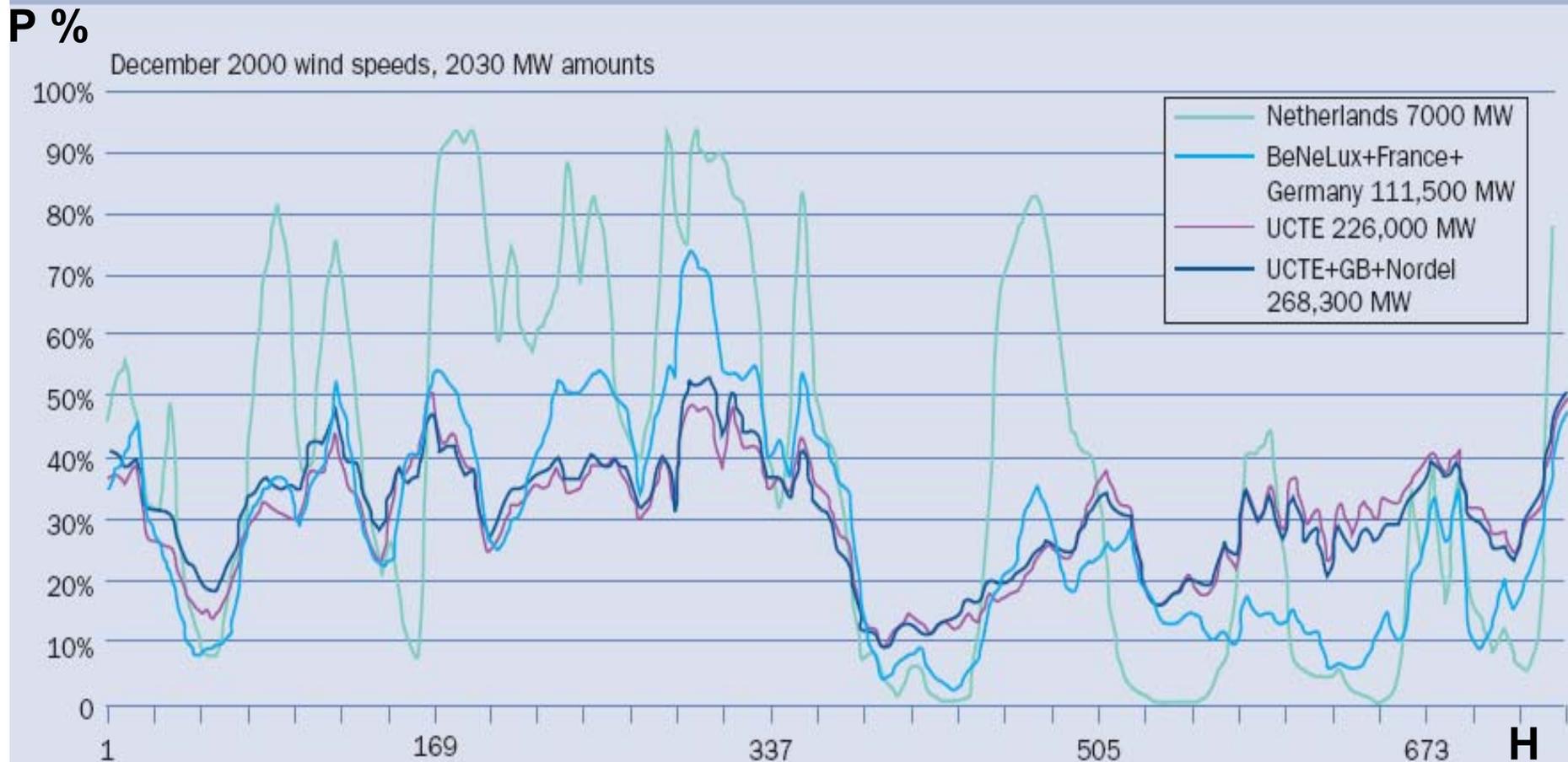
Heures équivalent pleine puissance: 1512 h (France 23% soit 2014 h)

Parc Eolien Waterfall; Année 2008 Distribution des Efficacités Journalières



Le lissage apporté par la dispersion géographique et ses limites

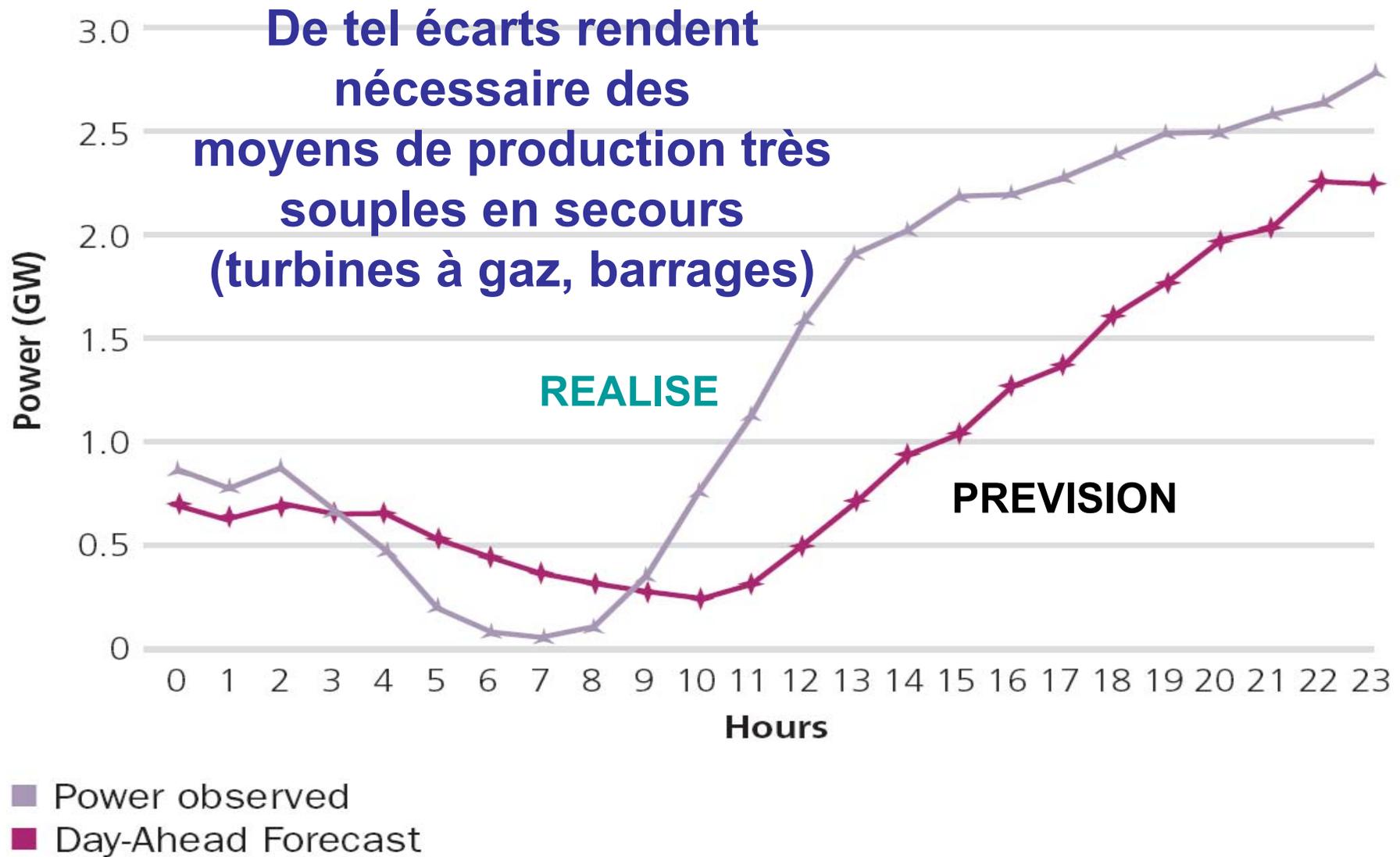
Figure S.5: Example of smoothing effect by geographical dispersion



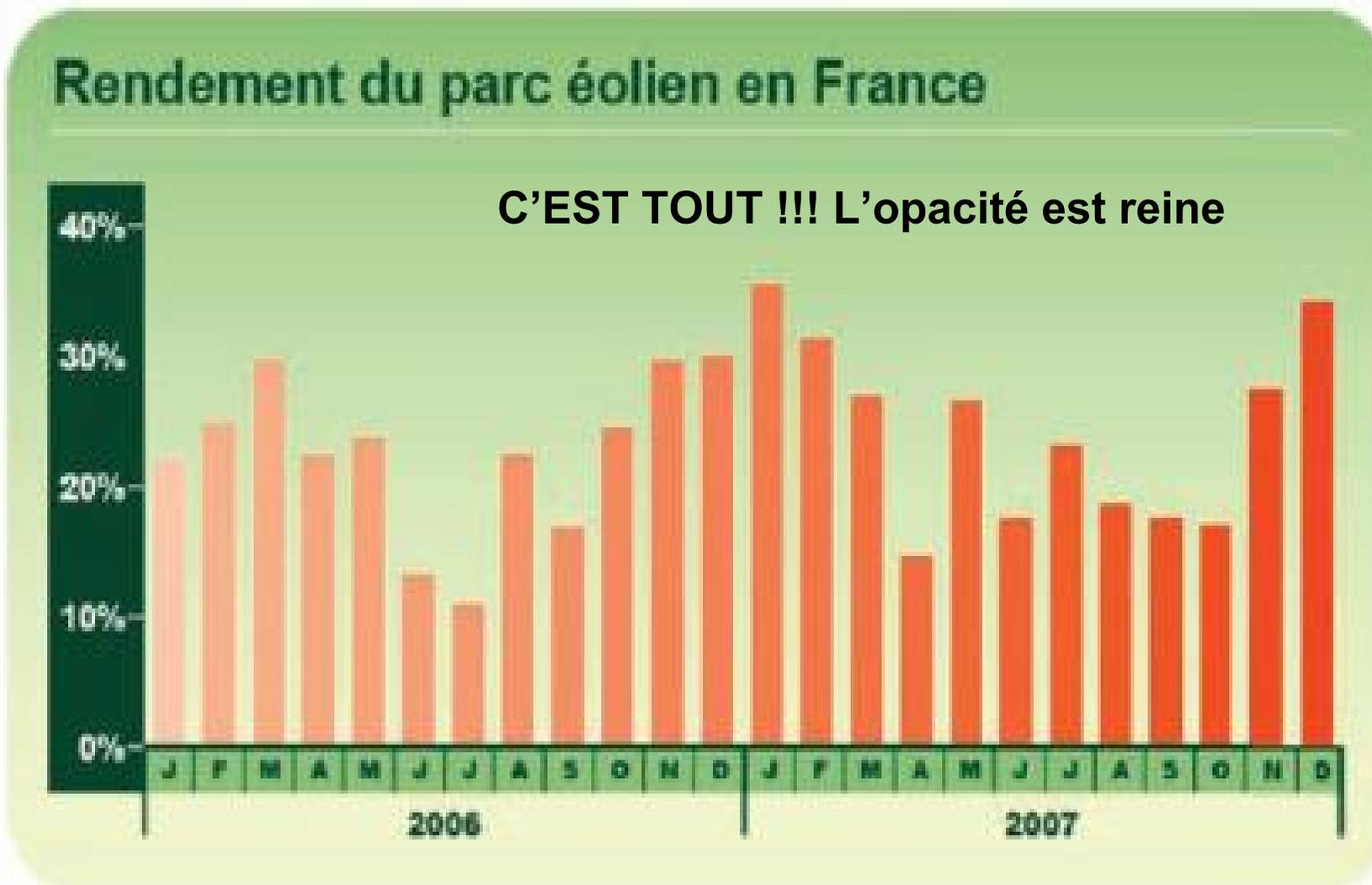
Note: The figure compares the hourly output of wind power capacity in four situations, calculated with simulated wind power. The simulations are based on December 2000 wind speeds and wind power capacity estimated for 2030.

Source: www.trade-wind.eu

Figure 14: Time shift as a typical meteorological forecast error



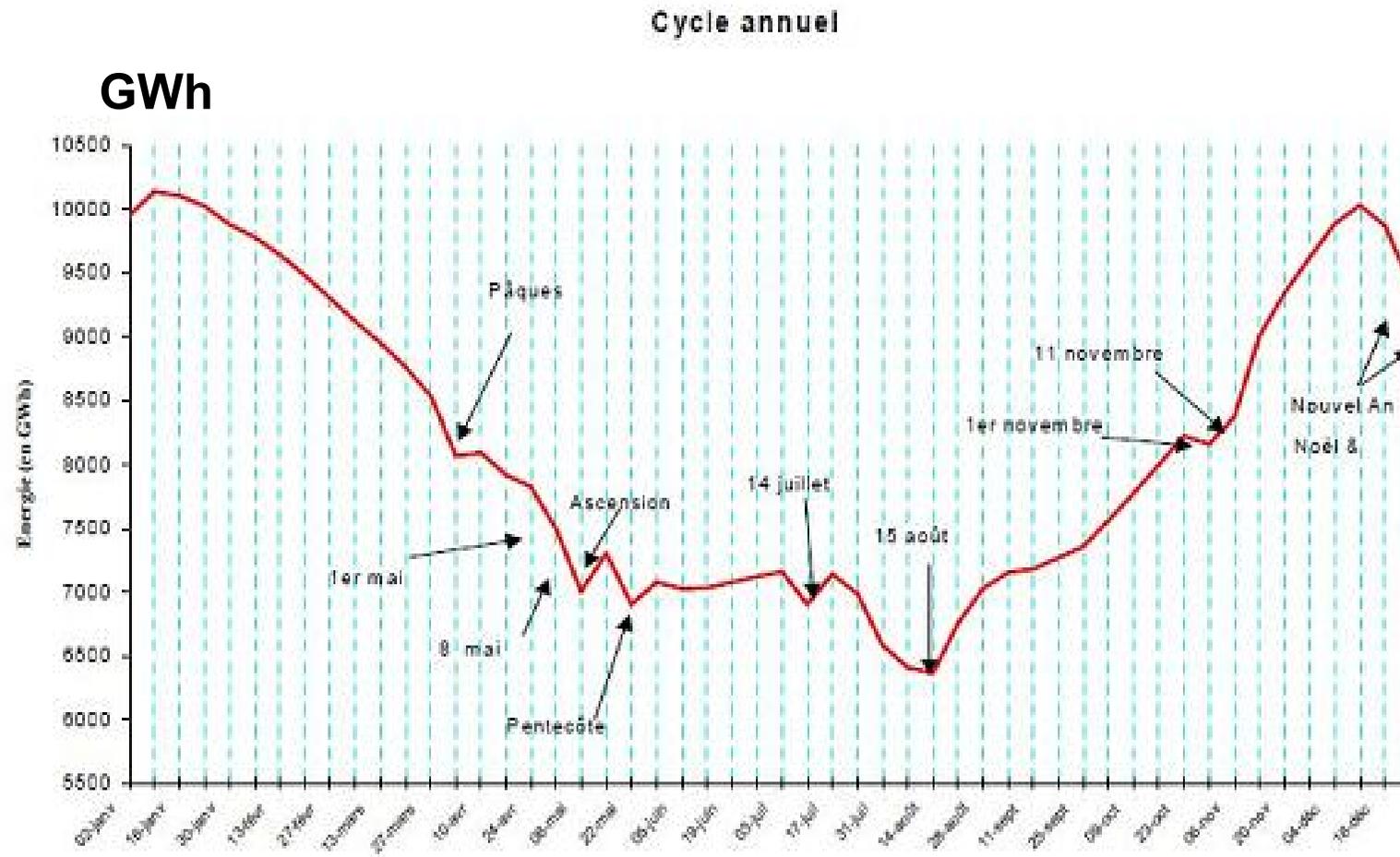
Que sait-on de la variabilité du parc français?



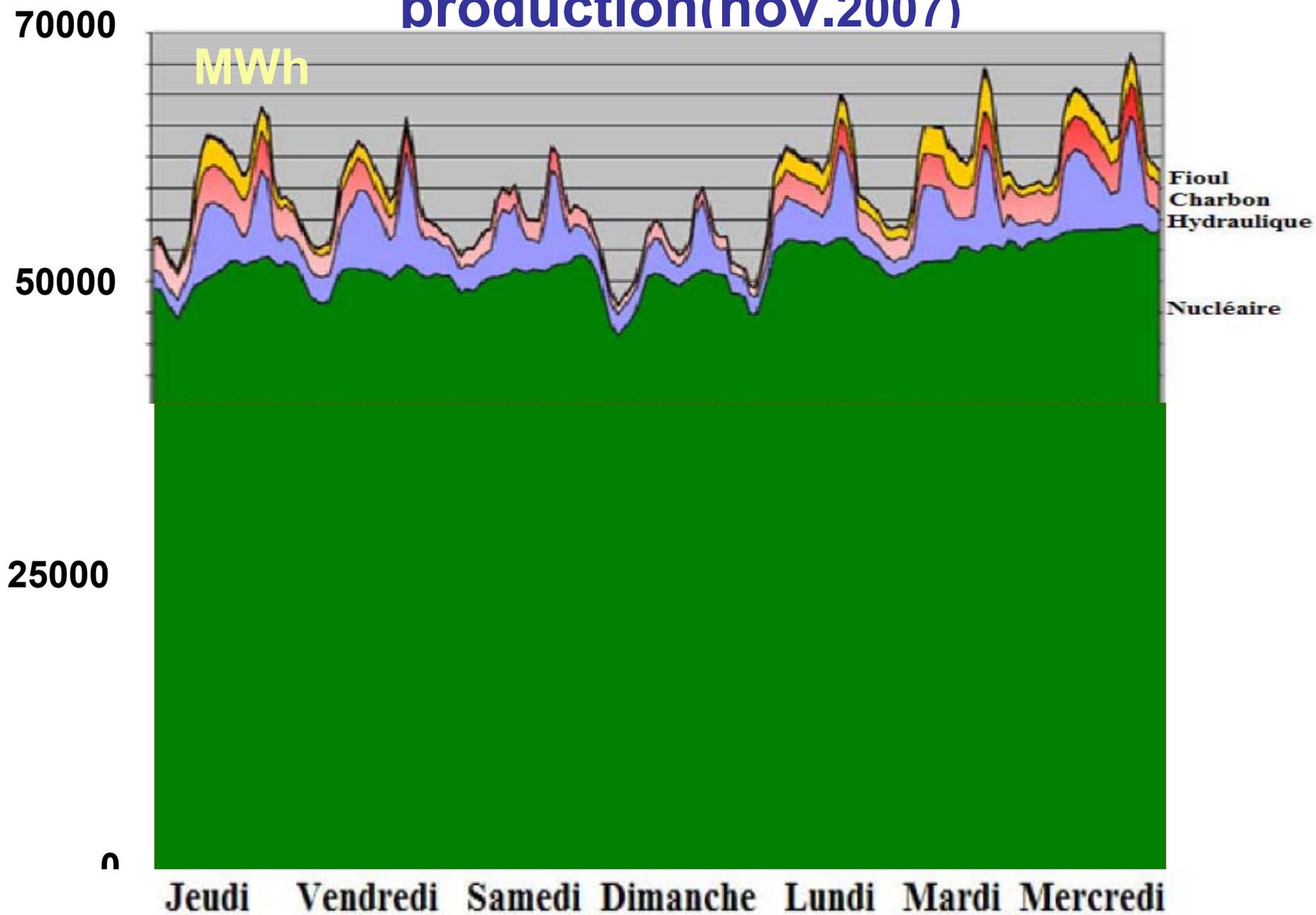
Depuis 2006 l'ADEME indique que son site est en cours de refonte

Courbe de production annuelle globale d'électricité en France

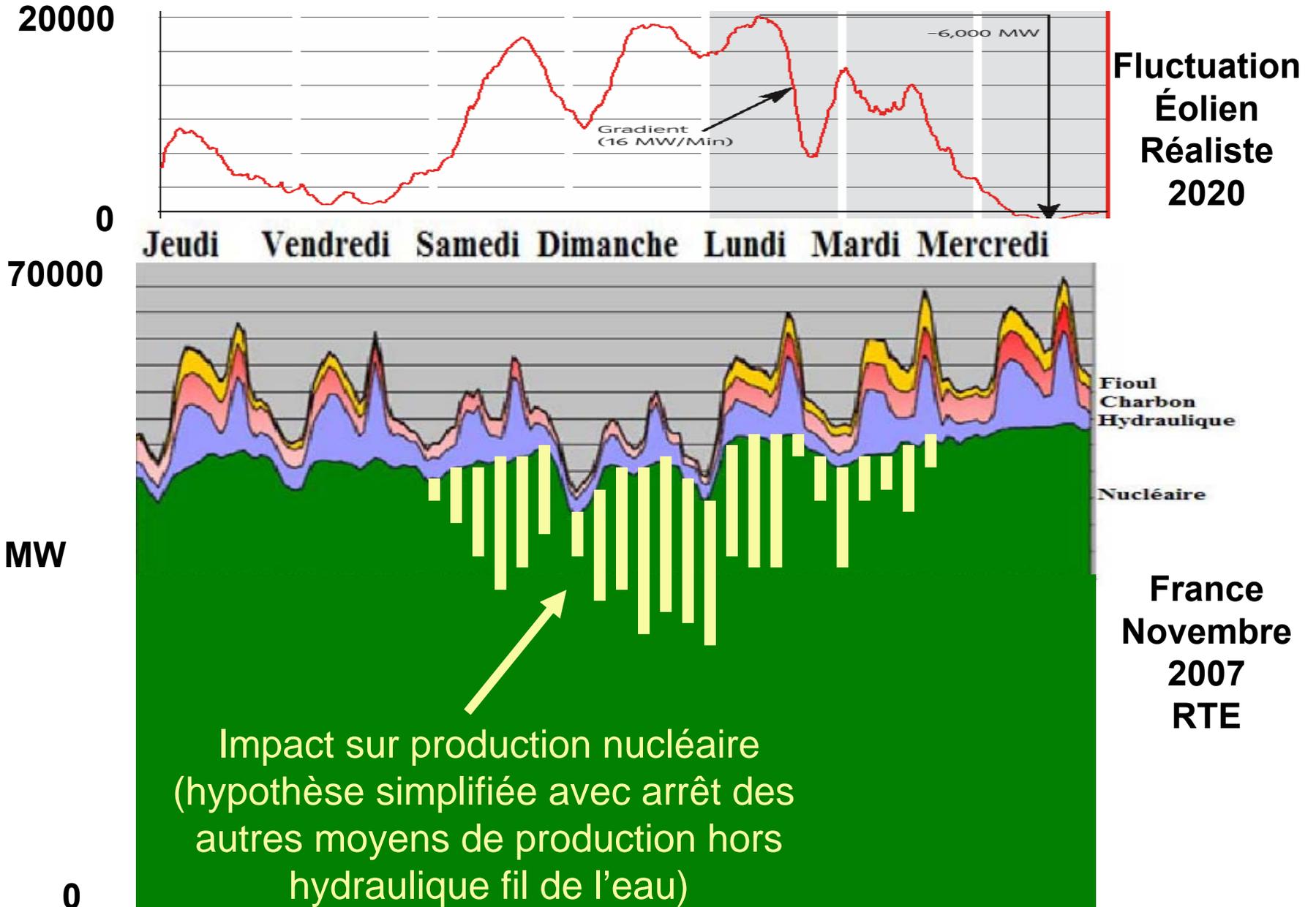
(Moyennes hebdomadaires)



France: appel hebdomadaire des moyens de production (nov.2007)



IMPACT DE 25000 MW EOLIEN SUR LA PRODUCTION (France isolée)



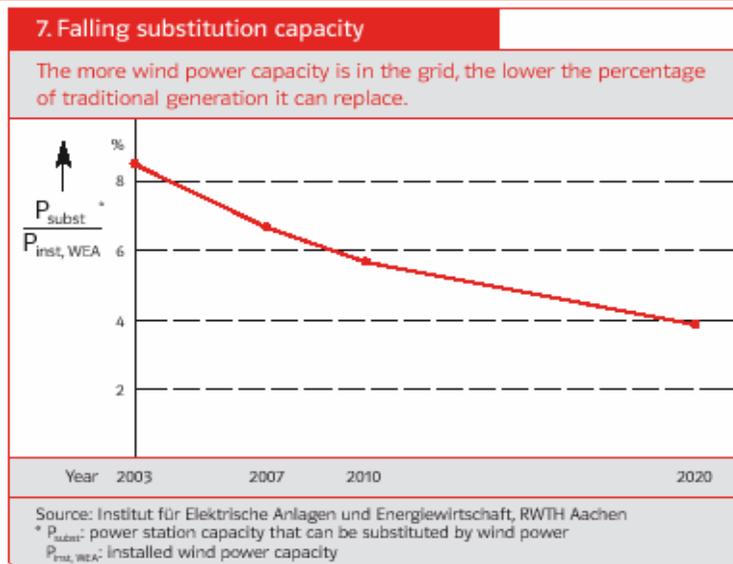
Qu'en déduire pour la France

- RTE estime que 80% de la production éolienne est garantie et substitue alors à la base, le nucléaire (prévision et foisonnement):
- L'amplitude de fluctuation des éoliennes (+ du solaire) va largement dépasser l'amplitude des fluctuations horaires et journalières en 2020: elle est déjà du même ordre de grandeur en 2009
- Baisser la production nucléaire (12 €/MWh marginal) pour laisser la place à l'éolien (acheté 83 €/MWh) est contre économique
- On réduit la production d'un investissement lourd par un autre sans gain sur les émissions de CO₂.
- Pratiquement on freine en France les investissements sur le nucléaire pour construire des centrales à gaz de secours et en conséquence augmenter les rejets de CO₂

La question ne se pose pas dans les mêmes termes dans des pays qui produisent majoritairement l'électricité à partir du gaz ou du charbon

Eoliennes et garanties de fourniture: E-ON

« Pour pouvoir garantir une fourniture fiable d'électricité lorsque les fermes éoliennes produisent peu ou pas de courant, c'est-à-dire durant les périodes de calme ou de tempête, les capacités des centrales conventionnelles doivent être disponibles en réserve. Ceci signifie que les fermes éoliennes ne peuvent remplacer que peu de puissance conventionnelle. »



E.ON en conclut : « En termes clairs, ceci signifie qu'en 2020, avec une prévision de puissance éolienne supérieure à 48000 MW (source DENA grid study), seuls 2000 MW de puissance traditionnelle peuvent être remplacés par des fermes éoliennes (p9)

Source: E-ON Wind report 2005

France: informations RTE

(Réseau de Transport de l'Electricité)

- L'énergie maximale produite sur une journée correspond à un facteur de charge de 70%. (énergie produite rapportée à la puissance installée)
- Sur l'année 2008, le facteur de charge mensuel des installations éoliennes est resté très variable, de 10% à 37%, pour une valeur moyenne sur l'année de 23%. La grande variabilité des rendements est liée, par nature, à l'intermittence des conditions de vent.
- Lors du pic de consommation début janvier 2009 la puissance de l'éolien a varié de 10 à 30% sur 5 jours.
- Sur les 6 derniers épisodes de grand froid le vent à été très faible 5 fois

Une information très soft, sans chiffres

EOLIEN ET GRAND FROID

(Du 1^{er} au 10 janvier 2009)

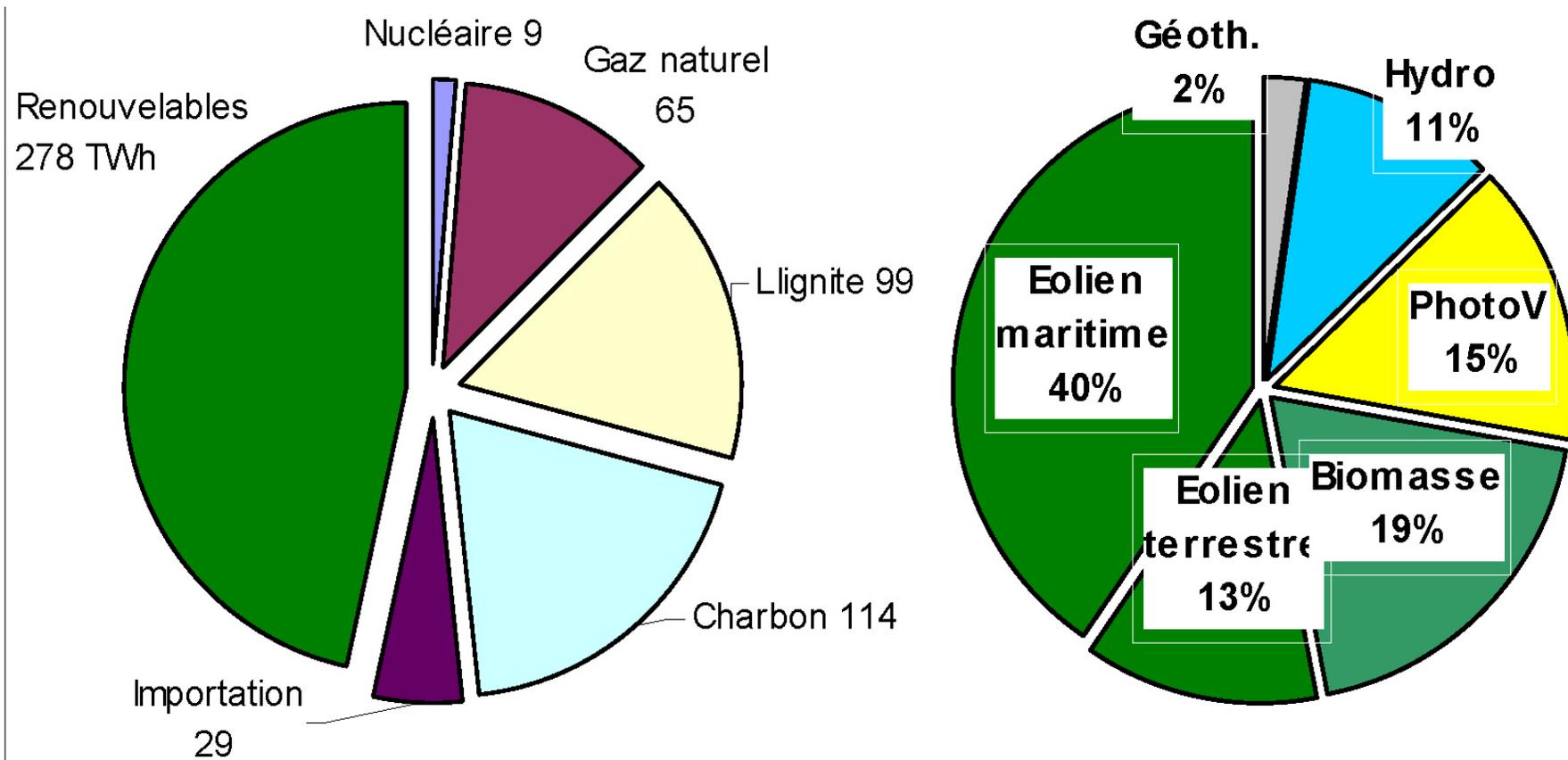
- **Puissance totale appelée: 90.000 MW**
 - Dont nucléaire 57.000/63.000 (soit 90,5%)
 - Thermique classique: 16.000 MW
 - Hydraulique: 17.000 MW
 - Eolien: entre: 300 à 900 MW/3300 (soit η de 10 à 30%)
 - Importations: 300 MW
- **Et en 2020 avec la même situation climatique**
 - Eolien 2.000 à 9000 MW sur 20.000 MW
 - A compenser par du thermique classique ou de l'importation à un niveau de 11.000 à 18.000 MW
- **Grand froid veut souvent dire anticyclone sur l'Europe et peu de vent.**

Gain CO² et coût du CO² évité en 2020 (émissions CO² 2007: 381 Mt dont 34 Mt électricité)

- Economie CO₂ de l'éolien pour 25 GW
 - ADEME: 16 Mt/an
 - Si 80% en substitution au nucléaire et 20% en substitution aux fossiles (34 Mt/an de CO₂ en 2008): 6,8 Mt/an (donnée institut Montaigne)
- Coût du CO₂ évité/ EPR
 - Selon ADEME: 173 €/tonne de CO₂
 - Selon Montaigne: 406 €/tonne de CO₂
- Valeur 2009 de la taxe carbone: 20 à 30 €/tonne de CO₂

Un exemple à (ne pas) suivre Allemagne 2020

594 TWh



Source: BEE Bundesverband Erneuerbare Energie

28 mai 2009

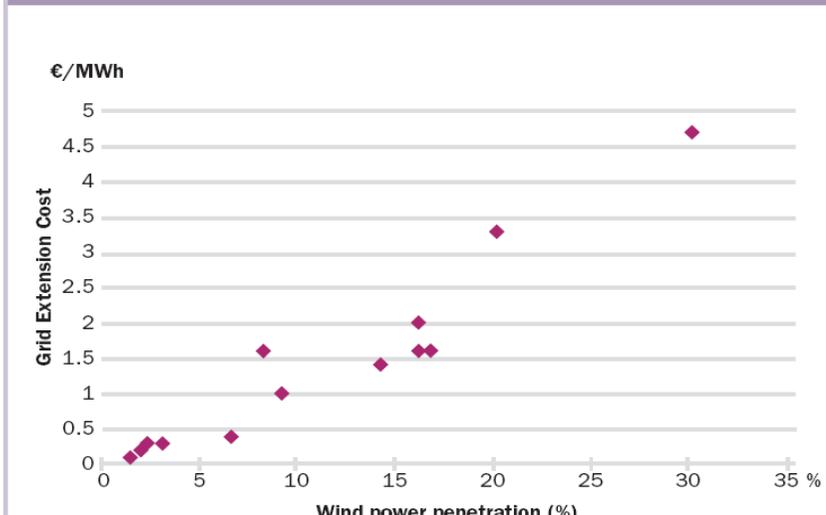
SLC - J.P. Pervès

61

Eoliennes et réseaux électriques

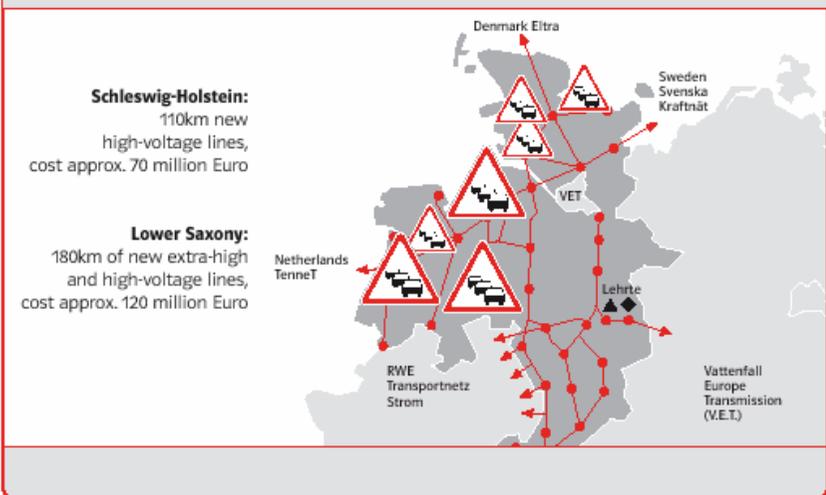
- **Le vent n'est pas toujours dans des zones peuplées**
- **L'électricité éolienne peut circuler à contre-courant de l'électricité distribuée**
- **L'éolienne n'est plus un moyen de production local, mais fournit une « électricité de base » qui pèse sur les équilibres nationaux et internationaux**

Figure 32: Estimated additional costs of grid extension as a function of wind energy penetration



13. Wind power induced grid congestions

in the E.ON control area necessitate grid expansion in Schleswig-Holstein and Lower Saxony



EXEMPLE ALLEMAND

Pour 2020, E.ON estime que l'Allemagne dans son ensemble devra disposer de 2700 km de réseau nouveau ou renforcé, dont 1900 km de nouvelles lignes, pour 3 milliards €

Impact de l'éolien allemand sur ses voisins (rapport Renewable Energy Foundation UK)

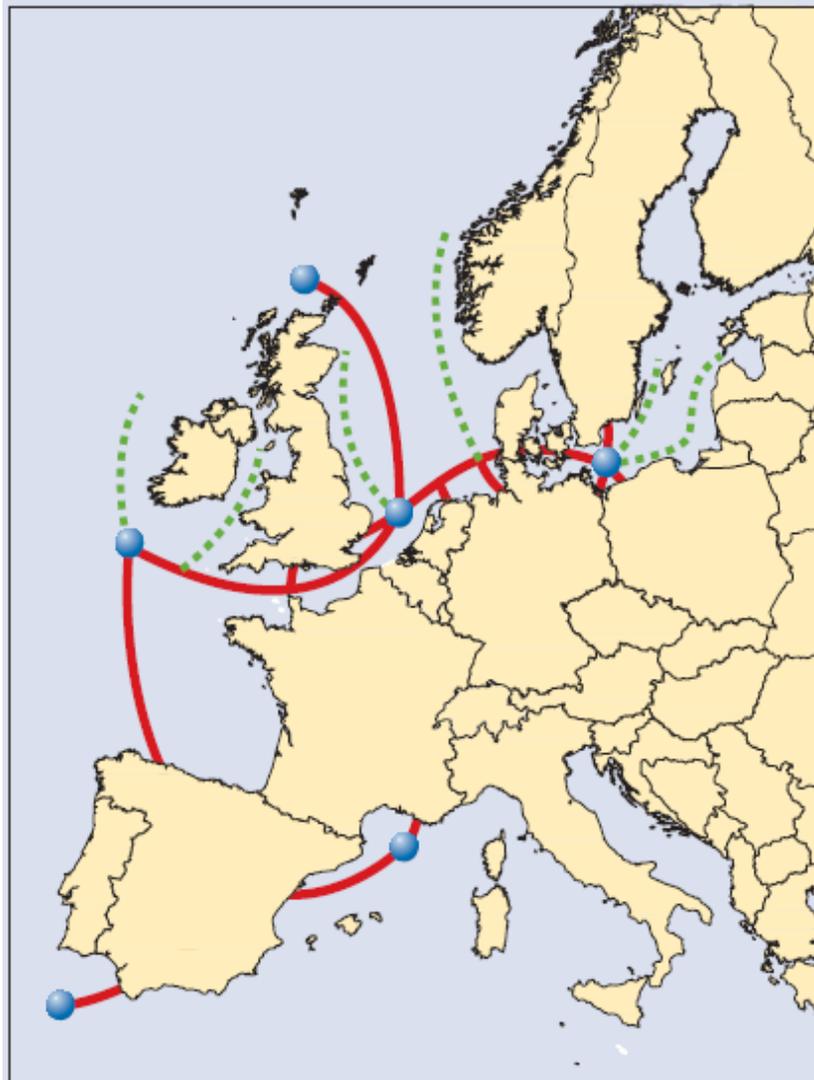
- *« en période de vent fort, la majorité de l'énergie produite entre Oldenburg et Rendsburg fluctue par vagues vers le sud.*
- *En accord avec les lois de la physique, elle cherche à emprunter le chemin de moindre résistance, s'échappant également vers l'Est et vers l'Ouest dans les réseaux européens voisins.*
- *Ainsi l'énergie éolienne allemande pousse de plus en plus les réseaux hollandais et polonais vers les limites de leurs capacités ; des plaintes ont déjà été déposées dans ce sens ».*
- *L'expansion de l'éolien en Allemagne n'est plus possible sans concertation au niveau européen, les réseaux voisins étant affecté par les fluctuations de l'éolien de l'Allemagne et du Danemark*

(Martin Fuchs E-ON)

Eoliennes et réseaux HT en Ecosse (rapport Renewable Energy Foundation UK)

- Les investisseurs proposent en Ecosse 17 000 MW de puissance éolienne.
- L'expansion du réseau nécessaire pour accepter cette puissance va coûter, selon NGT, 250 000 £/MW soit 0,3 M€/MW
- Soit 5 G€ pour la seule Écosse.

Des super réseaux européens ?



Source: Dowling and Hurley (2004)



Source: Statnett (2008)

Un réseau pour les fermes offshore de la Mer du nord (68000 MW)

Europe: relance économique et programme énergétique (mai 2009)

- 565 M€ pour les projets éoliens off shore
- 2365 M€ pour les réseaux d'électricité et de gaz, dont environ 900 M€ pour les réseaux électriques

28 mai 2009

SLC - J.P. Pe



L'industrie de l'éolien Ou est créé de l'emploi?

Très peu en France

Les grands de l'éolien: les fabricants

| Entreprises Company name | Pays Countries | MW fournis en 2007 Supplied MW 2007 | Part de marché en 2007 Market share in 2007 | Chiffre d'affaires 2007 en M€ Turnover 2007 in €M | Salariés en 2007 Employees 2007 | Salariés 2008 Employees 2008 |
|-----------------------------|-------------------|--|--|--|------------------------------------|---------------------------------|
| Vestas | Denmark | 4 503 | 20,3 % | 4 861 | 18 000 | 20 500 |
| GE Energy | Unites States | 3 283 | 14,8 % | > 4 000 | 2 000 | 2 150 |
| Gamesa | Spain | 3 047 | 13,7 % | 3 274 | 6 470 | 6 900 |
| Enercon | Germany | 2 769 | 12,5 % | 2 400 | 8 000 | 10 000 |
| Suzlon | India | 2 082 | 9,4 % | 2 157 | 13 000 | 14 000 |
| Siemens | Germany | 1 397 | 6,3 % | 1 365 | 2 350 | 5 600 |
| Acciona | Spain | 873 | 3,9 % | 1 093* | > 1 000* | n.a. |
| Golwind | China | 830 | 3,7 % | 351 | 843 | n.a. |
| Nordex | Germany | 676 | 3,0 % | 747 | 1 304 | 2 000 |
| Sinovel | China | 671 | 3,0 % | n.a. | n.a. | n.a. |
| Others | | 2 076 | 9,3 % | | | |
| Total | | 22 207 | 100 % | | | |

*Acciona Energy Division. Les décimales sont séparées par une virgule. Decimals are written with a comma. Source: EurObserv'ER 2009.

Ventes 2007: 22.207 MW - Chiffre d'affaire 2007 estimé: 23 G€

(En France Vernet: 2,8% CA Europe en 2008)

Coûts et études de sensibilité

Note: voir les études de François POIZAT

Structure du coût des éoliennes

| | Investment (€1000/MW) | Share (%) |
|-----------------------|--------------------------|------------|
| Turbine (ex-works) | 928 | 75.6 |
| Foundations | 80 | 6.5 |
| Electric installation | 18 | 1.5 |
| Grid connection | 109 | 8.9 |
| Control systems | 4 | 0.3 |
| Consultancy | 15 | 1.2 |
| Land | 48 | 3.9 |
| Financial costs | 15 | 1.2 |
| Road | 11 | 0.9 |
| Total | 1227 | 100 |

Note: Calculated by the author based on selected data for European wind turbine installations.

Source: Risø DTU

- - **Aérogénérateurs** **50%**
- - **Mat** **5%**
- - **Fondation** **15 –20%**
- - **Ancrage au sol** **2 –6 %**
- - **Montage sur site** **5 –7%**
- - **Câblage interne** **2 %**
- - **Câblage externe** **2 –20%**
- - **Poste transformation** **4 –10%**
- - **Raccordement réseau** **4 –10%**
- - **Management** **4 -7%**
- - **Financement** **3 -6%**

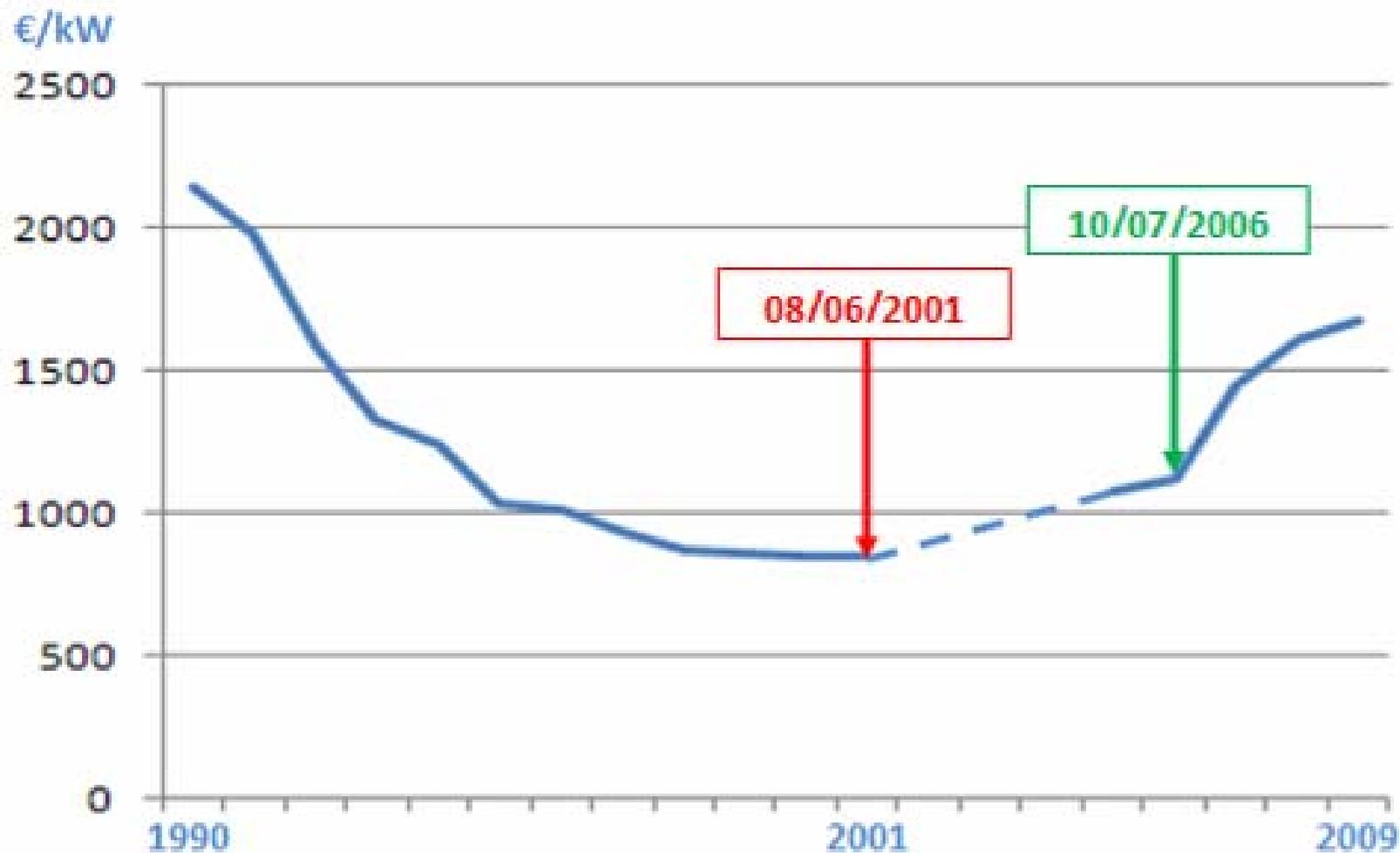
Source: ENERTAG bureau coordination énergie éolienne

Coûts d'investissement on shore

- **RWE Pologne**
 - 80 MW
 - Investissement: 100 M€ soit 1,25 M€/MW
- **Siemens (Norfolk – GB)**
 - 315 MW (éoliennes de 5 et 6 MW)
 - 450 M€ → 1,43 M€/MW
- **Enercon (Haute Loire)**
 - 12 MW
 - 15 M€, soit 1,25 M€/MW
- **Lestrade-et-Thouels (Aveyron)**
 - 11,5 MW
 - 17 M€, soit 1,48 M€/MW
- **EdF-EN (6 parcs en France)**
 - 197 MW
 - 266 M€, soit 1,35 M€/MW

Valeur 2009: de 1,3 à 1,6 M€/MW

On shore: évolution de l'investissement €/MW



Source: F. Poizat « Mirage de l'éolien 2009 »

| | Réf. | Exploitant | Pays | Puissance (MW) | Site | Coût annoncé | | Année MSI | I _u (€/kW) |
|------|------------|---------------------------|----------|-------------------|------------------------------|--------------|---------------------|--------------|--------------------------|
| | [...] | | | | | € | dont C _f | | |
| 2008 | 49 | Areva | D | 400 | Borkum West-II | 500 | 500 | > 2010 | 2500 |
| | 30 | Trianel | D | 400 | Baltic-I | 1000 | | > 2010 | 2500 |
| | 51 | SSE | U-K | 504 | Suffolk | 1600 | + connexion | > 2011 | 3343 |
| | 54 | | N | 8000 | Atlantique Nord | 28000 | | | 3500 |
| | 56 | SSE | U-K | 504 | Suffolk | 1625 | | > 2011 | 3224 |
| | 58 | C-Power/EDF | Be | 300 | Thornton Bank | 1000 | | | 3333 |
| 2009 | 69 | Siemens | Dk | 207 | Rodsand II Thornton Bank | 275 | 275 | > 2010 | 2657 |
| | 72 | C-Power/EDF | | Be | | 300 | 850 | | 2833 |
| | 74 | | USA | 5000 | Golfe du Maine | 20000 | | > 2013 | 4000 |
| | 79 | Vent d'Ouest | F | 260 | Côte havraise | 600 | | 2012 | 2308 |
| | 56 | SSE | U-K | 260 | Suffolk | 700 | | > 2011 | 2692 |
| | 85 | Areva | D | 400 | Global Tech I | 700 | 700 | > 2011 | 3500 |
| | 86 | Centrica | U-K | 250 | Lincolnshire | 938 | | > ... | 3750 |
| | 87 | StatoilHydro Statkraft | U-K | 315 | Norfolk | 450 | 450 | | 2857 |
| | 74 | | USA | 315 | Golfe du Maine | 1100 | | | 3492 |
| | 106 107 | E.ON Direct-Energie | U-K F | 630 100 | London Array Boulogne/Mer | 2200 350 | | | 3492 3500 |

Source F. Poizat

3 M€/MW ?

28 mai 2009

SLC - J.P. Pervès

74

Coûts d'investissement offshore

- **Suède**
 - 1100 éoliennes
 - 3 GW - 10 TWh/
 - 5,1 G€ 1,7 M€/GWh
- **Areva/Multibrid (Offshore mer du Nord/Allemagne)**
 - Parc Global Tech: 400MW (80x5 MW)
 - Investissement: 700 M€ soit 1,75 M€/MW
- **RePower (Innogy Nordsee –Allemagne)**
 - 1000 MW (éoliennes de 5 et 6 MW)
 - 2000 M€ → 2 M€/MW
- **Centrica (Lincolnshire GB)**
 - 250 MW
 - 825 M€ 3,3 M€/MW
- **RePOWER Le Havre**
 - 250 MW
 - 700 M€, soit 2,8 M€/MW
- **WDP Yeu/Noirmoutier**
 - 600 MW (120x5 MW)
 - 1500 M€, soit 2,5 M€/MW

10.000 MW offshore: un exemple de coût complet

20 fermes de 500 MW (100 x 5 MW)

- 15 x 15 km² par ferme soit 4500 km² au total
- Distance entre éoliennes: 1,5 km (2,25 km² par éolienne)
- Une ferme → 100 réseaux AC 5 MW → 1 HVDC 500kV / 500MW
- Réseau 1000 km DC 10 GW (16 câbles //)
- Convertisseurs DC/AC 500 kV sur le rivage

Coût réseau (G€):

| | |
|------------------------|-----|
| - Convertisseur AC/DC: | 1,1 |
| - Câble DC 10 GW: | 5,2 |
| - Convertisseur DC/AC: | 0,7 |
| S/TOTAL ~ | 7,0 |

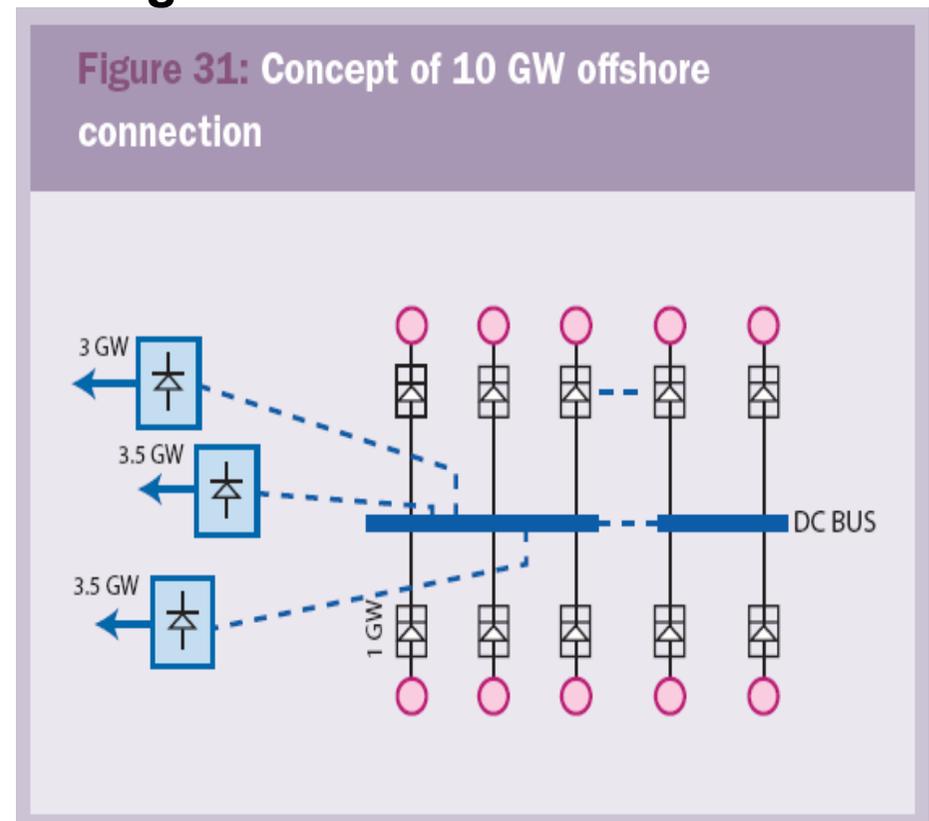
Eoliennes 2,5 M€/MW → 25 G€

TOTAL ~ 32 G€ soit 3,2 M€/MW

Source: EWEA février 2009

28 mai 2009

SLC - J.P. Pervès



76

Qu'en penser

- Il y a un certain consensus dans la littérature pour considérer en 2009 un coût d'investissement compris entre:
 - 1,3 à 1,6 M€/MW pour l'éolien terrestre
 - 2,5 à 3,3 M€/MW pour l'éolien marin
- Une grande opacité du marché domine, anormale pour une industrie aussi aidée et totalement protégée.
- Il est impossible d'avoir une idée précise du contenu réel des coûts d'investissement révélés par la presse (machines, montage, branchement au réseau,...)
- Une baisse du prix des éoliennes est possible, le marché on shore étant en diminution en Europe mais la tendance récente est à la croissance
- L'éolien marin (mer du nord) et la France, avec le programme du Grenelle, deviennent aujourd'hui les moteurs de ce marché en Europe

Comment comparer les investissements (M€)

La comparaison pertinente entre plusieurs investissements repose sur l'investissement consenti en regard de la production. On peut ainsi évaluer l'investissement par MWh produit annuellement

| | Invest. Unitaire (M€) | Invest./MW (M€) | Invest. €/MWh annuels |
|---|--------------------------|--------------------|--------------------------|
| Eolienne terrestre 3 MW et 2000 HEPP | 4,2 | 1,4 | 700 |
| Eolienne marine 5 MW et 2600 HEPP | 14 | 2,8 | 1077 |
| EPR de série 1600 MW et 7800 HEPP | 4000 | 2,5 | 320 |

Il faut de plus prendre en compte la durée de vie à la conception qui est de 60 ans pour l'EPR et non connue pour les éoliennes (30 ans?).

Le tarif d'achat obligé (très obligé!)

- **Eoliennes terrestres: (aujourd'hui ~ 2000h/an)**
 - **année 1 à 10 : 82 €/MWh**
 - **année 10 à 15 :**
 - 82 si moins de 2400 h/an
 - 82 à 68 de 2400 à 2800 h/an (
 - 82 à 28 de 2800 à 3600 h/an (très peu probable
 - 28 à plus de 3600 h/an (
- **Outre-mer:**
 - **110 €/Mwh**
- **Eoliennes marines:**
 - **année 1 à 10 : 130 €/MWh**
 - **année 10 à 20**
 - 130 si moins de 2800 h/an
 - 130 à 90 de 2800 à 3200 h/an (
 - 130 à 30 de 3200 à 3900 h/an (peu probable !!!
 - 30 au delà de 3600 h/an (

Et une évolution des tarifs Très favorable depuis 2006

| Tarif terrestre (€/MWh) | 2001 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2015 | 2020 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| France avant 2006 | 83,8 | 82,0 | 81,1 | 80,2 | 79,3 | 78,4 | 74,7 | 70,2 |
| après 2006 | | 82,0 | 83,9 | 84,1 | 84,3 | 84,4 | 85,4 | 86,4 |
| Δ en % | | 0,0 | 3,4 | 4,8 | 6,2 | 7,6 | 15,1 | 23,0 |

| Tarif terrestre (€/MWh) | 2001 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2015 | 2020 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Allemagne "EEG" avant | 92,5 | 83,6 | 81,9 | 80,3 | 78,7 | 77,1 | 69,7 | 63,0 |
| après 2008 | | | | | 92,0 | 91,1 | 86,6 | 82,4 |
| Δ en % | | | | | 17,0 | 18,2 | 24,3 | 30,8 |
| cas du "repowering" | | | | | 97,0 | 96,1 | 91,6 | 87,4 |
| Δ en % | | | | | 23,3 | 24,6 | 31,5 | 38,7 |

Source: F. Poizat **Pourquoi: parce que le prix de l'électricité espéré par « Mirage de l'éolien 2009 » l'ADEME devrait augmenter de 3% par an!!!**

Aspects financiers (Institut Montaigne)

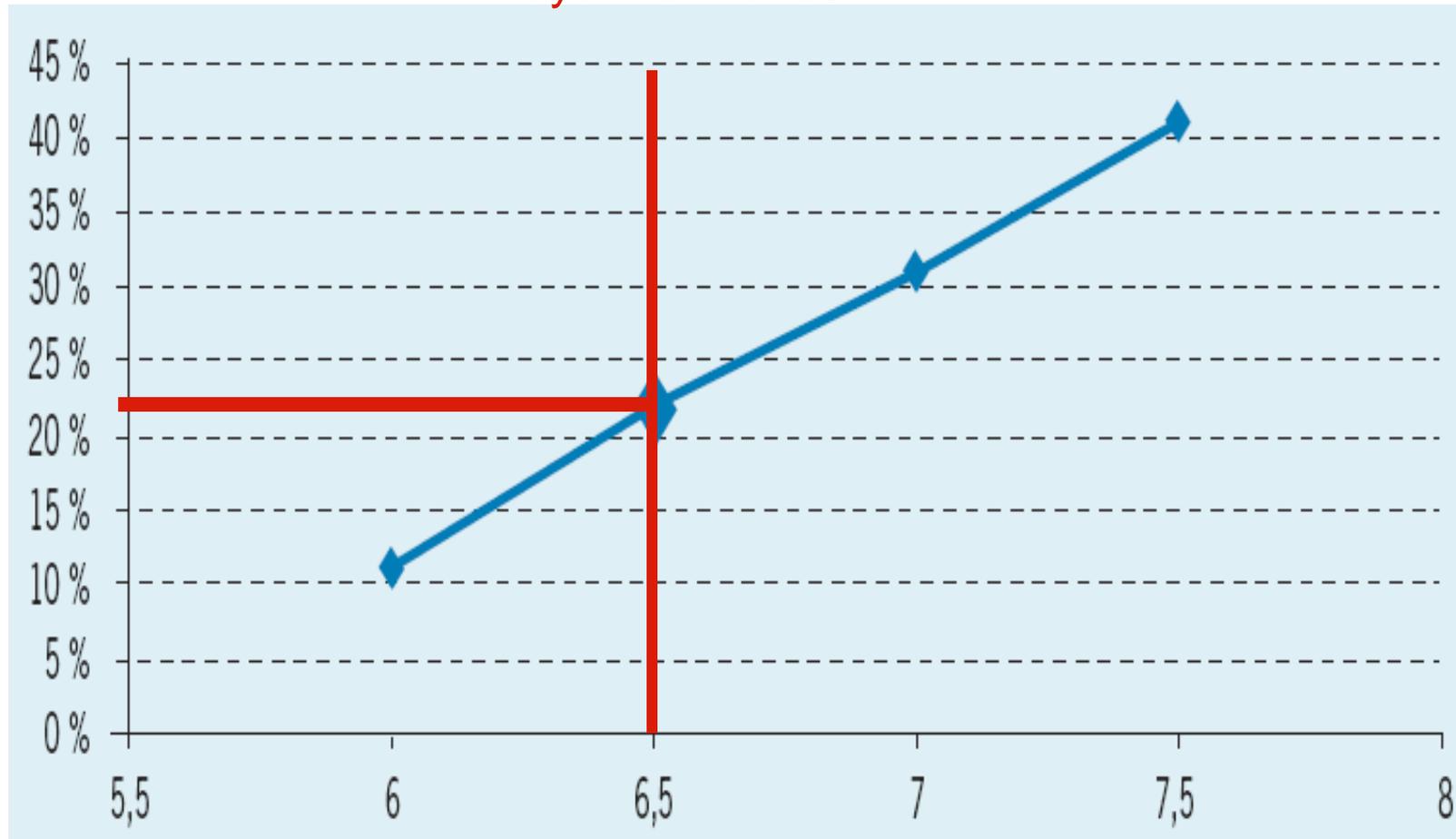
- Le tarif d'enlèvement vise à un Taux de Rentabilité Interne des projets (TRI) de 8% (soit 13,5% sur l'investissement), ce qui est déjà bon
- L'amortissement est possible sur 12 mois (diminution de l'impôt sur les sociétés)
- La garantie d'enlèvement et de prix d'achat sur 15 ans (on shore) et 20 ans (off shore) permet d'emprunter jusqu'à 80% de l'investissement à taux faible (4,2 %): effet de levier sur la rentabilité sur fonds propres
- Le TRI sur fonds propre est ainsi porté à 22% en moyenne et jusqu'à 40% sur les sites venteux

Un parc éolien semble être un (très) bon investissement financier pour l'investisseur (mieux que Madoff!)

La Commission de Régulation de l'Electricité (CRE) a parlé d'une « rente indue »

TRI sur fonds propres/vitesse du vent

V moyenne France



CRE sur données DIDEME

V: m/s

Soit un taux de rentabilité interne moyen de 22% en France

La preuve par l'exemple de cette rentabilité

- **Début 2008 Suez a acquis 50,1% de la «Compagnie du vent »**
- **Cette PME de 60 salariés présentait un CA de 11 M€/an**
- **Le montant de la transaction à été 321 M€, ce qui valorise l'entreprise à 640 M€, soit 58 années de CA.**
- **Suez achète en fait le portefeuille des accords obtenus auprès de maires ruraux par l'entreprise**
- **Suez paye pour une entrée accélérée sur ce marché, les prix actuels n'étant garantis que jusqu'à 2012**

Le surcoût de l'éolien

- Le surcoût réel: il devrait correspondre à l'écart entre le tarif obligé de l'éolien et le coût évité (essentiellement le combustible) sur les autres moyens de production soit en €/MWh:

| | Coût évité | Surcoût |
|-------------|------------|---------|
| – Nucléaire | 13 | 69 |
| – Gaz | 61 | 21 |
| – Charbon | 45 | 37 |

soit pour 80% sur la base nucléaire et 20% sur le fossile un **surcoût réel d'environ 61 €/MWh**

- Le surcoût officiel est fixé en référence au prix de marché de l'électricité soit environ 64 €/MWh d'où un **surcoût officiel de 18 € seulement**

Et qui paye ce surcoût éolien en 2008?

- **Surcoût officiel (via EdF à 98%):**
 - $5,6 \text{ TWh} \times 18 \text{ €/MWh} = 101 \text{ M€}$
 - Facturé aux « petits » clients (384 TWh/an) car les grands consommateurs industriels (104 TWh/an) en sont dispensés.
 - Cette « taxe » fait partie de la « Contribution au service public d'électricité » qui figure au verso des factures EdF. Cette CSPE représente 9,5% et 5,6% du prix de l'électricité HC et HP hors taxes.
 - Elle représente 5,8% de cette CSPE en 2008. Cette taxe va croître avec la production électrique des ENR aidées, éolien, solaire, hydraulique, biomasse et géothermie.
- Reste du surcoût réel, soit 43 €/MWh ou **241 M€** en 2008 est pris en charge par EdF essentiellement, est invisible pour le consommateur mais pèse sur le prix de vente de l'entreprise, donc sur les clients.
- Le surcoût 2008 pour la nation est de **341 M€**, soit environ **13 à 14 € HT par foyer** (pour 27 millions de foyers).

Contribution au service public d'électricité au dos de votre facture

votre facture en détail *document à conserver*

Votre référence client
22224 753 208 410 417

Réf.

| | relevé ou estimation en kWh | | | consom. (en kWh) | prix kWh en euros |
|---|-----------------------------|---------|------------|---------------------|----------------------|
| | ancien | nouveau | différence | | |
| électricité compteur n° 350 | | | | | (1) |
| abonnement | | | | | |
| 32,83€ /mois du 28/10/08 au 28/12/08 | | | | | |
| consommation HC du 29/08/08 au 01/11/08 | 65775 | 66500 | 725 | 725 | 0,0472 |
| consommation HP du 29/08/08 au 01/11/08 | 42790 | 43853 | 1063 | 1063 | 0,0803 |

(1) y compris le coût d'acheminement de l'électricité pour 46% (% moyen pour le Tarif Bleu)

1/10

autres prestations

| | | | | | |
|--|--|--|--|------|--------|
| contribution au service public d'électricité | | | | 1788 | 0,0045 |
|--|--|--|--|------|--------|

Surcoût éolien: projection sur 2020

- **Hypothèse I: les conditions financières actuelles sont prolongées jusqu'en 2020 et la consommation est maintenue**
 - 19 GW terrestre (2050h/an) et 6 GW marin (2500 h/an)
 - Coût moyen du MWh: 93,5 € (39 et 15 TWh/an)
 - Surcoût officiel et réel: 32,5 et 71 €/MWh
 - Taxe « CSPE »: 1,76 G€ an ou 0,5 c€/kWh soit environ 8% de coût HT de l'électricité
 - **Surcoût pour la nation: 3,8 G€ ou 141 €/foyer**
- **Hypothèse II: On supprime les tarif obligés en 2012: arrêt des implantations d'éoliennes et les puissances installées « protégées » sont limitées à 15 GW environ. Les surcoût 2020 sont réduits d'environ 40%**

On shore: quel bénéfice localement

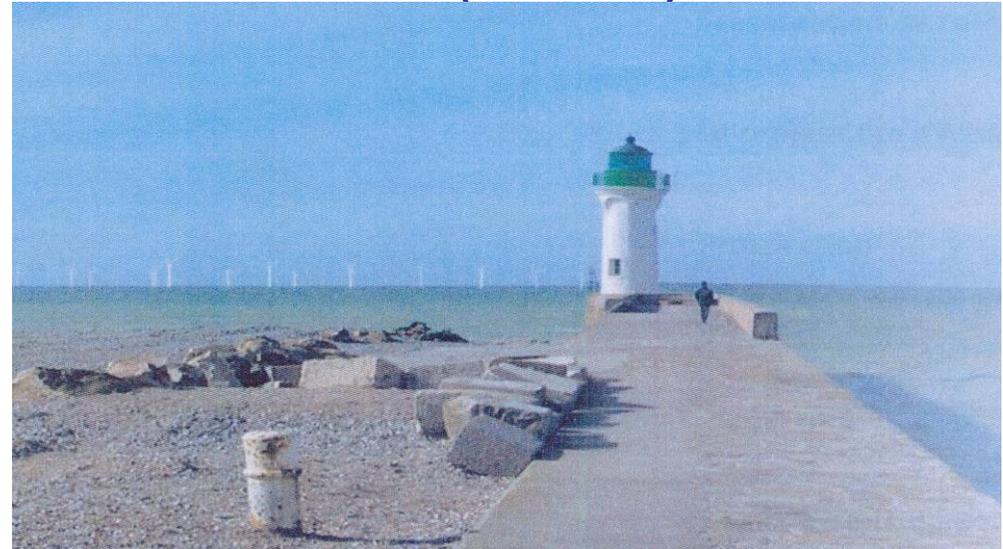
Exemple d'un parc français de 32 MW

- Trois parcs voisins de 12, 8 et 12 MW
- 73,5 GWh par an soit 2300 HEPP
- Indemnisations
 - Terrain de l'éolienne: 840 €/MW pour le propriétaire et 360 €/MW pour l'exploitant
 - Autres terrains à moins d'un diamètre de pales (100m): 420 €/MW pour les propriétaires et 180 €/MW pour les exploitants
- Taxe professionnelle: 700 €/MW et par point de TP, soit pour 5% de TP 112 k€/an
- Bilan global:
 - Chiffre d'affaire du parc: 6.000 k€
 - Indemnisation propriétaires et exploitants: 57 k€
 - Taxe professionnelle (5 %): 112 k€
 - soit ressources locales: 3% du CA
 - Surcoût habitants 2020 (2000p -800 foyers) 113 k€

Off shore: Yeu/Noirmoutier

Le parc WDP des deux îles (2013)

- 120 éoliennes de 5 M€: 600 MW
- A 12 km ouest d'Yeu
- A 15 km ouest de Noirmoutier
- Pas de 800 m
- Surface totale: 70 km²
- Câble de 30 km
- Transformateur 35 kV
- Invest.: ~1500 M€ (2,5 M€/MW)
- Fonctionnement: 2600 HEPP
- Production: 1560 GWh
- **CA annuel: 203 M€**
- **Taxe générée: 7, 2 M€/an**
 - 3,6 M€ municipalités limitrophe
 - 3,6 M€: marins et plaisanciers
 - Soit 3,6 % du CA



Combien faut-il d'éoliennes pour remplacer une centrale nucléaire

- **Une centrale nucléaire moderne de 1600 MW en base produit 12.600 GWh/an (Efficacité > 90% en France)**
- **Une éolienne on shore moderne de 3 MW produit 6 GWh/an (efficacité 23%)**
- **Pour produire autant d'énergie qu'une centrale nucléaire il faut 2090 éoliennes**
- **25000 MW d'éolien en 2020 produiront autant que 4,5 centrales nucléaires (il y en aura 60)**

Electricité et combustibles fossiles: quelles perspectives: 2 exemples?

- Allemagne (sortie du nucléaire)
 - Arrêt 17 réacteurs nucléaires soit 20.000 MW (2008 à 2022)
 - Construction de 30 centrales à charbon soit 26.400 MW
 - Emission de 170 MtCO₂ soit +20% / émissions allemandes actuelles
- France
 - Mise en production de centrales à combustible fossile d'ici 2012:
 - EdF: 3.100 MW anciennes centrales (puis 6000 MW nouvelles)
 - POWEO: 2.800 MW
 - SNET: 2.000 MW
 - GDF: 1.430 MW
 - SUEZ: 840 MW→ soit 10.170 MW fossiles
 - Construction de 2 EPR, soit 3200 MW

Remarques finales

- **Evolution vers l'offshore gigantesque (acceptabilité du public meilleure)**
- **Des progrès techniques incontestables (souplesse, rendement, industrialisation)**
- **Fiabilité /durée de vie: à suivre (fatigue, corrosion, tempêtes et vagues)**
- **Créateur d'emploi hors France surtout**
- **Une image très favorable dans le grand public (lobbying privé et d'état)**
- **Un bonne intégration dans des pays à forte hydroélectricité stockée**
- **Un bon investissement « pour l'investisseur » en Europe (prix et enlèvement garantis!)**
- **Apport aux finances locales, mais peu à l'emploi**
- **Coûteux pour le consommateur**
- **Générateur de CO2 car il faut prévoir 60% de la puissance en secours pour un éolien à 10% de la production totale**
- **Grand froid et grand chaud = pas de vent**
- **En France: se substituera de + en + au nucléaire**