

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



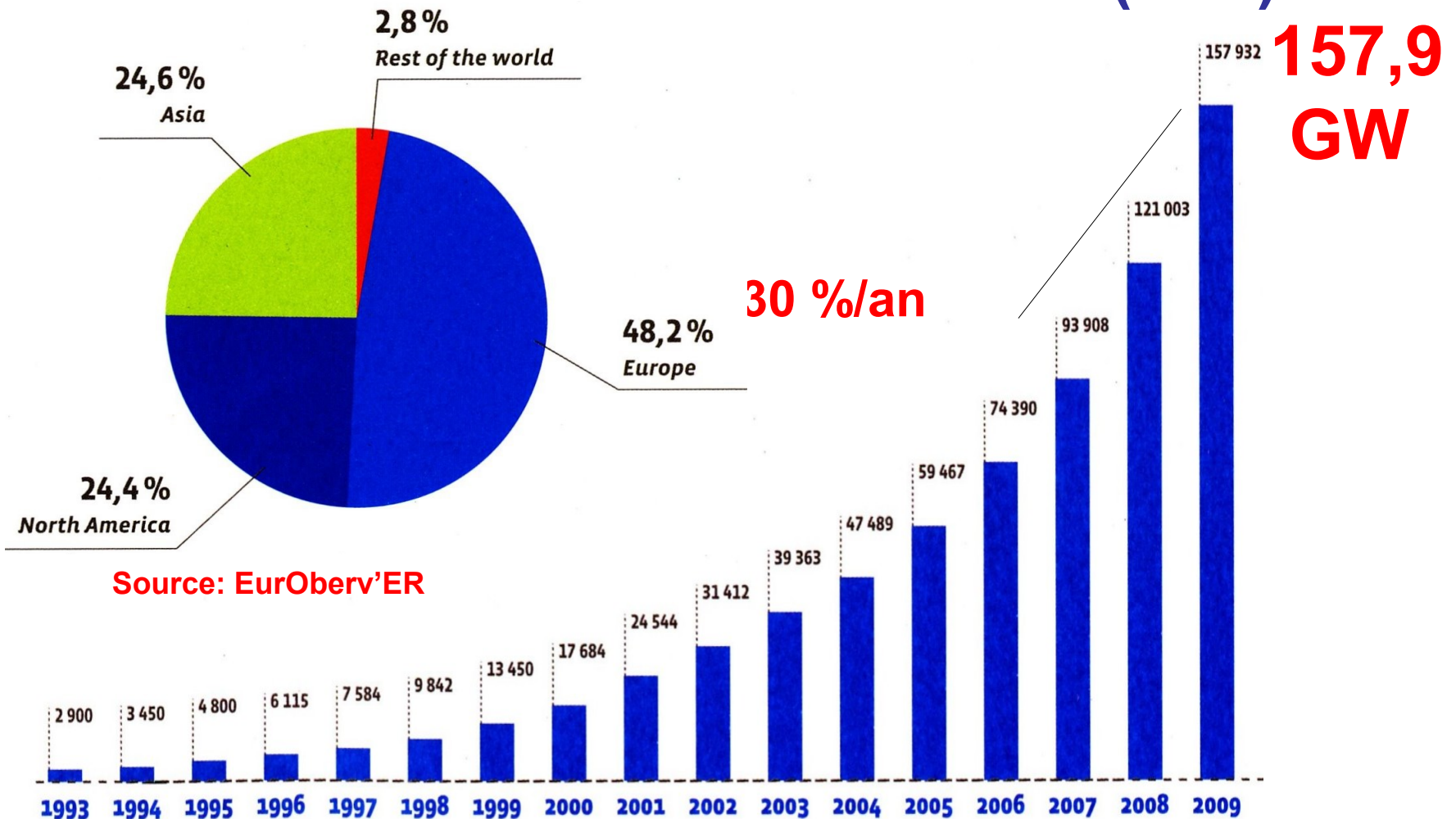
**1780: jardin de l'Elysée**

**2008 Off shore**

# L'électricité dans le monde en 2008 (TWh)

	<u>MONDE</u>	<u>EUROPE</u>	<u>France</u>
TOTAL	19.824	3309	549
• 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
• Eolien:	169 (0,9%)	104 (3,1%)	5,6 (1%)

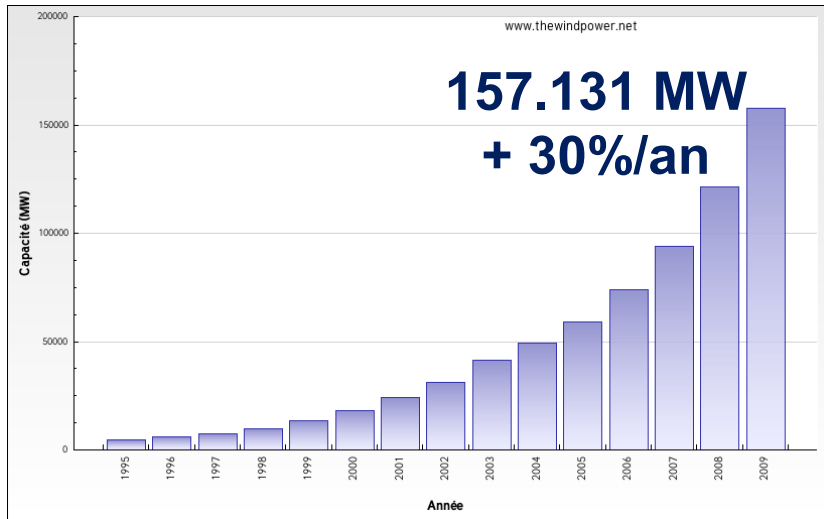
# Monde: évolution de la puissance éolienne cumulée 1993/2009 (MW)



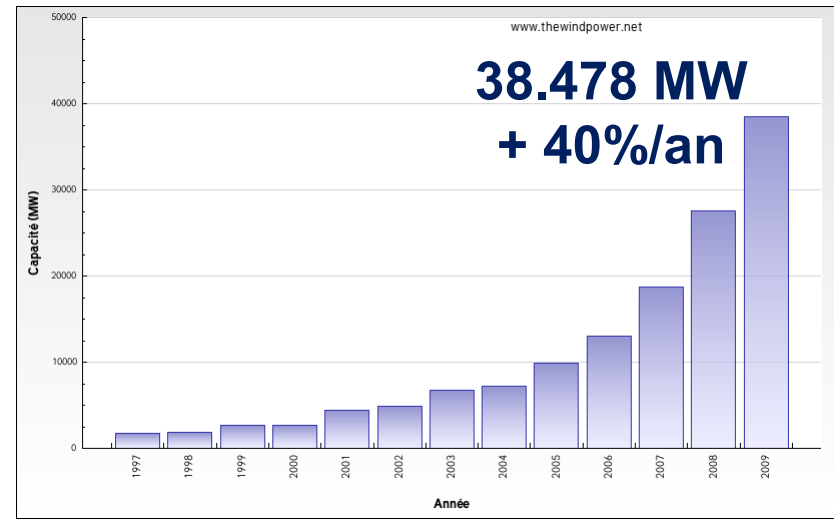
\* Estimation. Estimate. Source: EurObserv'ER 2010.

# P éolien: évolution 1997/2009 (MW)

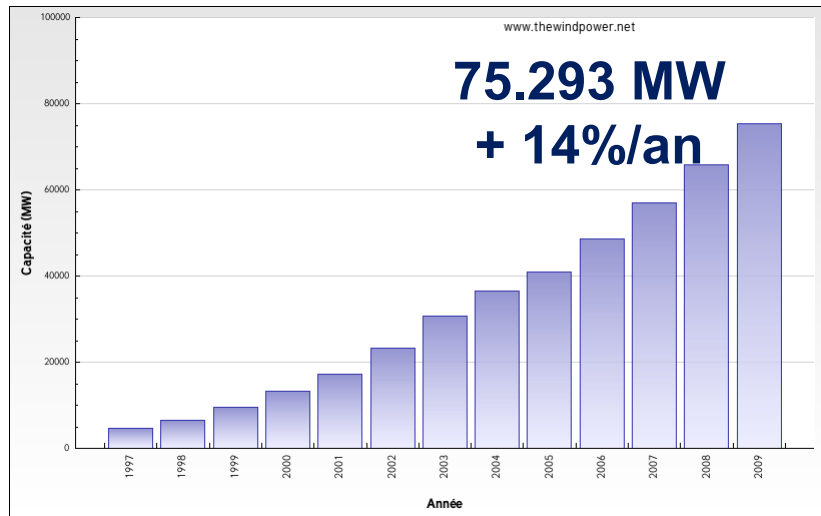
## MONDE



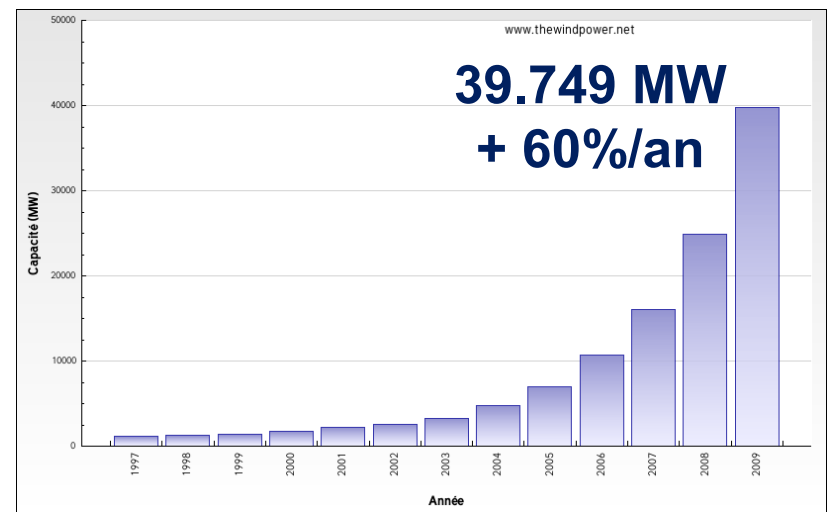
## AMERIQUE DU NORD

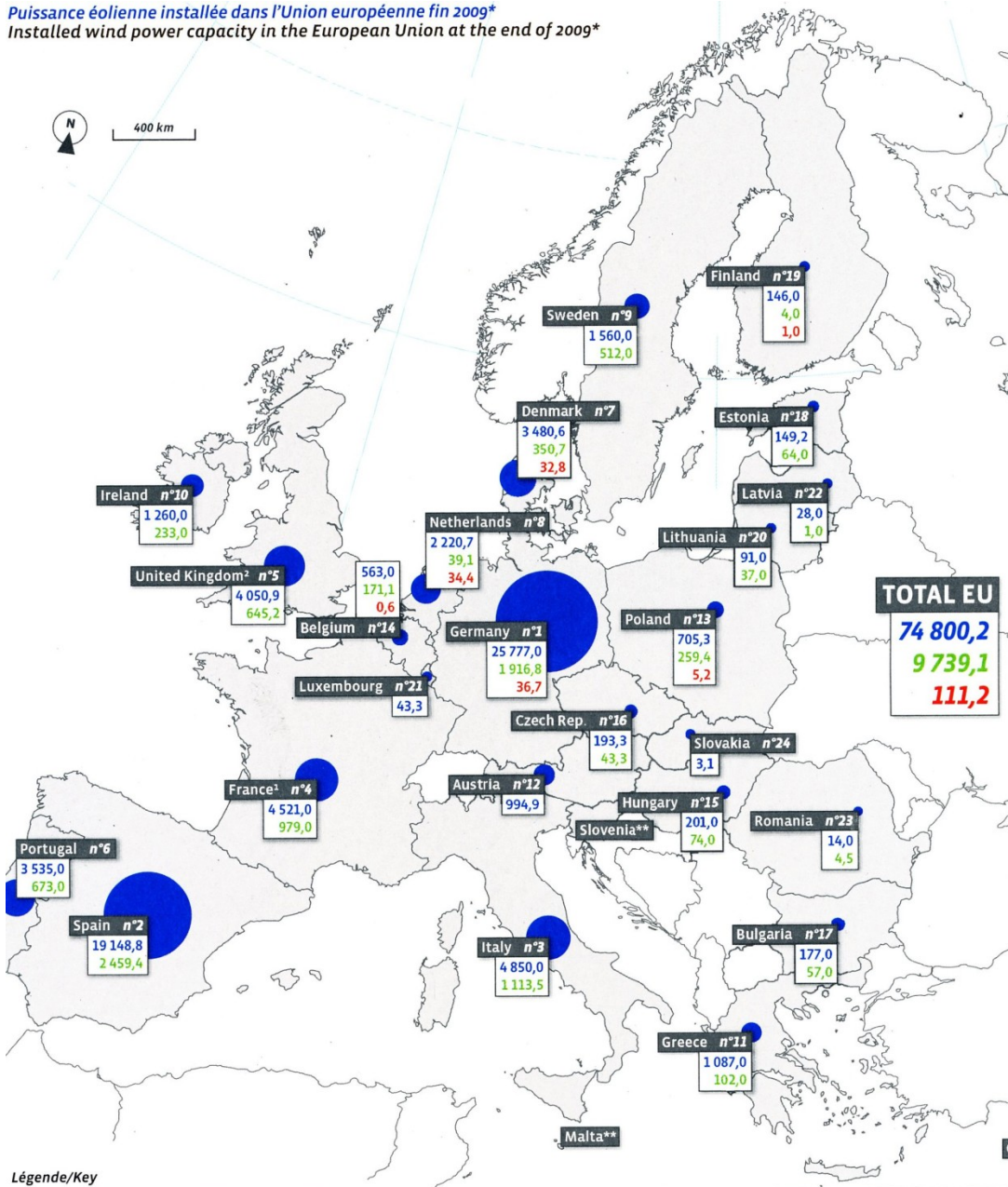


## EUROPE



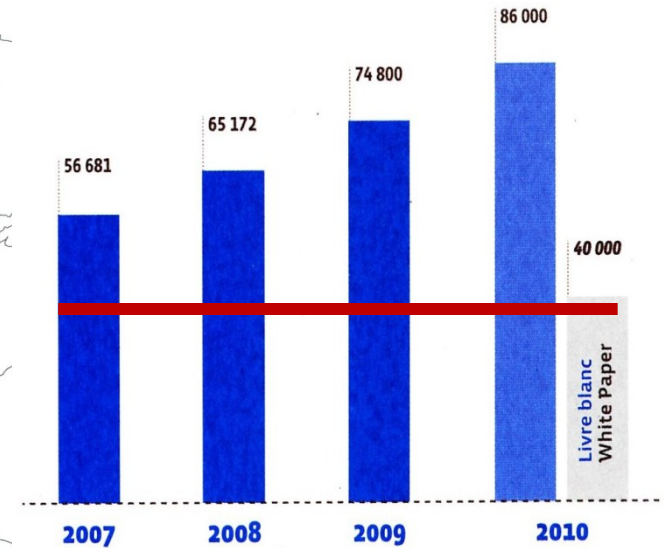
## ASIE





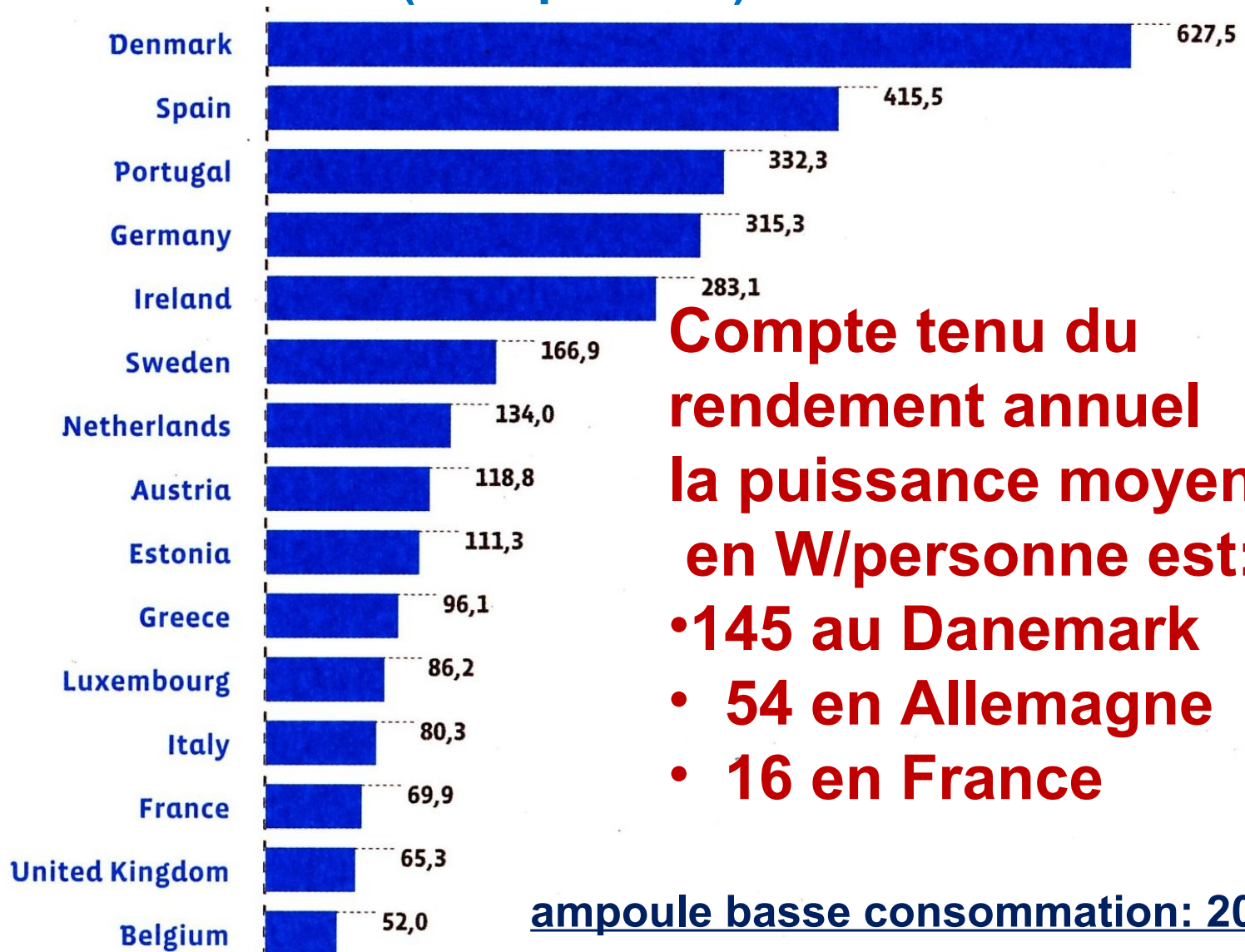
Légende/Key

**EN 2009 déjà  
 le double de  
 l'objectif du  
 livre blanc  
 de l'Europe  
 pour 2010**



Les décimales sont séparées par une virgule. Decimals are written with a comma.  
 Source: EurObserv'ER 2010.

# Puissance éolienne pour 1000 habitants en Watts (Europe 2009)



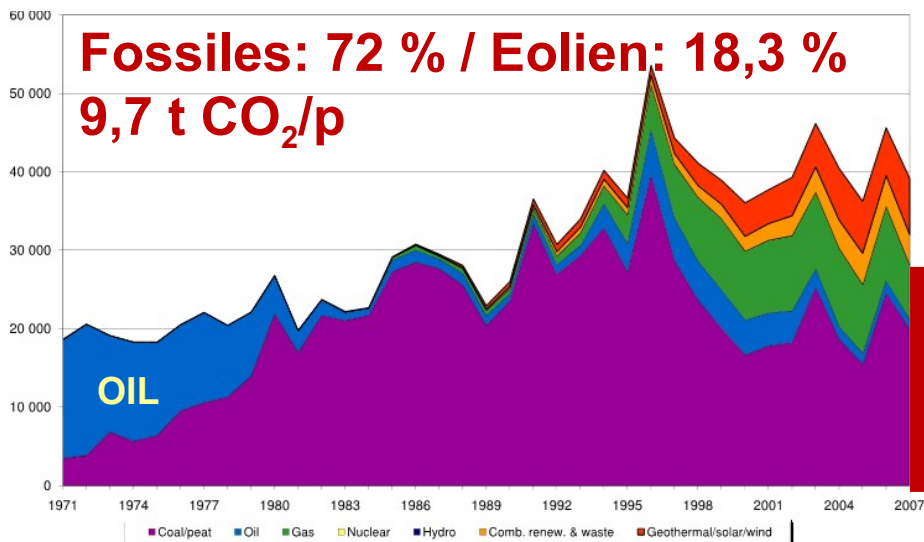
**Compte tenu du rendement annuel la puissance moyenne en W/personne est:**

- 145 au Danemark
- 54 en Allemagne
- 16 en France

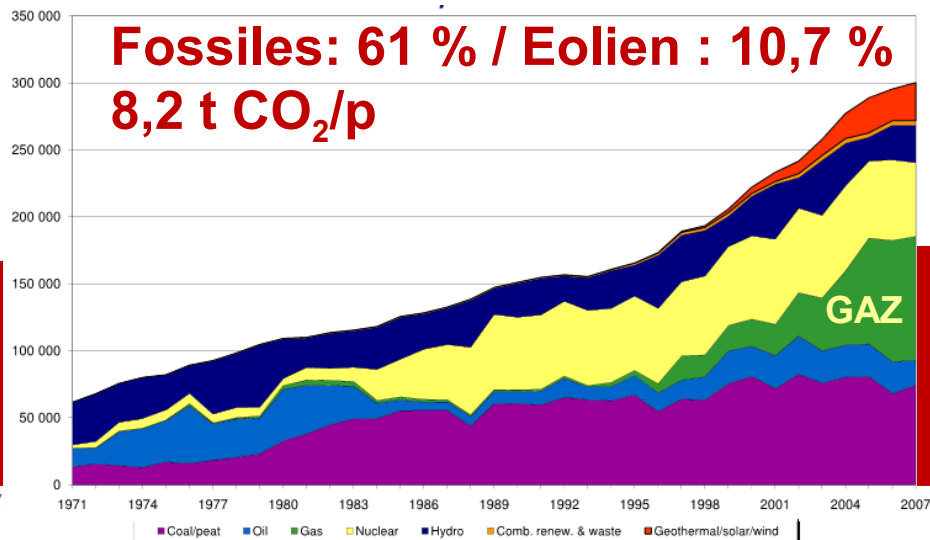
ampoule basse consommation: 20 W

# Electricité: contributions fossiles (2007) et éolien (2009)

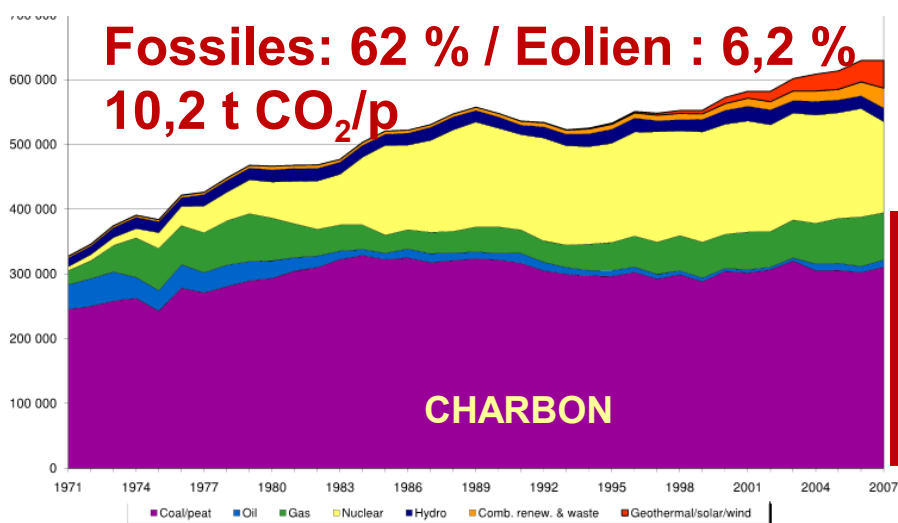
## DANEMARK



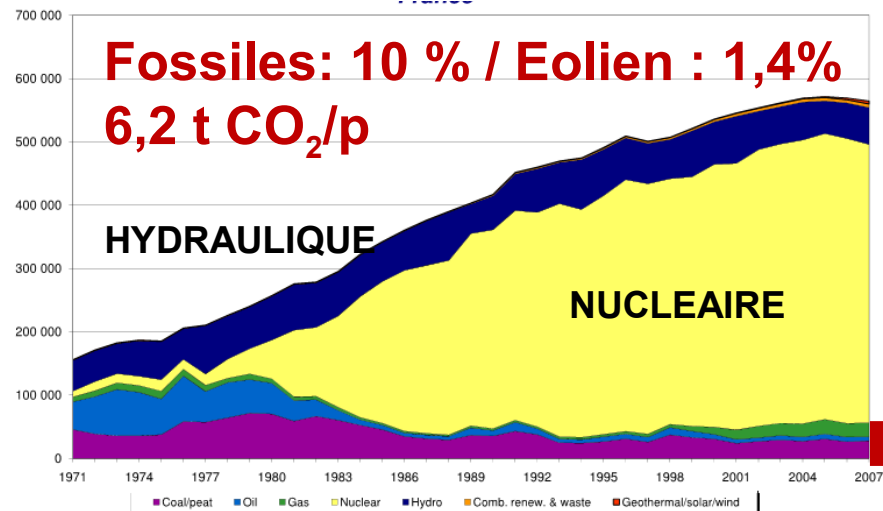
## ESPAGNE



## ALLEMAGNE



## FRANCE



DE GRANDES DIFFERENCES

# Remplacer les combustibles fossiles avec des éoliennes: une bonne logique

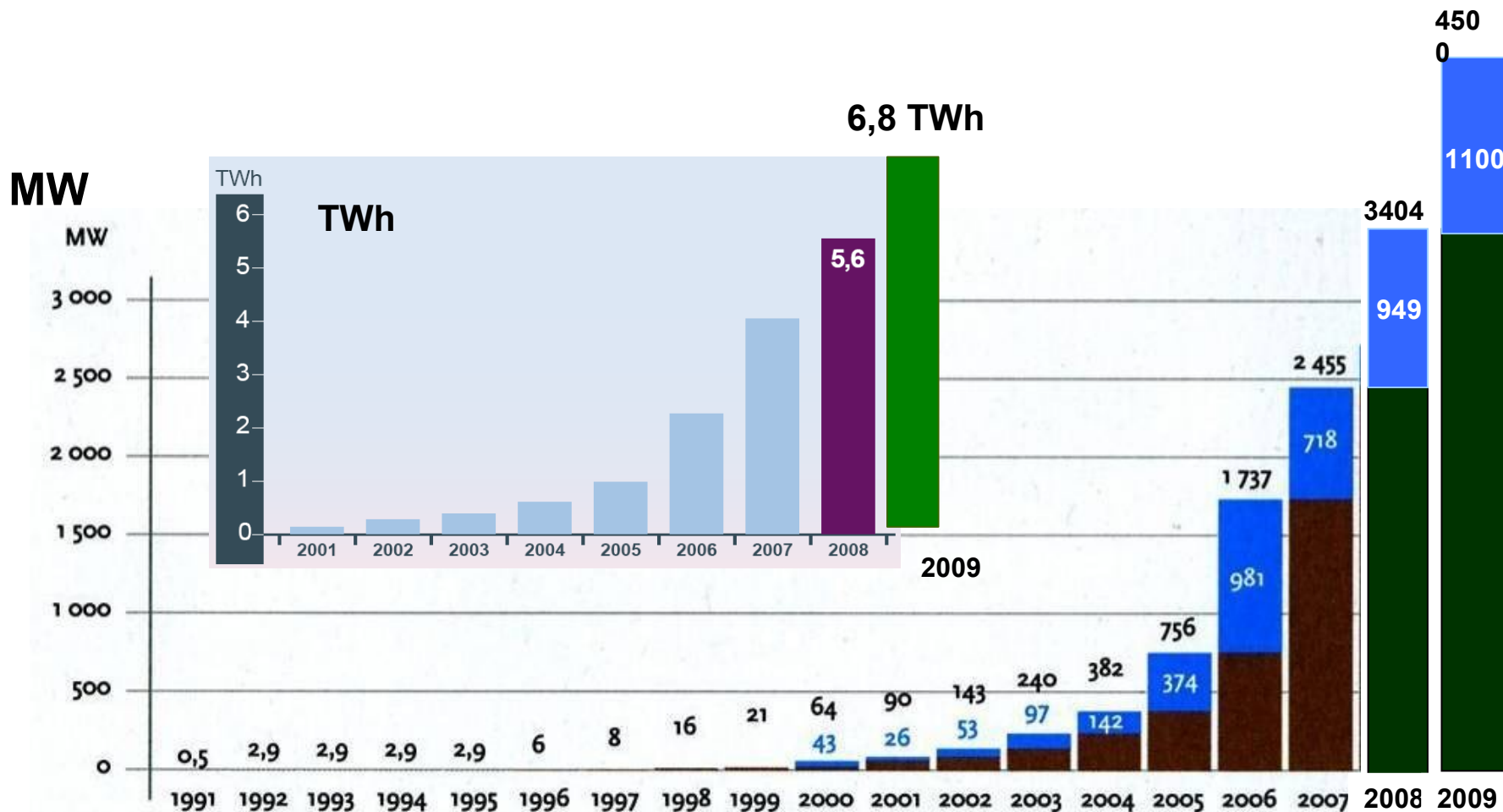
	<b>Eolien GWh (2009)</b>	<b>Fossiles (2007)</b>	<b>CO2/p (2008)</b>
• <b>Allemagne</b>	<b>40500 GWh</b>	<b>62 %</b>	<b>10,2</b>
• <b>Espagne</b>	<b>36188 GWh</b>	<b>61 %</b>	<b>8,2</b>
• <b>Royaume-Uni</b>	<b>9259 GWh</b>	<b>78 %</b>	<b>9,9</b>
• <b>Danemark</b>	<b>6716 GWh</b>	<b>72 %</b>	<b>9,7</b>
• <b>Italie</b>	<b>6087 GWh</b>	<b>75%</b>	<b>8,0</b>
• <b>Pays Bas</b>	<b>4800 GWh</b>	<b>87 %</b>	<b>10,5</b>
• <b>France</b>	<b>7800 GWh</b>	<b>10,6 %</b>	<b>6,2</b>
<b><u>EUROPE</u></b>	<b><u>128373 GWh en 2009</u></b>		

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



# 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 2009):**

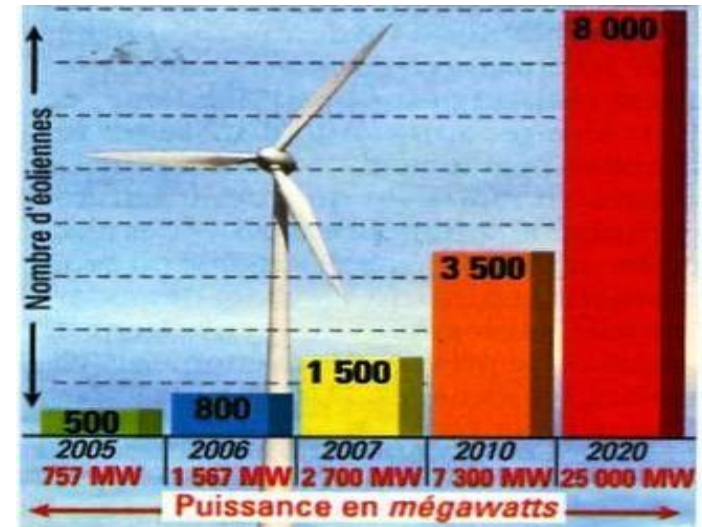
- **4500 MW** soit ~ 2800 éoliennes
- Production 6,8 TWH

- **Objectifs 2020**

- **Puissance totale: 25.000 MW**
- **+ 6000 éoliennes (dont 1000 en mer)**

- **Bilan 2020**

- **Coût d'investissement: 49,5 milliards**
- **Production annuelle d'énergie en 2020: 53 TWh**
- **Part dans la production française en 2020: 10 %**
  
- **Production: 1 EPR = 1900 éoliennes de 3 MW**

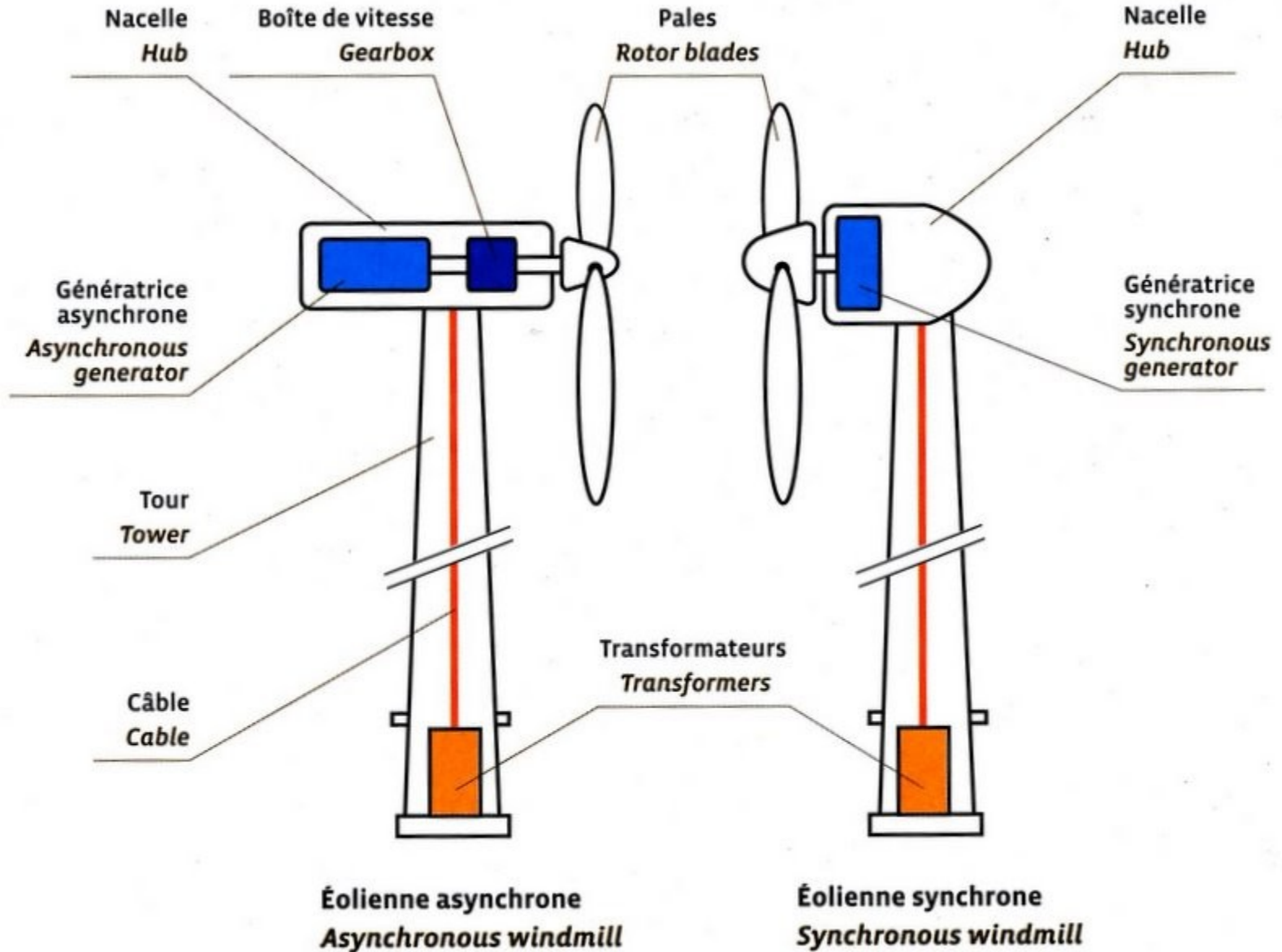


# Un peu de technique

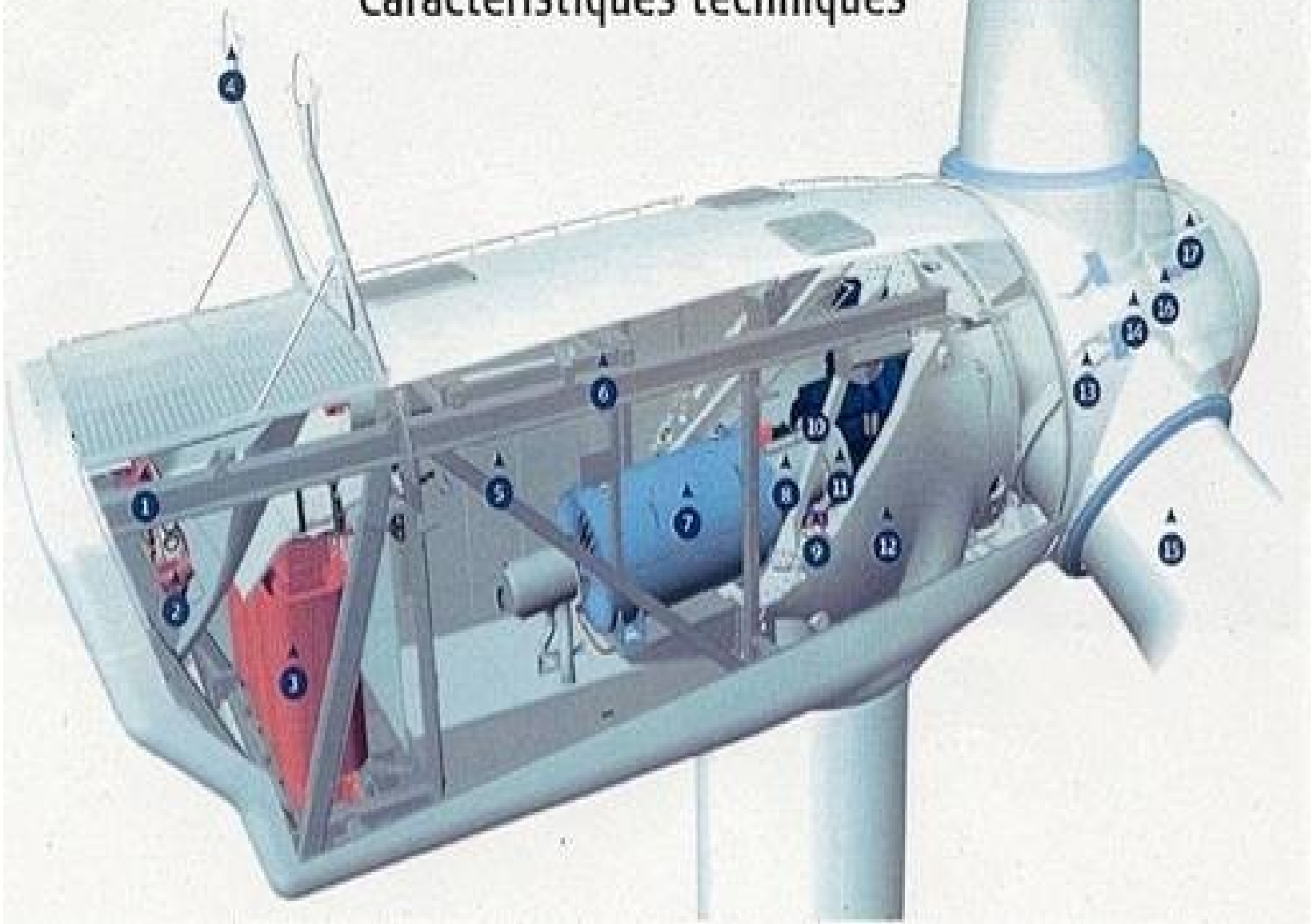
Qu'est-ce qu'une éolienne?

- Comment fonctionne t-elle
- Ses qualités et ses défauts

# DEUX GRANDS PRINCIPES



## Caractéristiques techniques

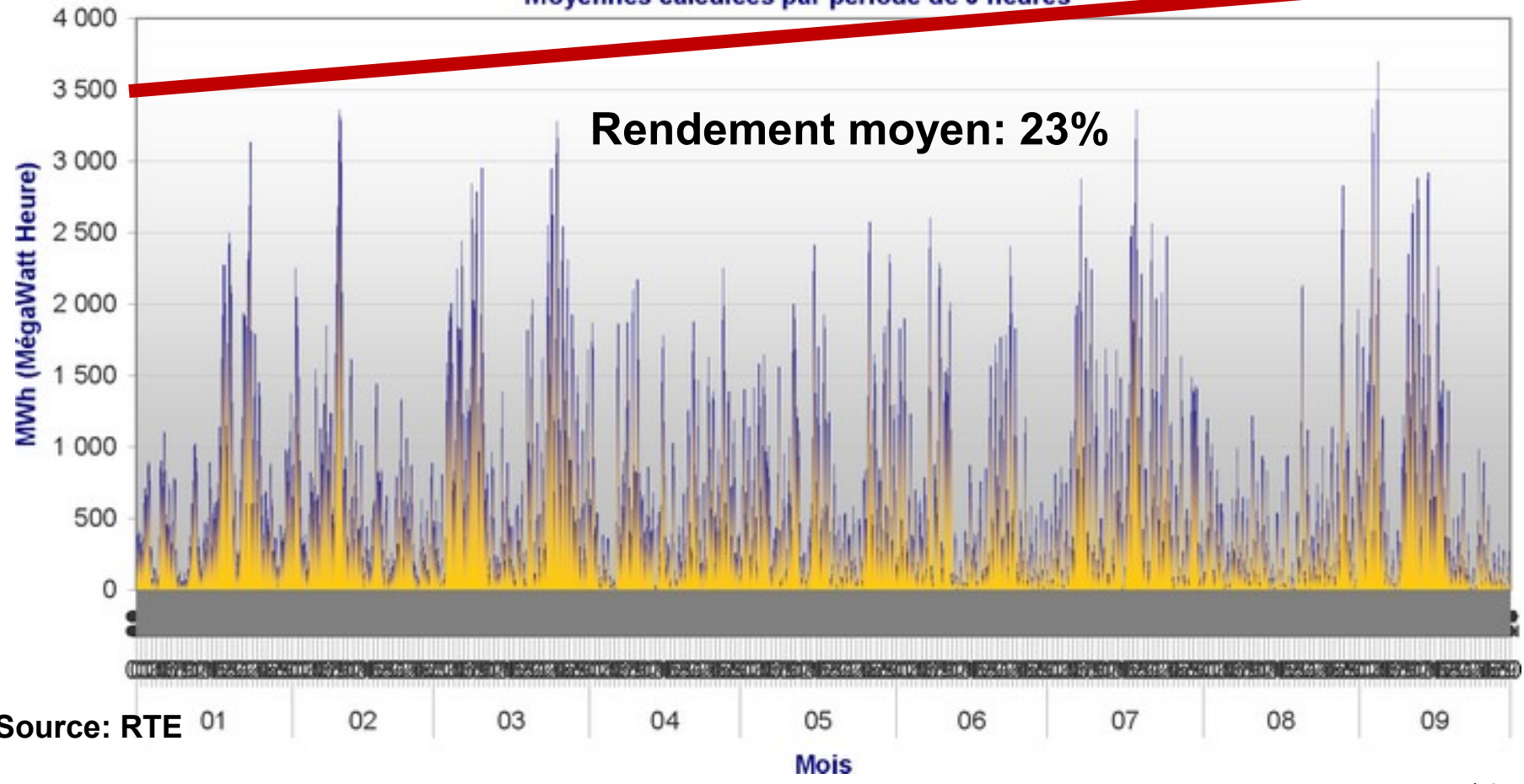


# France: variation par périodes de 3 h de janvier à septembre 2009

Intermittence et forte variabilité et production=consommation

Production électrique éolienne française - Année 2009  
Moyennes calculées par période de 3 heures

Puissance installée



Source: RTE

# La physique de l'éolienne

## Le pourquoi de la variabilité de la puissance

- **Puissance =  $\frac{1}{2}$  Masse x Vitesse de l'air<sup>2</sup>**
  - Masse traversante proportionnelle à la vitesse:  $M = k V$
  - D'où puissance proportionnelle à la vitesse au cube  
Avec  $k' = C_p/2.\rho.S$   
 $C_p$  = rendement fonction du pas des pales, de 0 à 0,5  
 $\rho = 1,22 \text{ kg/m}^3$   
 $S$  = surface balayée par les pales)  
**Puissance = k . Vitesse<sup>3</sup>**
- **La loi de Albert BETZ (Allemagne 1919) : rendement limite 59%**  
→ **Le rendement d'une éolienne moderne est de 50%,  
très proche du rendement théorique**
- **Gain de 1% pour une hauteur supplémentaire de 10 m (force du vent)**  
→ **D'où une course au diamètre et à la hauteur**

d  
eed

Storm protection  
shut-down

# RENDEMENT REEL D'UN PARC D'EOLIENNES



Source EWEA

15 km/h

32 km/h

50 km/h

90 km/h

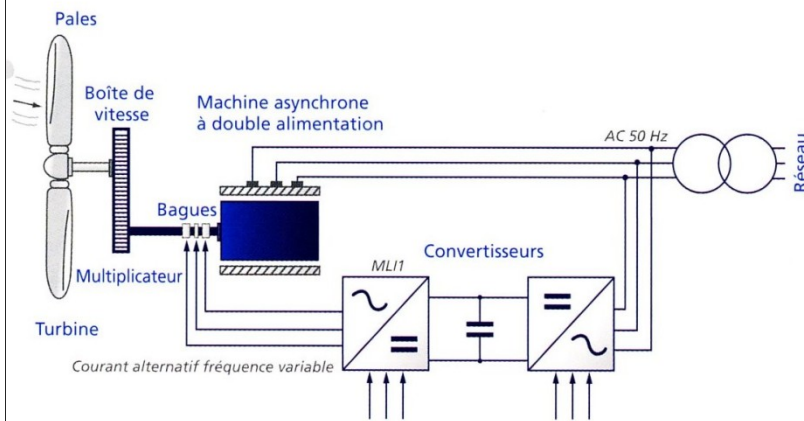


# DES PROGRES INCONTESTABLES (fréquence/tension)

## Performance des technologies

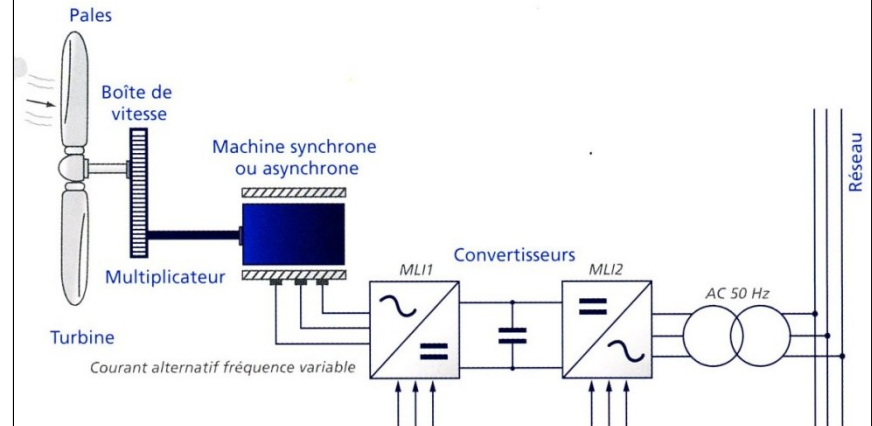
Réglage	Machine asynchrone	Machine asynchrone à double alimentation	Machine synchrone à électronique de puissance
Tenue en fréquence et tension	★	★ ★	★ ★ ★
Tenue aux défauts	★	★ ★	★ ★ ★
Réglage de tension	★	★ ★	★ ★ ★
Réglage de fréquence	★	★ ★	★ ★ ★
Contrôle de puissance (rampe)	★ ★	★ ★	★ ★ ★

### Machine asynchrone à double alimentation



(source : SER)

### Machine synchrone à électronique de puissance

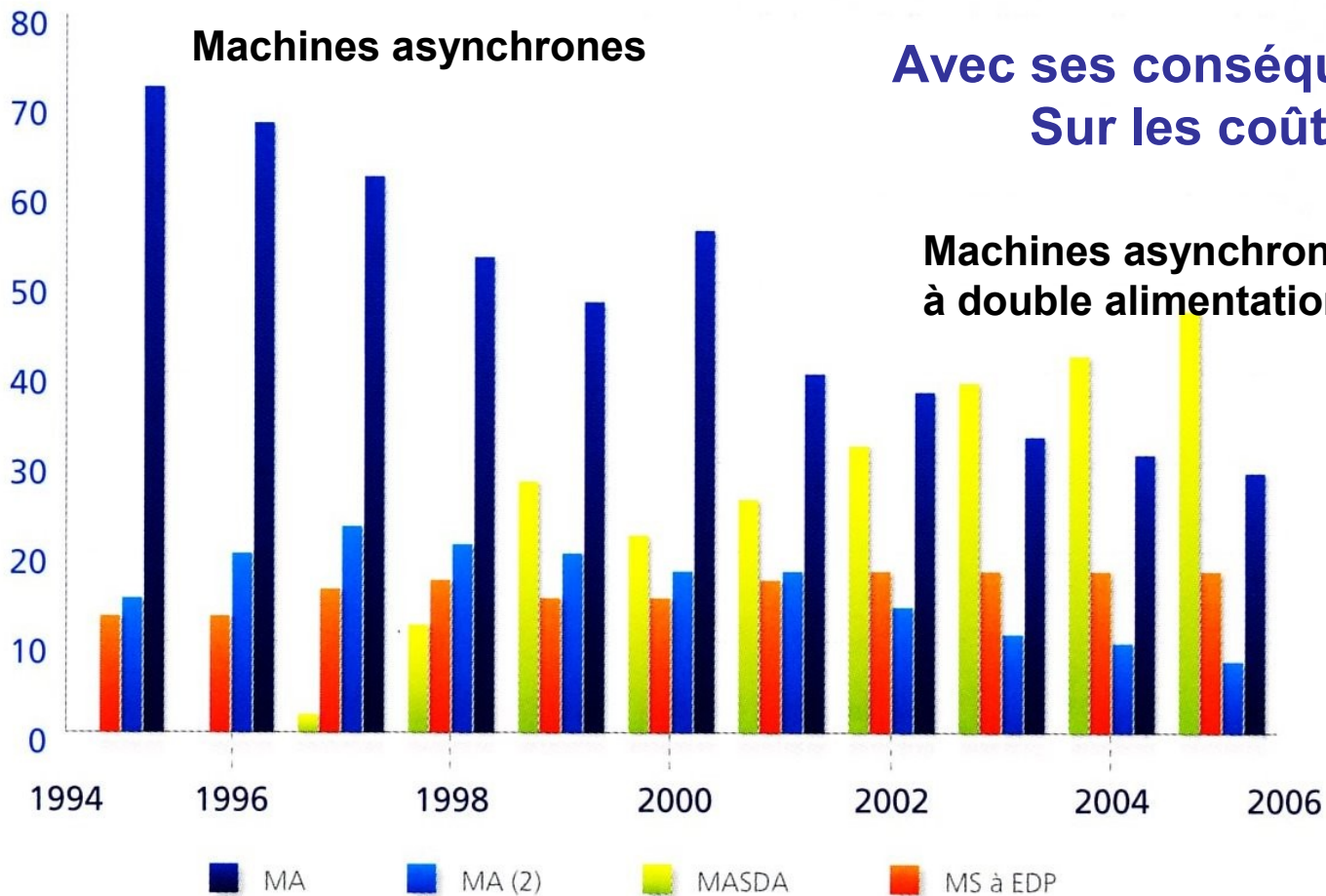


(source : SER)

# Evolution des technologies

(source : 2008 IEEE Workshop On Wind Power Integration)

Part des différentes technologies dans la capacité installée totale



MA : machines asynchrones

MA (2) : machines asynchrones à rotor bobiné

MASDA : machines asynchrones à double alimentation

MS à EDP : machines synchrones à électronique de puissance

# Qu'est-ce qu'une éolienne moderne?

- De l'électronique de puissance
- Des matériaux composites
- De la mécanique de précision

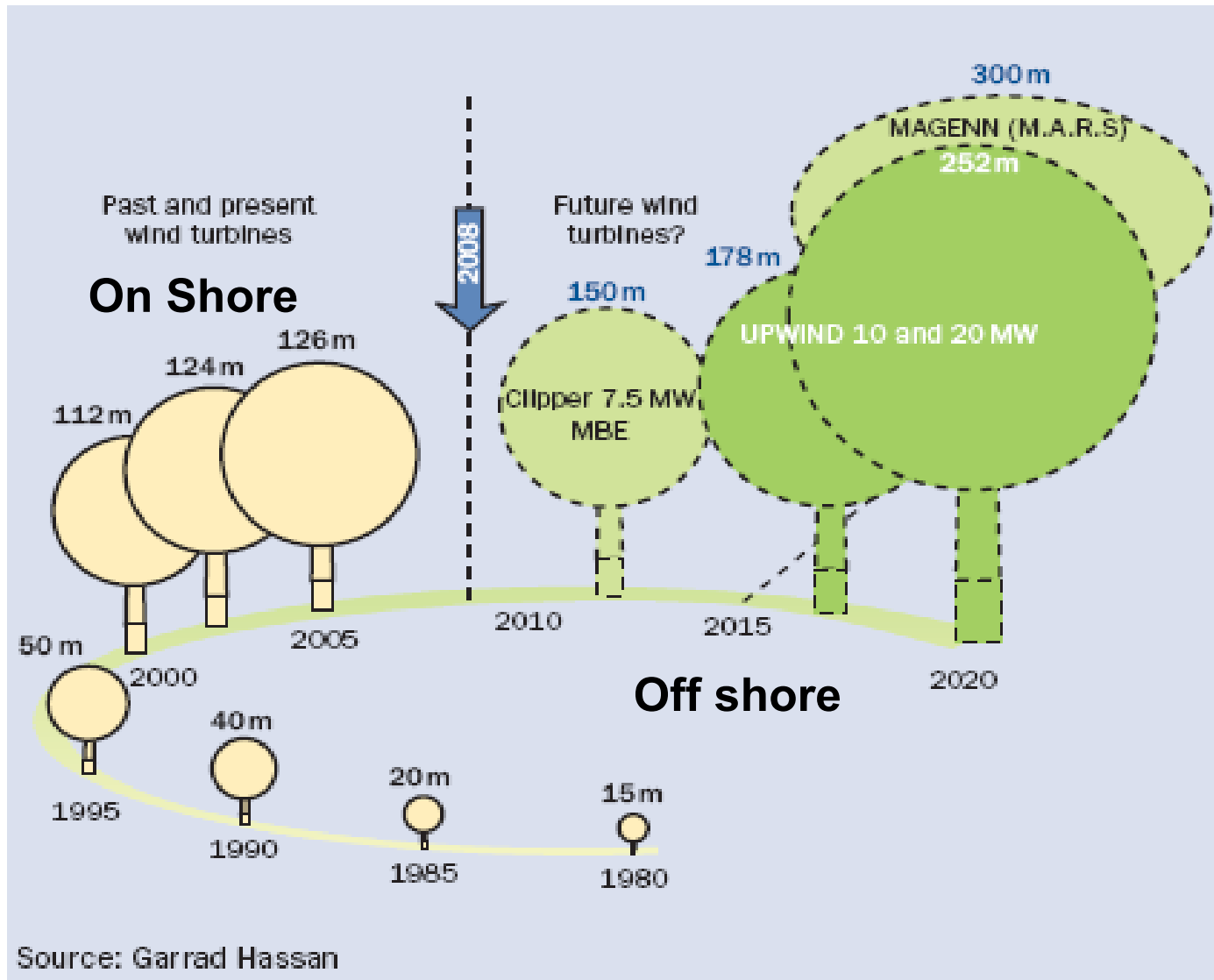
Technologies  
récentes

## Mais une prise en compte difficile :

- *Impact sur le fonctionnement des réseaux*
- *Couplage précis au réseau*
- *stockage « horaire » et variabilité de la puissance*
- *Une contribution au risque de black-out*

**QUELQUES IMAGES  
UNE REALITE INDUSTRIELLE  
UNE INDUSTRIE MATURE**

# Evolution du diamètre des éoliennes



ergy  
line

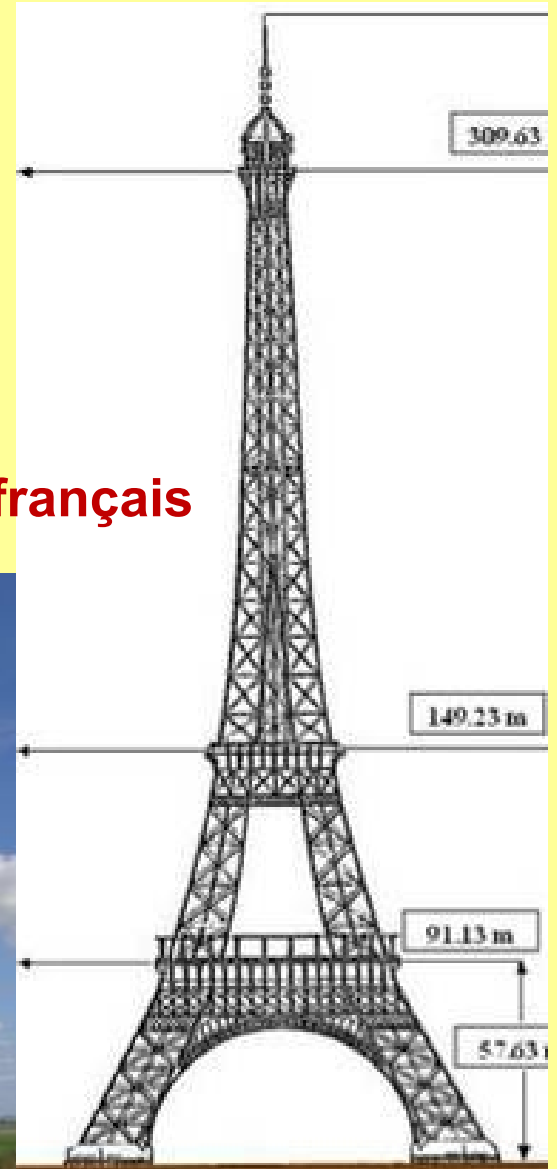
200

indfarm

Vu par un américain

Photo: R. Thresher

Vu par un français



# Quelques chiffres

## Taille moyenne des éoliennes terrestres installées

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

**→ Tendance vers des éoliennes de 3MW on shore  
et 5/7 MW off shore**

Source: EurObserv'Er 2009

# Eolienne terrestre de 3 MW

- **Hauteur totale 135 m**
- **Diamètre pales: 90 m**
- **Hauteur mât: 90 m**
- **Poids total: 320t**
- **Fondations: 500 t**





# P = 5 MW Offshore

**Nacelle**  
**LxHxl: =18x6x6**  
**Poids= 290 t**

**Hélice**  
**D=126 m**  
**Poids=120 t**  
**S = 12500 m<sup>2</sup>**

**Mât**  
**H=114m D=6m**  
**Poids=750t**

**Total 1160 t**  
**+ fondations**  
**2000/3000 t**

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	<b>Modular structure of the nacelle:</b> - 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 m <sup>2</sup>
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



# PUISSANCE : JUSQU'OUÛ 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.

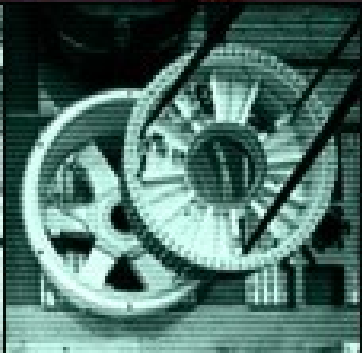
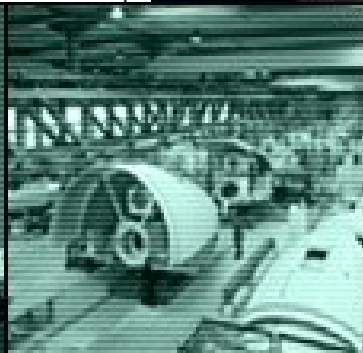
# Génératrice synchrone

## ENERCON 6 MW





# USINE ENERCON



# L'émergence des éoliennes marines (offshore) entraînée par de fortes oppositions locales



**Moins de monde**

- **Plus de vent**
- **Une propriété « commune »**

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

# Les éoliennes off shore en Europe

## Situation fin 2009

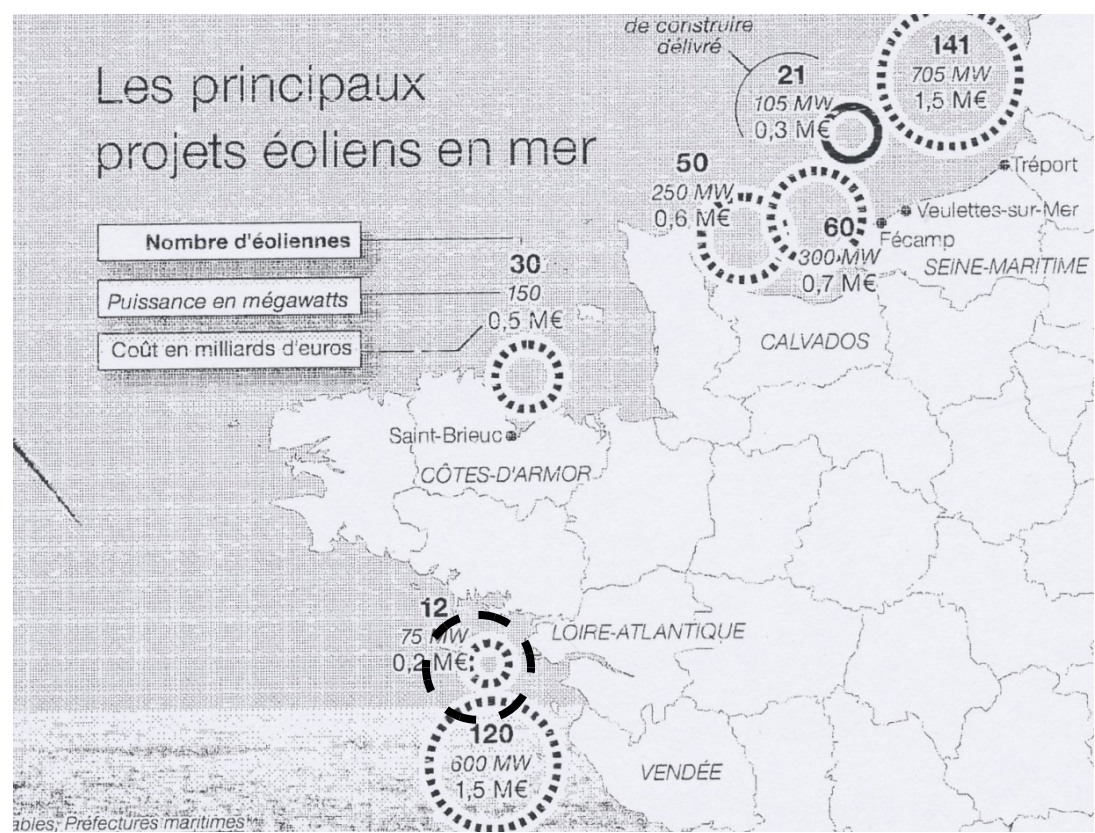
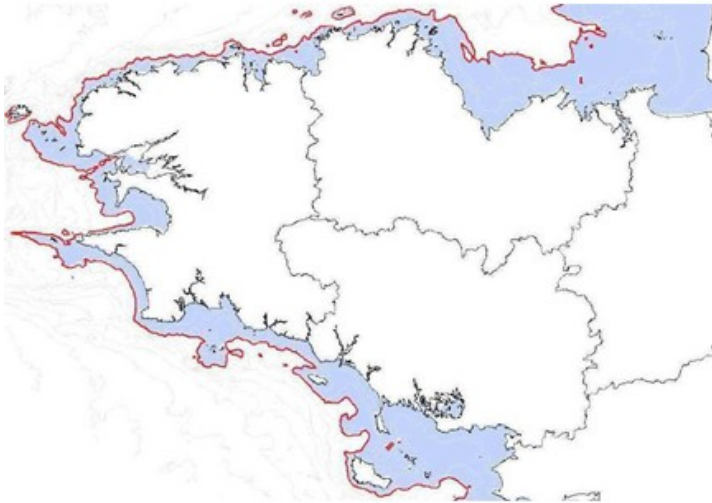
- Opérationnels: 1933 MW (2,6%)
- En construction: 2750 MW
- En projet: 5600 MW

## Des parcs géants

- Greater Gabbard (UK) 500 MW
- Gode wind (Allemagne): 800 MW
- London Array (UK) 1000 MW
- YEU - NOIRMOUTIER: 600 MW
- LE CROIZIC: 300/400 MW

# Les projets off shore français

(en rouge : limite des 30 mètres de fond)



## Inventaire des sites par la préfecture maritime

- voies maritimes
- sites naturels (Natura 2000, réserves naturelles)
- pêche, plaisance, cultures marines
- servitudes de sécurité maritime

Le milieu marin appartient à tous

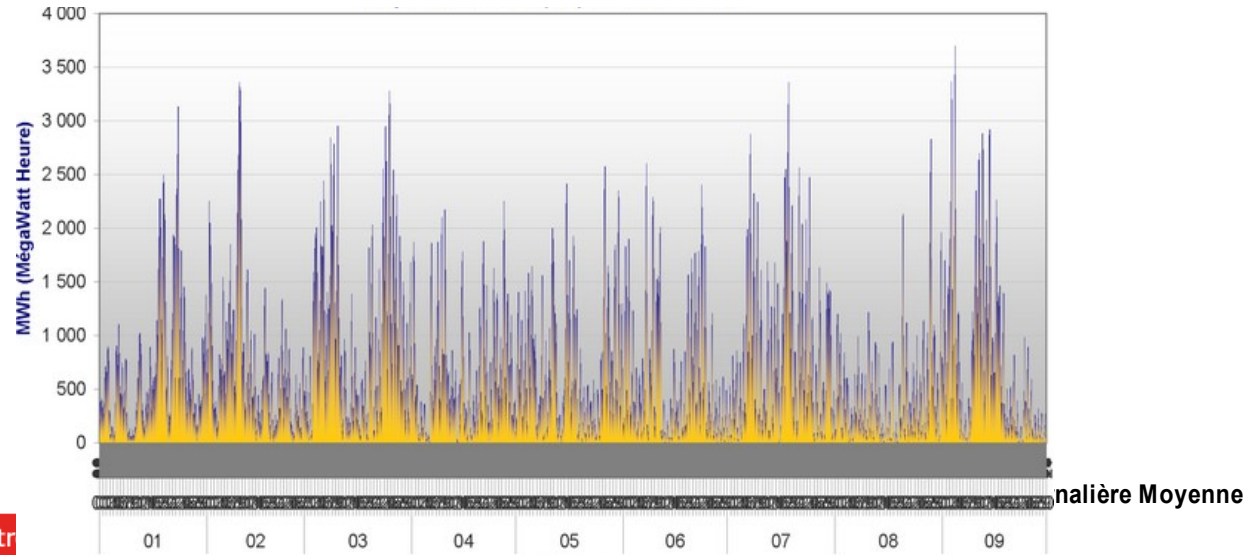
# **LE FONCTIONNEMENT DES EOLIENNES**

**UNE REALITE DELICATE  
(et décevante?)**



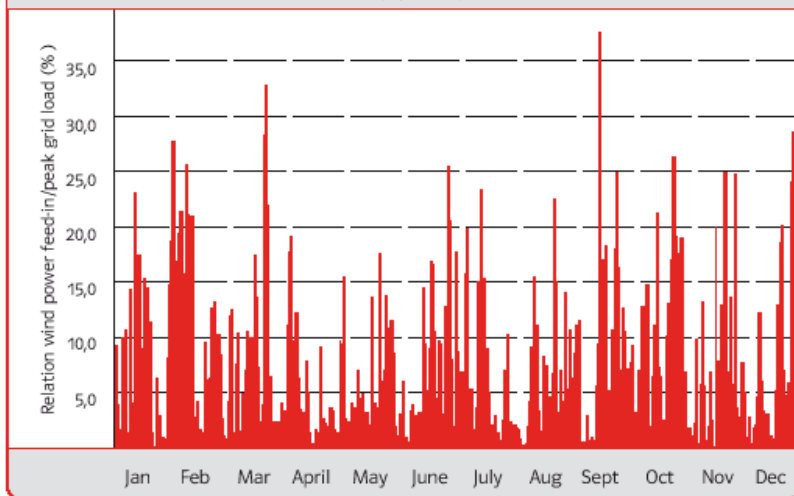
# C'est « presque » pareil partout!

**France 2009**  
**4500 MW**  
**23%**

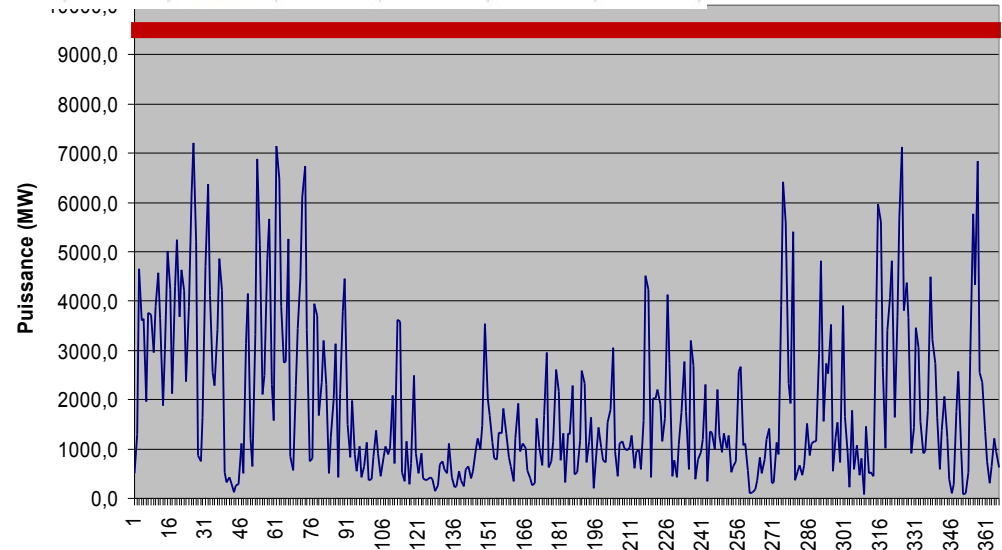


### 3. Wind power feed-in in the E.ON control

2004 between 0.2 and 38% of daily peak grid load



**E-ON: 7500 MW, 21%**



**Vattenfall: 9400 MW, 24%**

# Europe: rendement des parcs éoliens (2009)

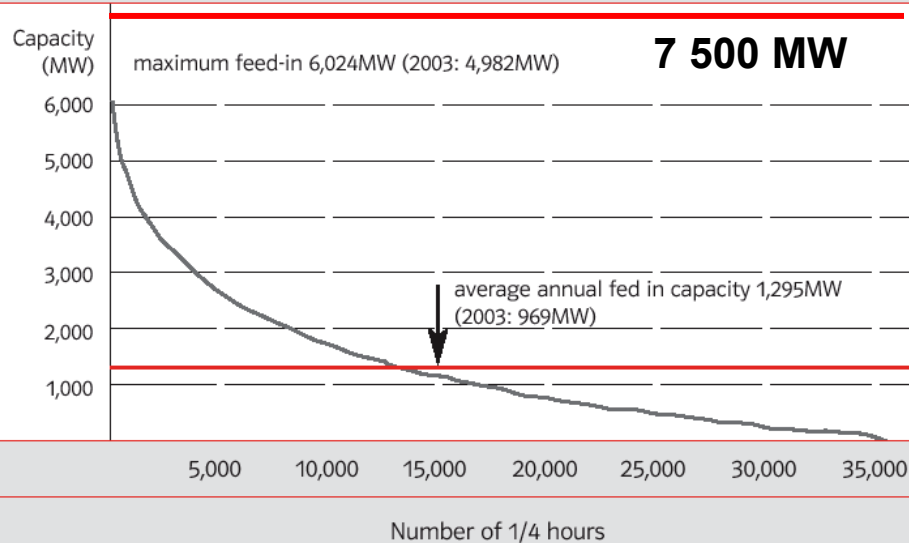
	P fin 2008	P fin 2009	P moyen 2009 MW	Production GWh	Rendement %
Allemagne	23896	25777	24837	37500	17,2
Espagne	16689	19148	17919	36188	23,1
Italie	3736	4850	4293	6087	16,2
<b>France</b>	<b>3542</b>	<b>4521</b>	<b>4032</b>	<b>7800</b>	<b>22,1</b>
UK	3406	4050	3728	9259	28,4
Portugal	2862	3535	3199	6639	23,7
Danemark	3162	3480	3321	6716	23,1
Hollande	2116	2220	2168	4800	25,3
Suede	1048	1560	1304	2519	22,1
Irlande	1027	1260	1144	2957	29,5
Grèce	985	1087	1036	2107	23,2
Belgique	392	563	478	834	19,9
<b>Europe</b>	<b>65172</b>	<b>74800</b>	<b>69986</b>	<b>128504</b>	<b>21,0</b>

Source: EurObserv'Er 2009

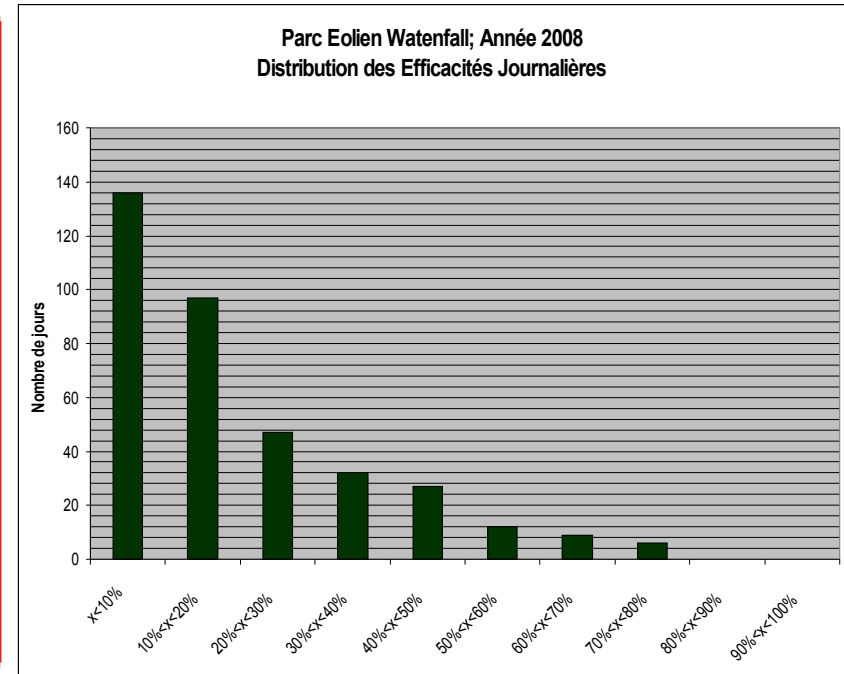
# Le rendement de grands parcs éoliens européens

## 5. Annual curve

Wind power feed-in 2004 in the E.ON control area



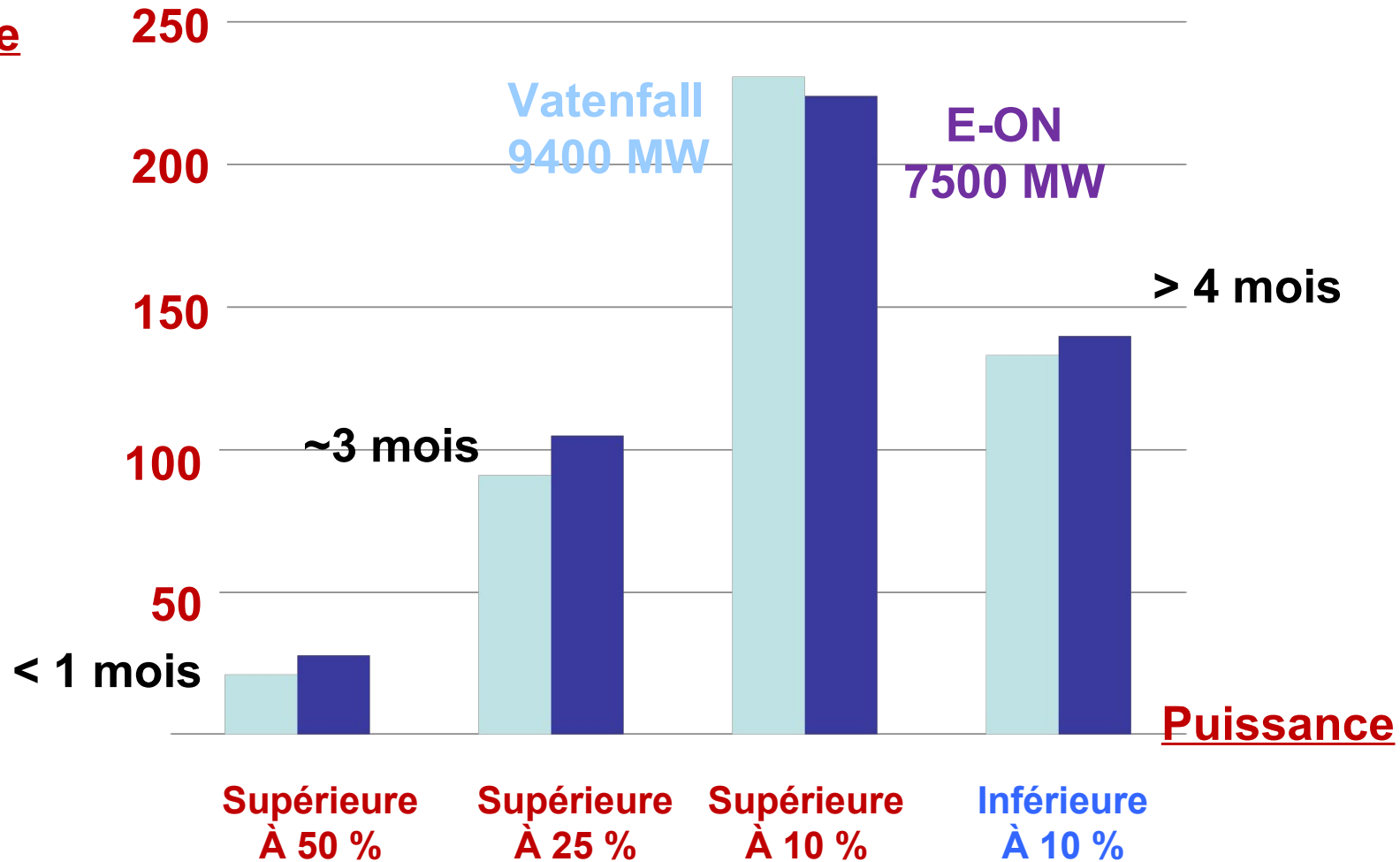
**E-ON: 7500 MW 2004**



**Vatenfall: 9400 MW 2008**

# La vraie puissance d'un parc d'éoliennes pendant une année (jours équivalent)

Nombre de jours



## Variation annuelle

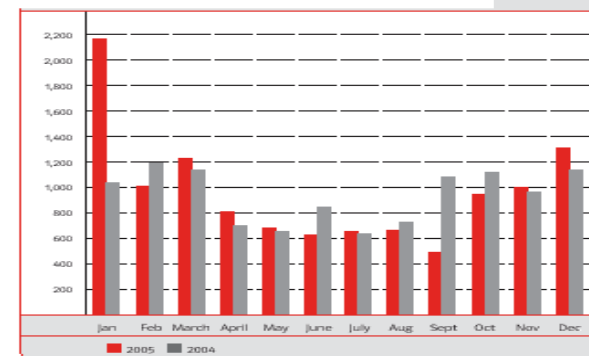
## variation mensuelle

(EWEA)

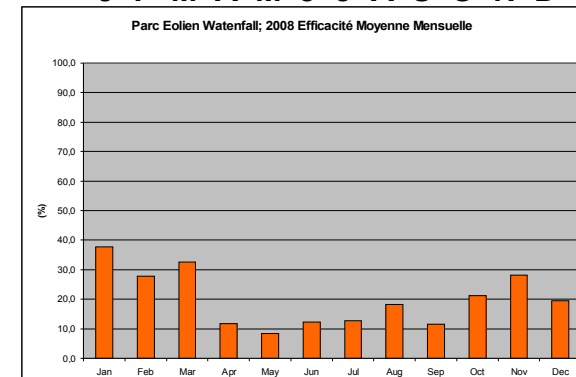
J F M A M J J A S O N D

Une grande variabilité  
annuelle et mensuelle

E-ON 2005/2004: 7500 MW

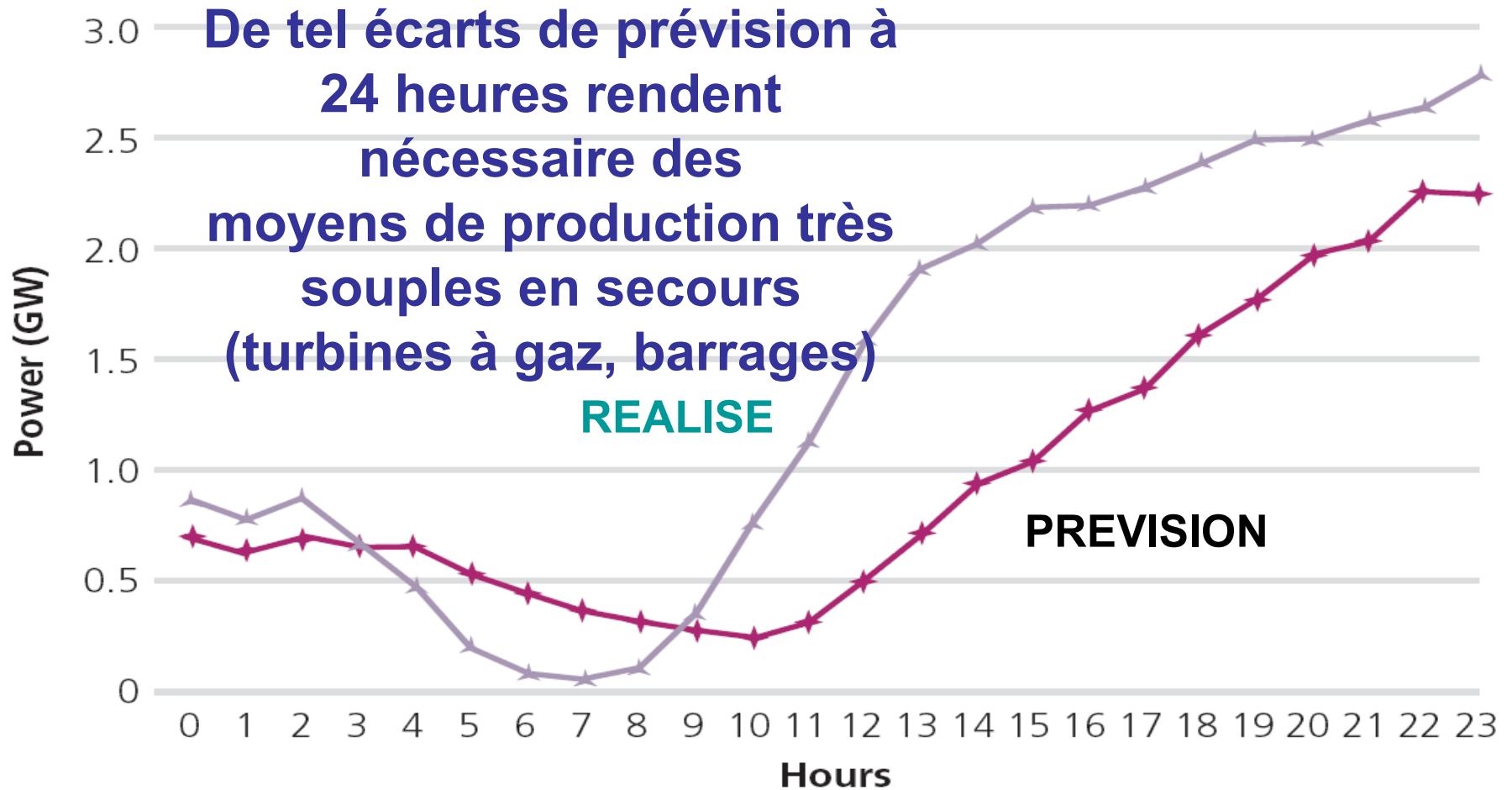


J F M A M J J A S O N D



Vatenfall 2008: 9500 MW

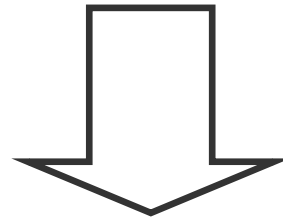
**Figure 14: Time shift as a typical meteorological forecast error**



- Power observed
- Day-Ahead Forecast

# Les particularités de la production éolienne

- Un accroissement rapide;
- Mi-2009, plus de 420 sites répartis sur le territoire Français avec 98% de la production raccordés sur les réseaux de distribution (HTA) ;
- Une forte variabilité de la production liée à la météo ;
- En régime perturbé (électrique / météo), des comportements des machines différents en fonction des technologies.



**Un contexte nouveau  
pour l'exploitation du réseau électrique de RTE**

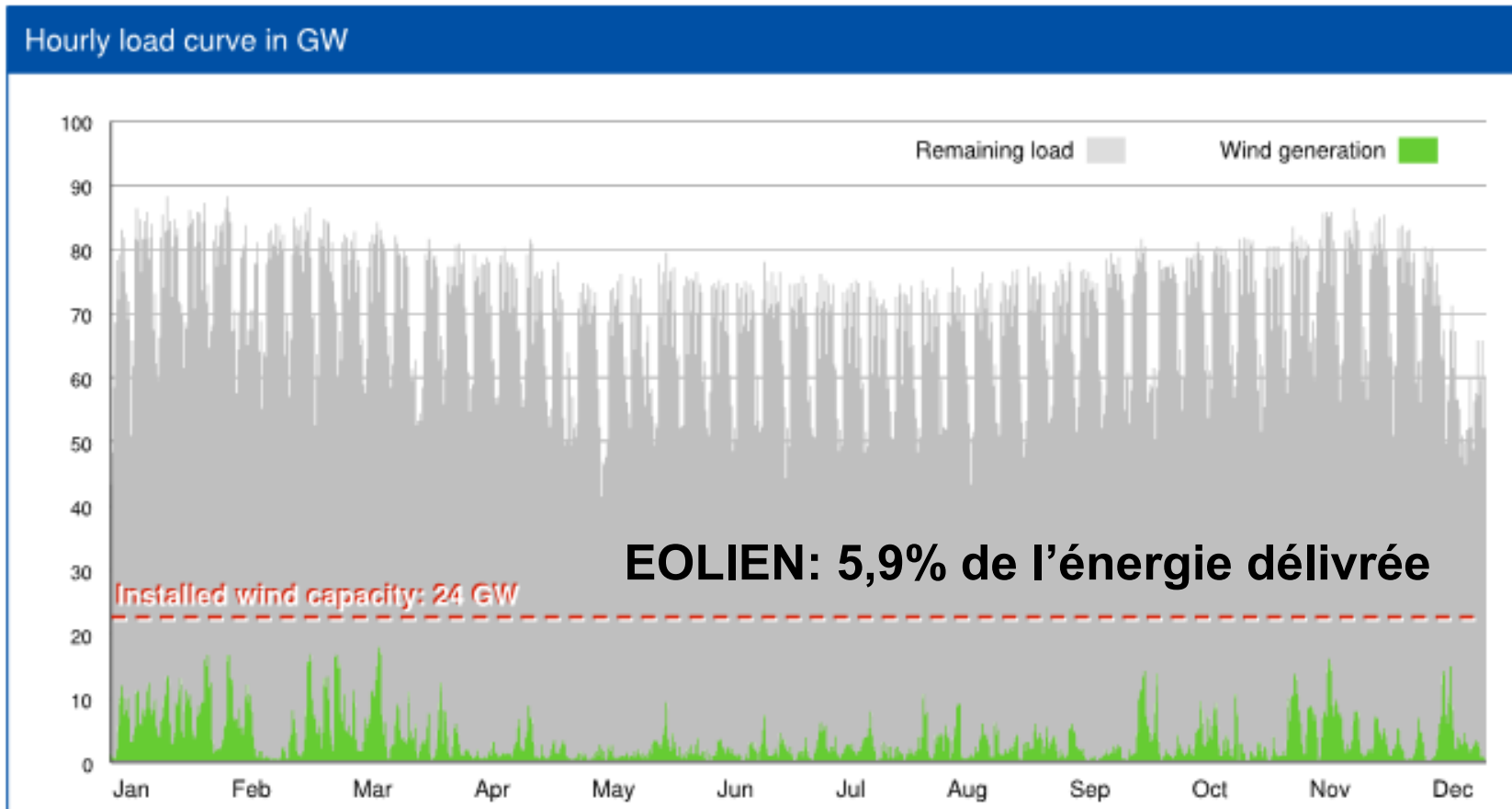
# **L'EXPERIENCE ALLEMANDE**

## **Une référence indiscutable**

**RWE: Power generation in Europe, facts & trends, December 2009**



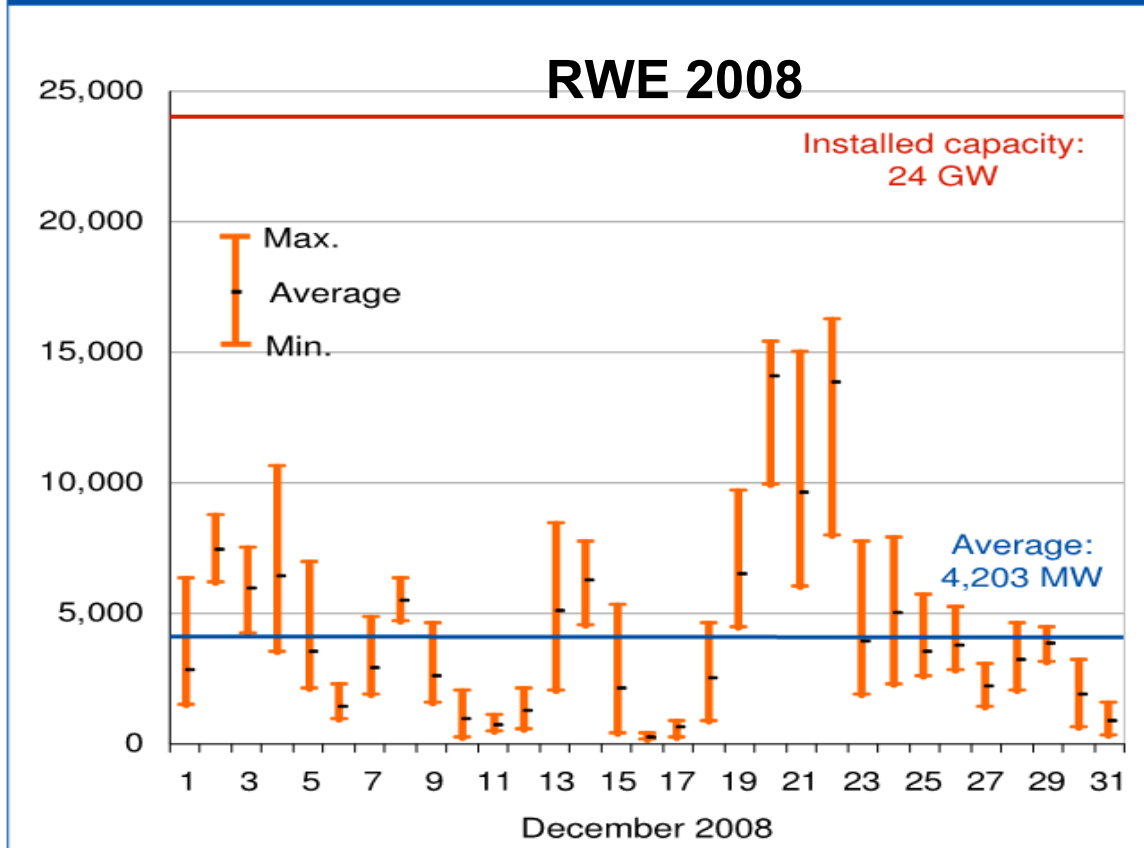
# L'exemple allemand en 2008: contribution de l'éolien à la puissance injectée sur le réseau (puissance éolienne de 24 GW, soit l'objectif 2020 de la France)



Source: RWE.



## High volatility of load profile of wind capacity in Germany [MW]

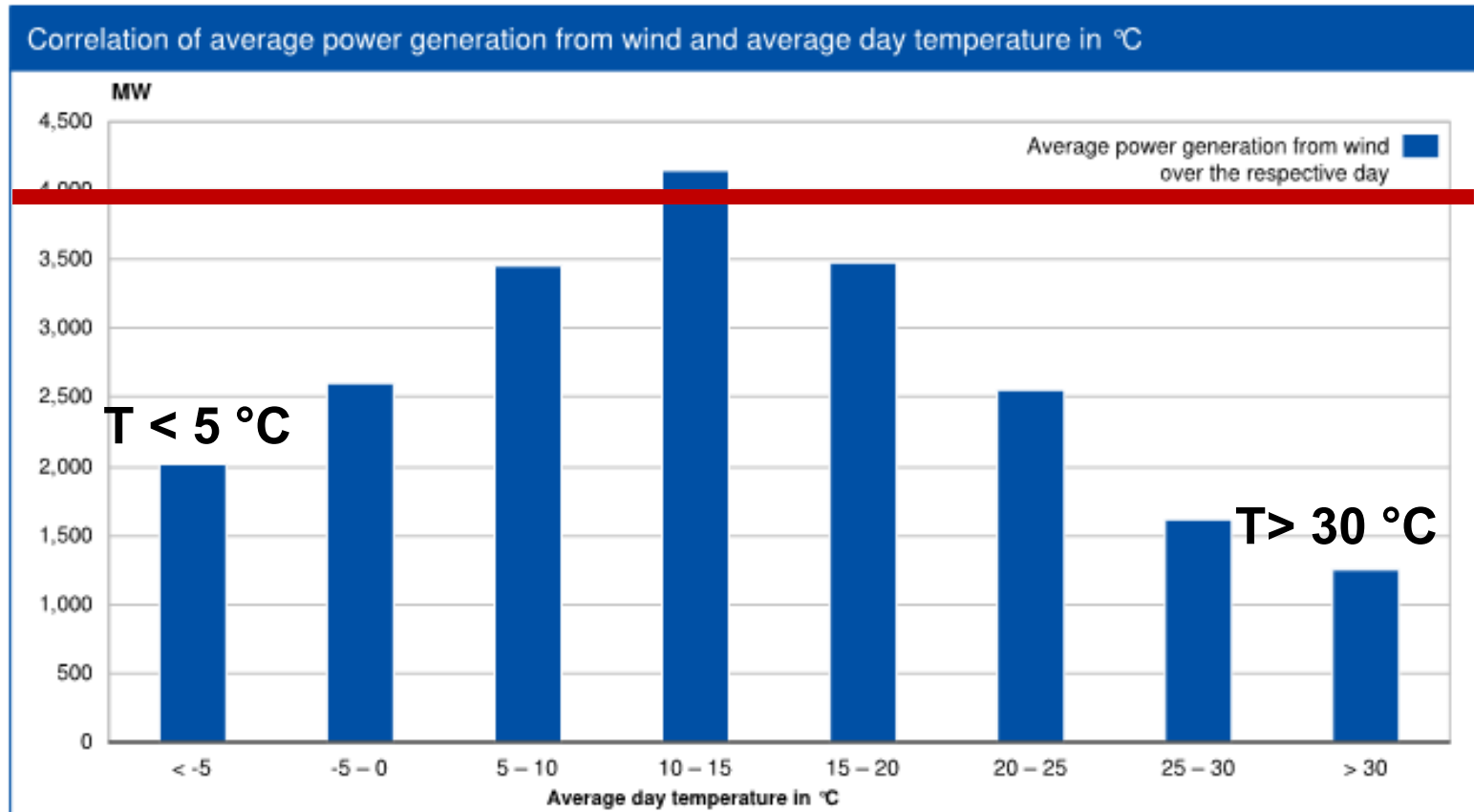


**Un mois de grand froid:**

- rendement: 18%
- variabilité journalière: facteur  $> 2$

Not only is wind volatile, but most of the time it is not there when it is urgently needed ...

4000  
24000

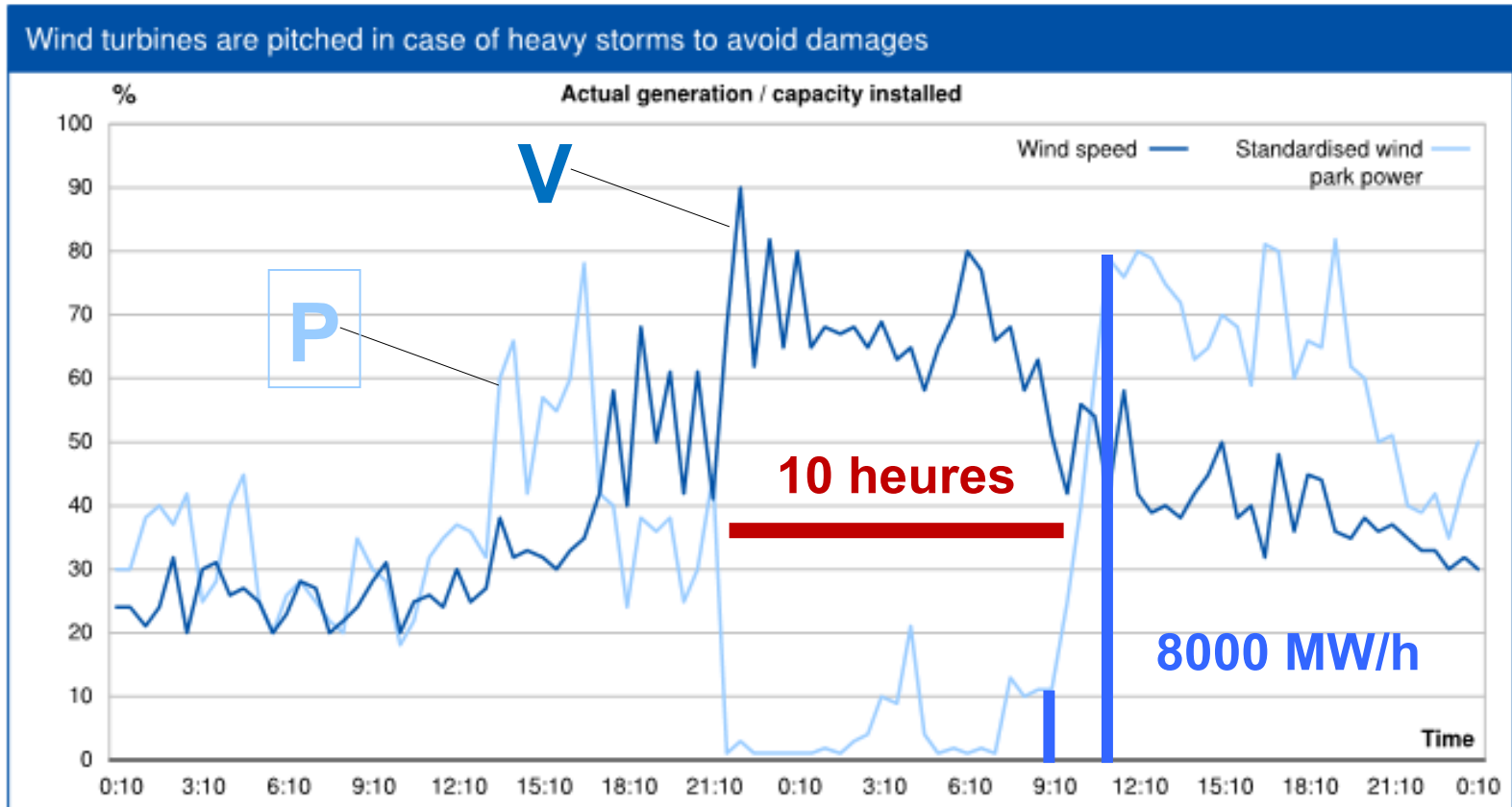


**LA GESTION DES GRANDS PARCS REPOSE SUR LES ECHANGES INTERNATIONNAUX**

# TROP DE VENT = PAS D'ELECTRICITE

... and more wind doesn't always result in more power generation

Illustrative

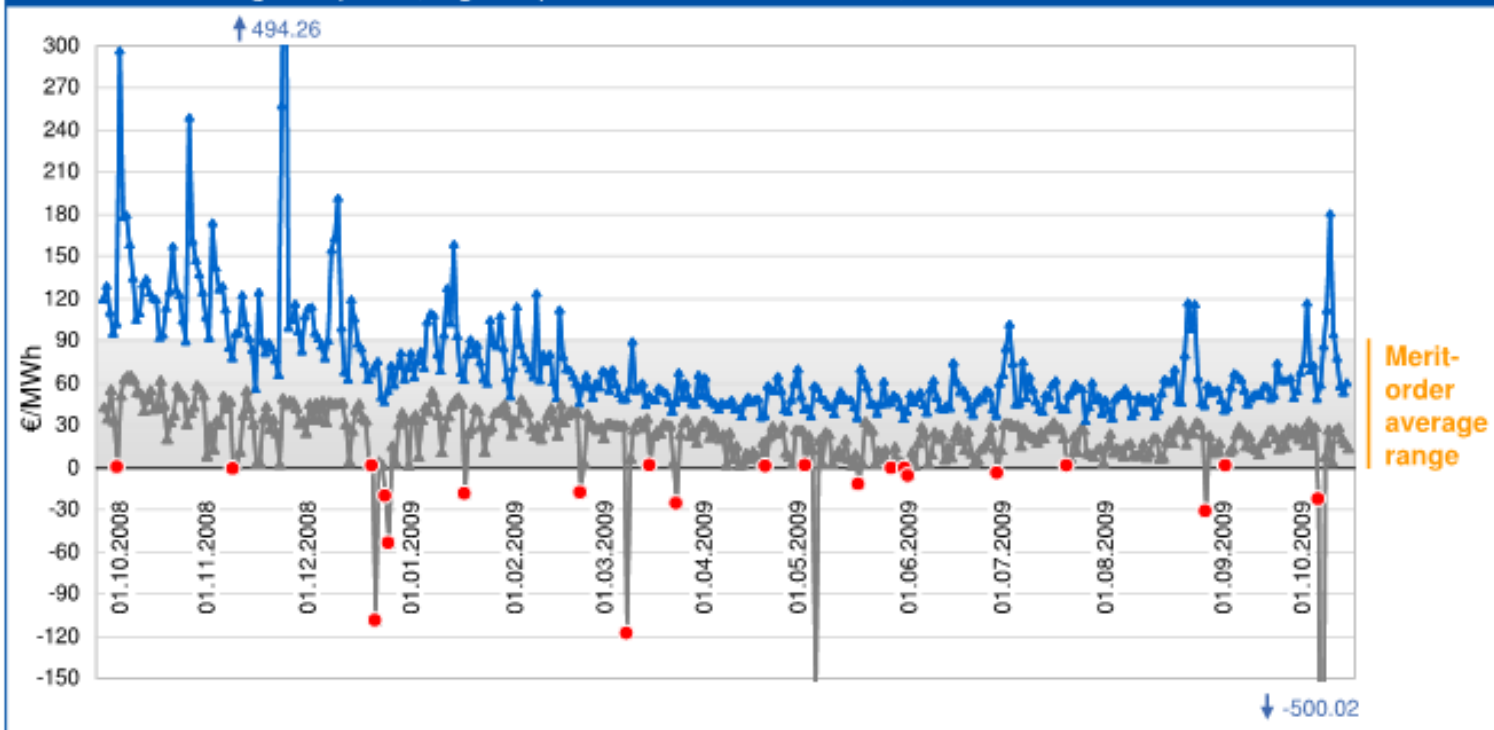


Source: Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, 2008.

## DES PRIX QUI FLUCTUENT DE - 500 à + 500 €/MWh

Wind and solar together dramatically change the need for flexibility – in the short term ...

Growing proportion of renewables leads to higher price volatility. October 2008 to October 2009:  
60 hours with negative prices; highest price reached: +€500/MWh, lowest -€500/MWh



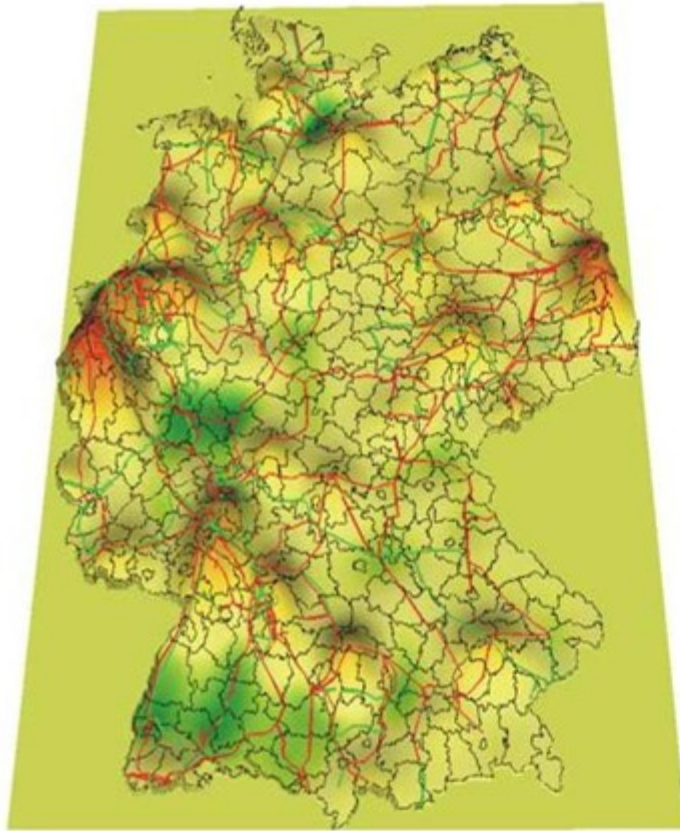
—▲— Daily maximum price —●— Daily minimum price (indicated in red when negative)

Source: EEX spot prices.



# Regional supply-demand balance 2008

# Regional supply-demand balance 2030



-1,000 0 3,000 6,000 9,000

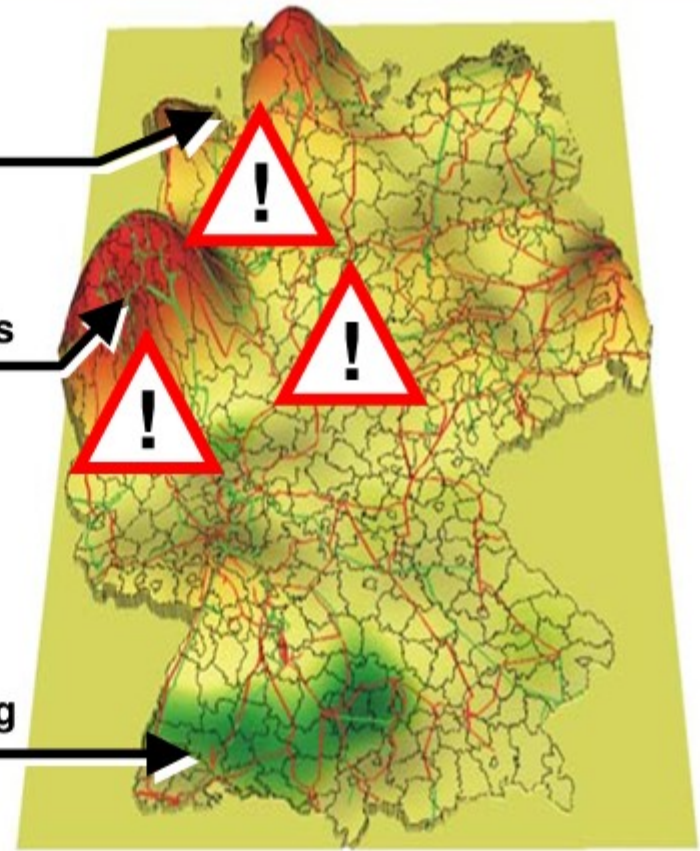


Capacity (MW)

Offshore wind

Conventional new-builds

Nuclear decommissioning



-1,000 0 5,000 10,000 15,000



Capacity (MW)

**Et en France?**

# France: septembre 2009 par tranches de 3 heures

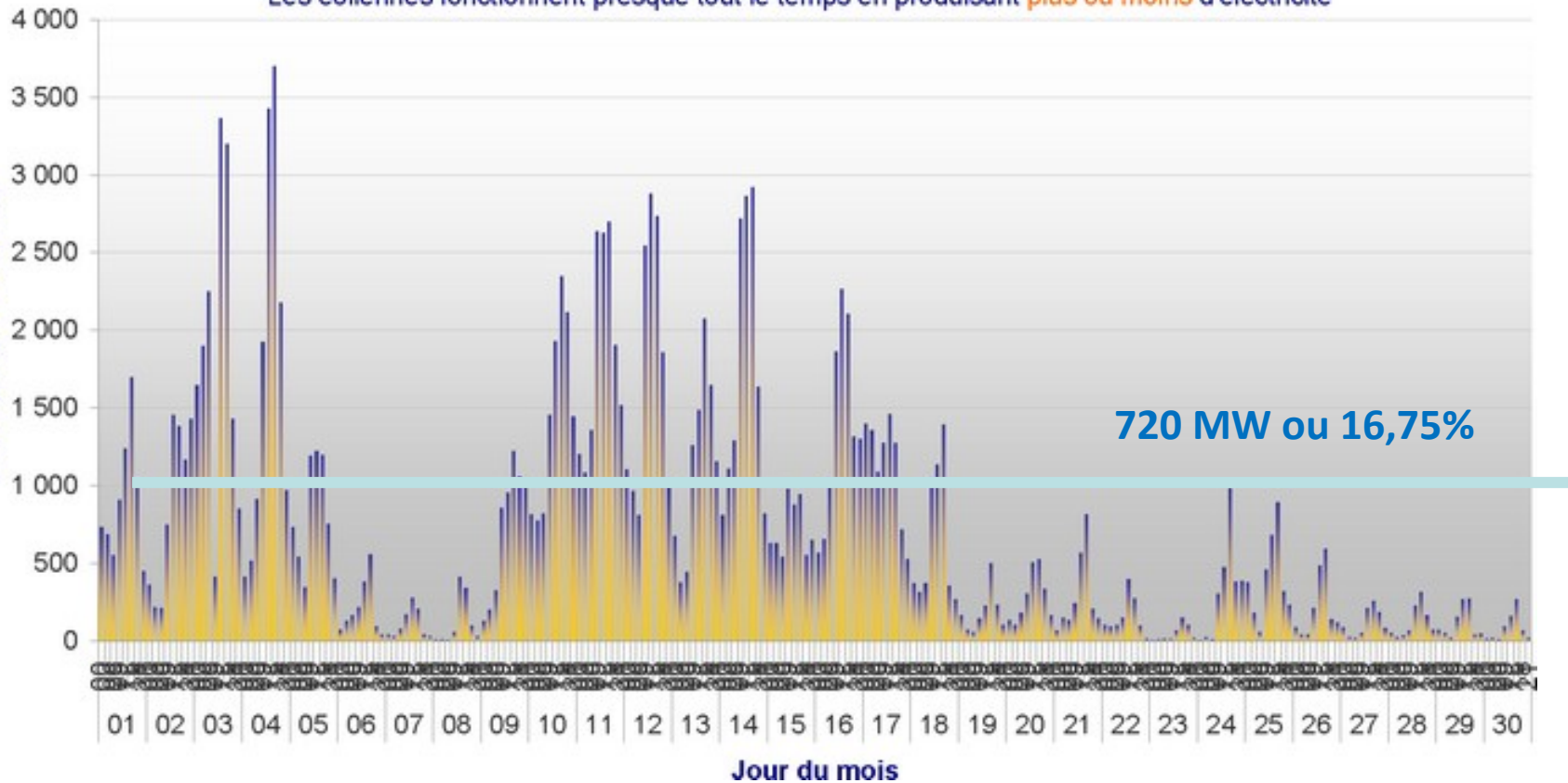
MW

Production électrique **en temps réel** des 4350 MW éolien français - Septembre 2009

Production du mois = 518 820 MWh

Taux de fonctionnement = 90%

Les éoliennes fonctionnent presque tout le temps en produisant **plus ou moins** d'électricité





# Variabilité de la puissance éolienne (tranches de 3 h)

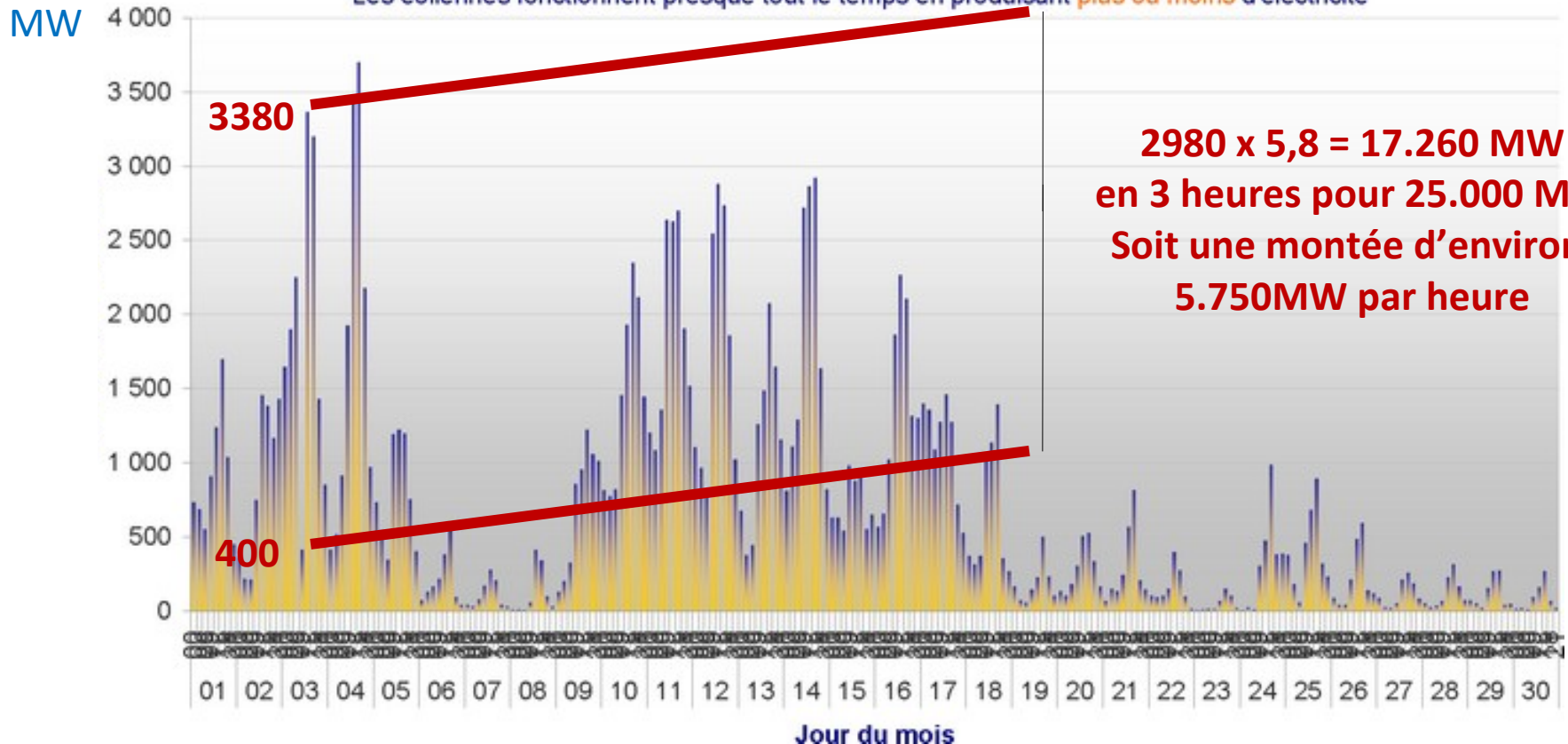
## Projection sur 2020: P installée = 25.000 MW

Production électrique **en temps réel** des 4350 MW éolien français - Septembre 2009

Production du mois = 518 820 MWh

Taux de fonctionnement = 90%

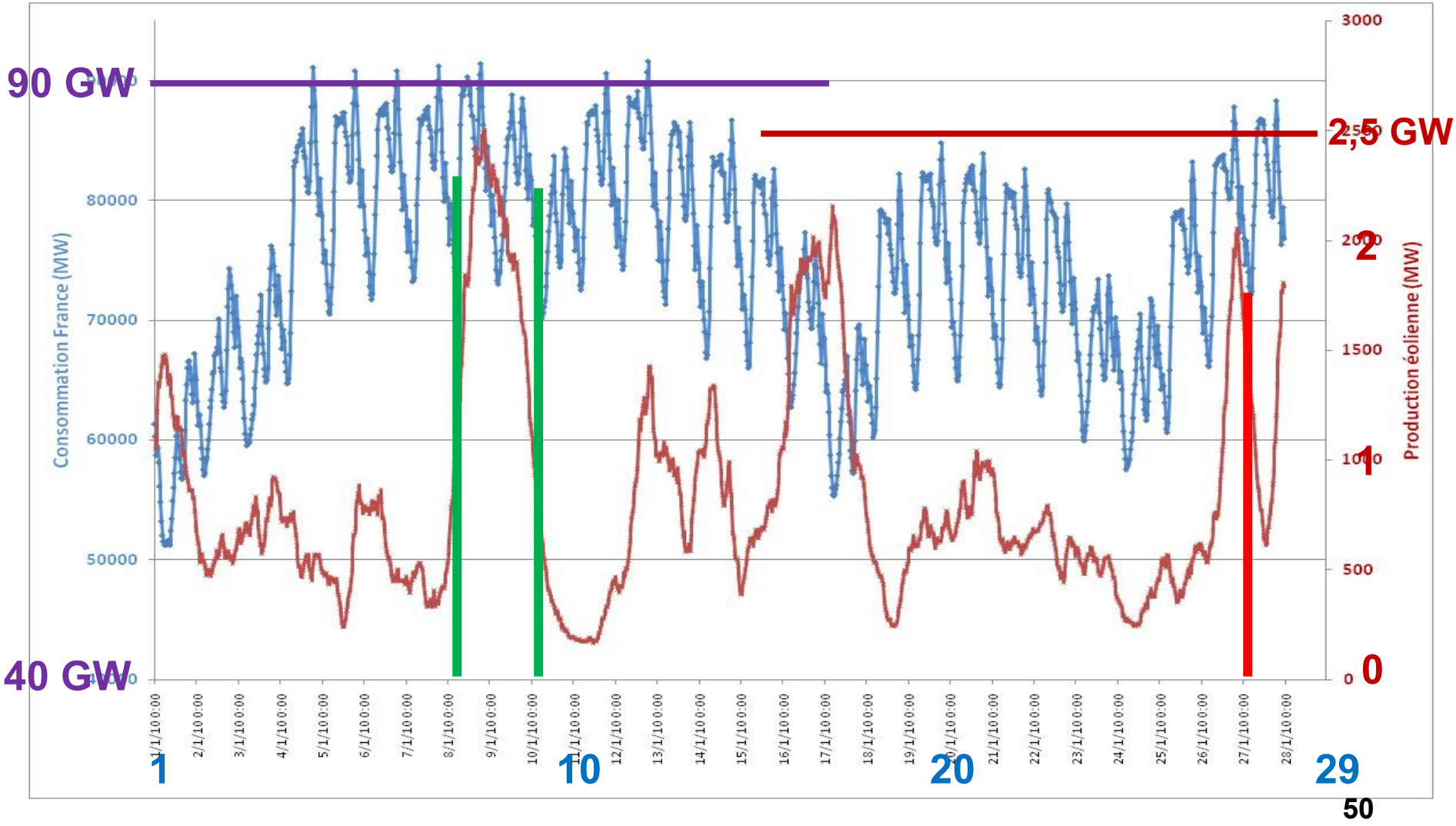
Les éoliennes fonctionnent presque tout le temps en produisant **plus ou moins** d'électricité



# Peu de vent en périodes climatiques extrêmes

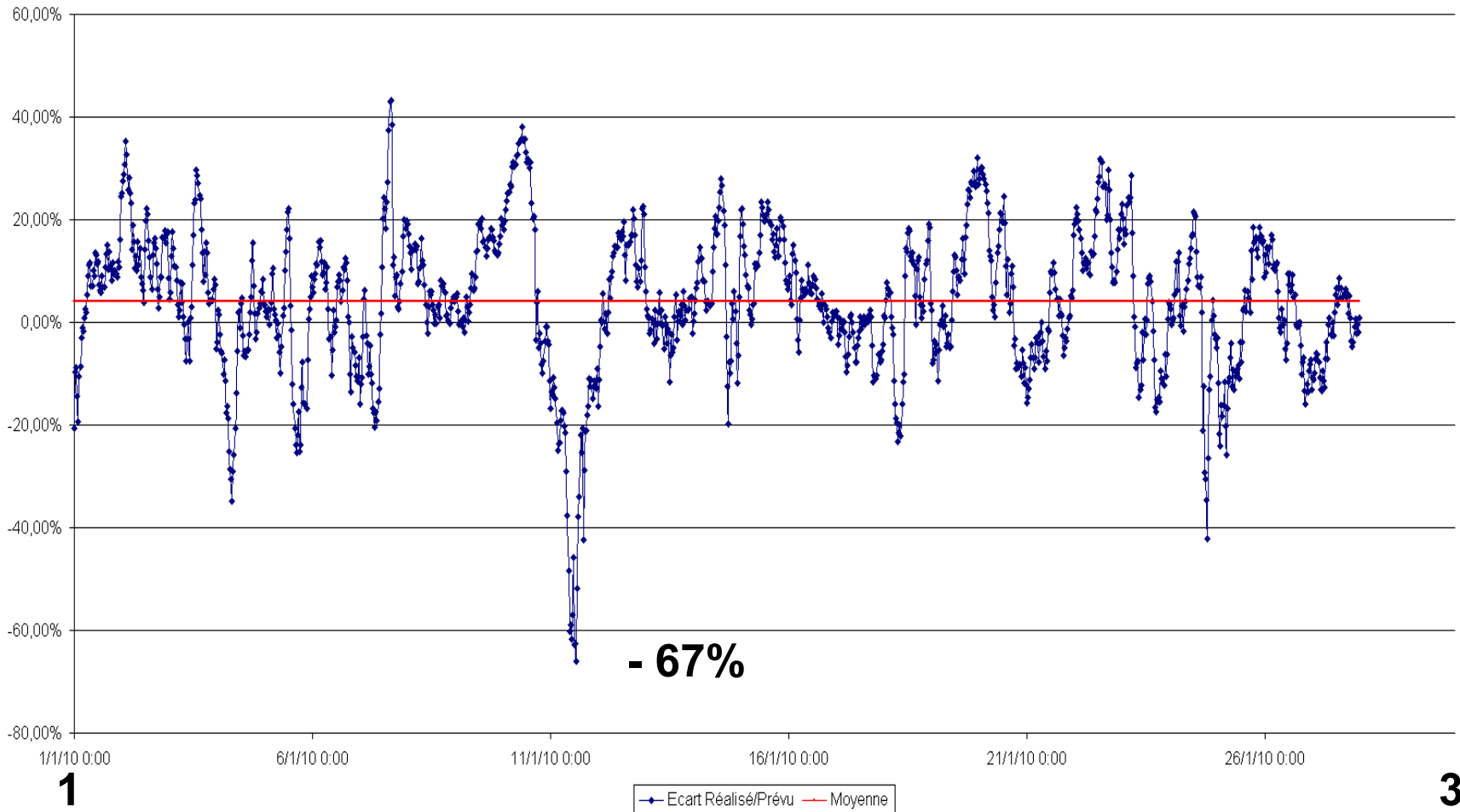
## C'est une énergie « fatale » qui requiert des moyens de secours

Janvier 2010: P éolienne 4,5 GW



# Ecart réalisé /prévu (janvier 2010)

Ecart Réalisé/Prévu



- 
- La sécurité de l'équilibre offre-demande réclame de disposer à tout moment de réserves de production disponibles rapidement.

« En ajoutant un aléa supplémentaire au système électrique, l'éolien accroît significativement le besoin de puissance en réserve à partir de 5000 MW installés ».

**Le volume de réserves supplémentaires induit par l'éolien dépend de l'aptitude à maîtriser la prévision de la production éolienne.**

- La sûreté du Système électrique exige la maîtrise à tout moment des flux sur le réseau de transport.

« Les délais de construction des ouvrages du réseau, peuvent conduire à des congestions sur les lignes électriques ».

**La maîtrise des transits pour respecter les règles de sécurité et de sûreté dépend de l'aptitude à agir rapidement sur la production éolienne.**

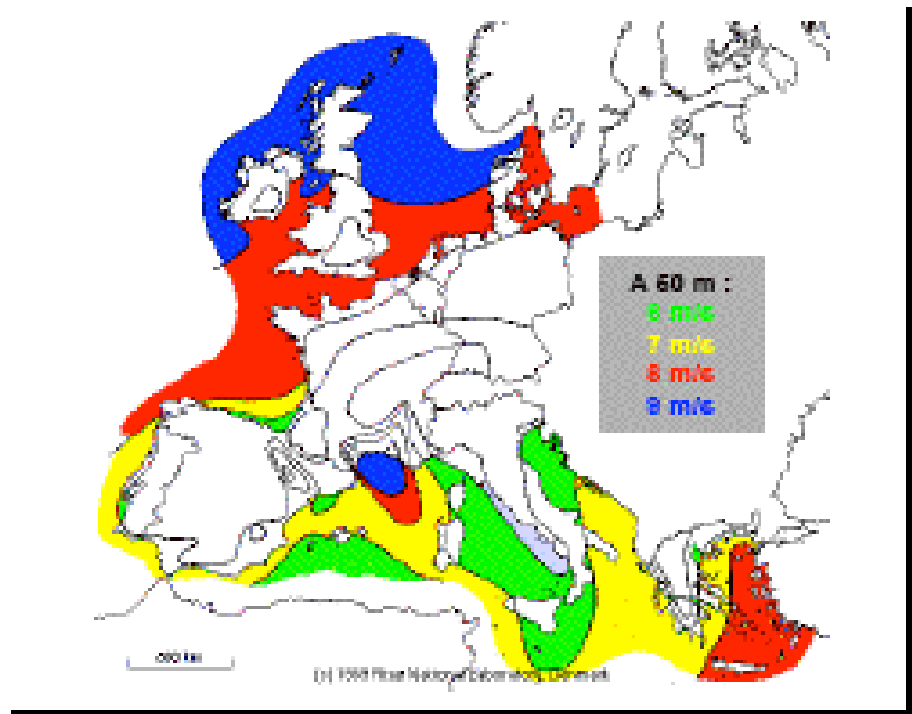
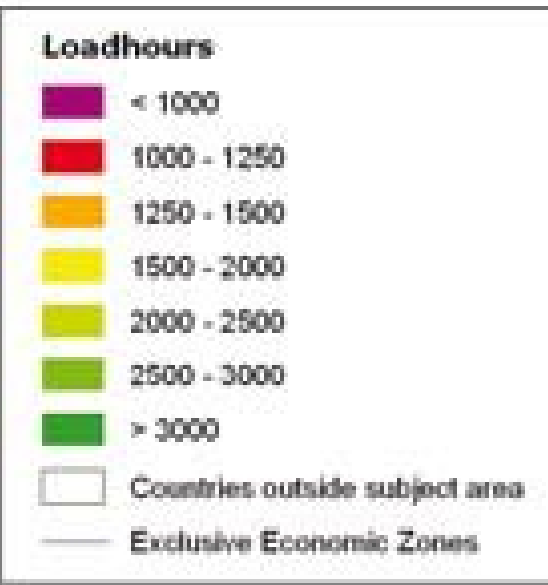
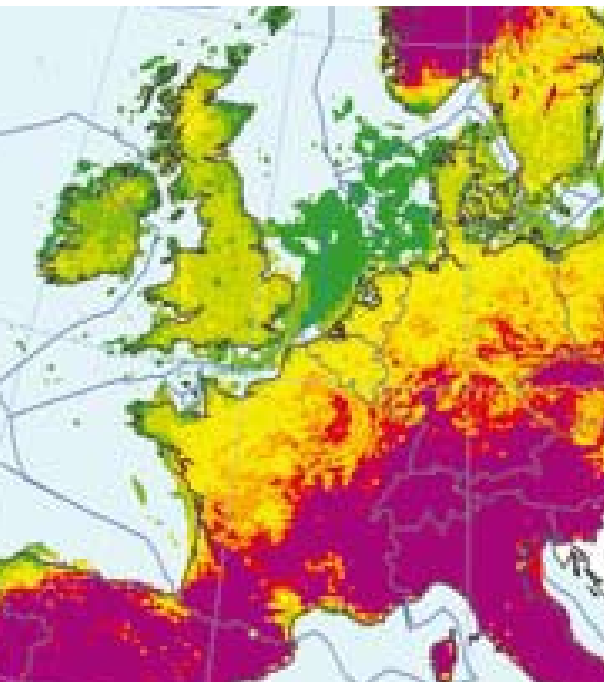
**Interdit par arrêté:**

**L'obligation d'enlèvement va devenir intenable (Dk, Al.)**

Comment se décide un  
parc d'éoliennes en France?

***Le souhaitable et le vrai***

# Carte des rendements annuels



# Le choix des sites

- **La réalité**
  - Un démarchage des mairies et des propriétaires de terrain
  - Un état en retard sur les projets
  - Une population peu consultée et des procès
- **Une autre logique oubliée**
  - Besoin
  - Optimisation géographique
  - Examen du terrain (habitat concentré ou diffus, paysages, nuisance pour le voisin le plus proche, coût de branchement au réseau)

## Des besoins de capacité d'accueil en forte croissance (1/2)

- La production France métropolitaine (données ERDF Juin 2009)

- 26.500 sites raccordés (8.600 MW) et 23.500 sites en file d'attente (5.600 MW)

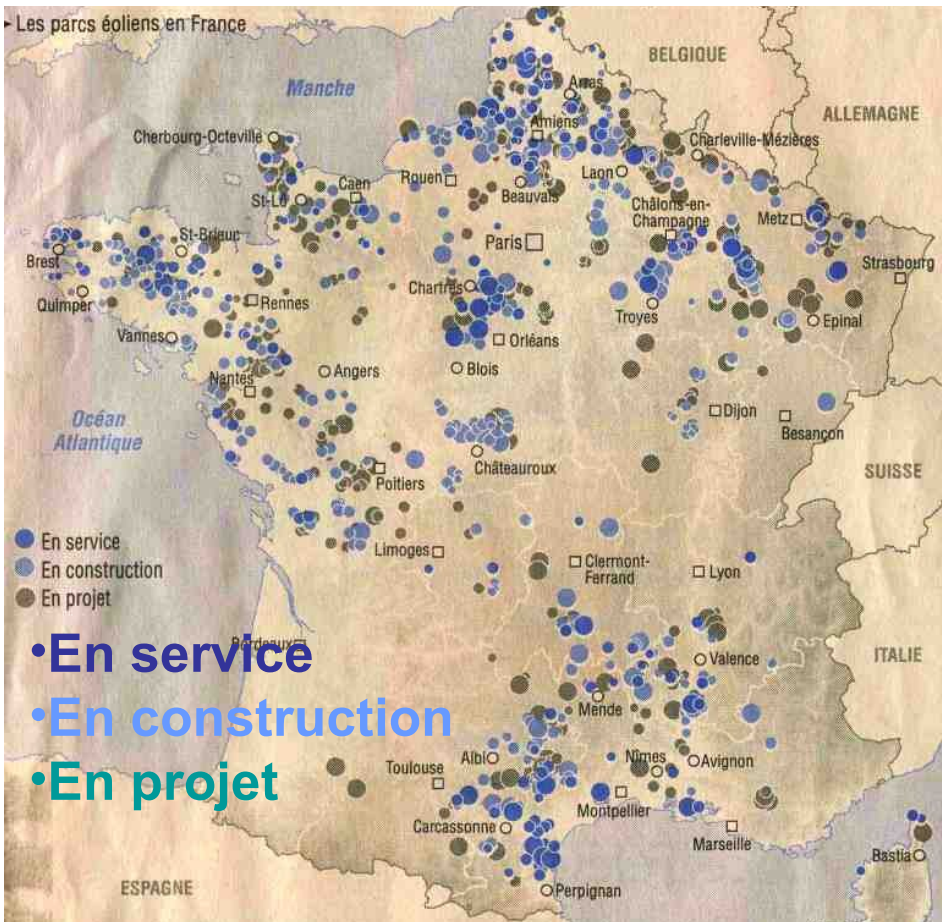
**dont**

- en **éolien** : 600 sites raccordés (3.730 MW) et 465 sites en file d'attente (4.270 MW)

- en **photovoltaïque** : 23.000 sites raccordés (106 MW) 22.800 sites en file d'attente (997 MW dont 22.400 sites de moins de 36 kW)

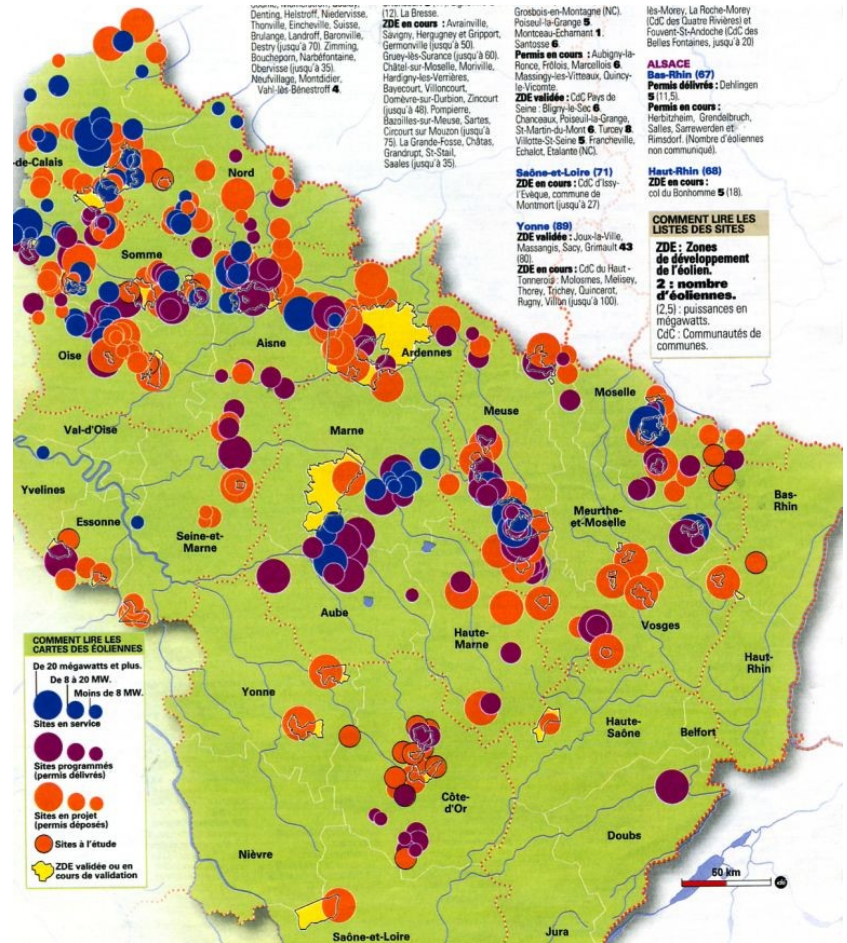
**UNE PROFUSION DE PROJETS:  
l'intendance suit difficilement**





- En service
- En construction
- En projet

# Une réalité: tendance au mitage du territoire



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

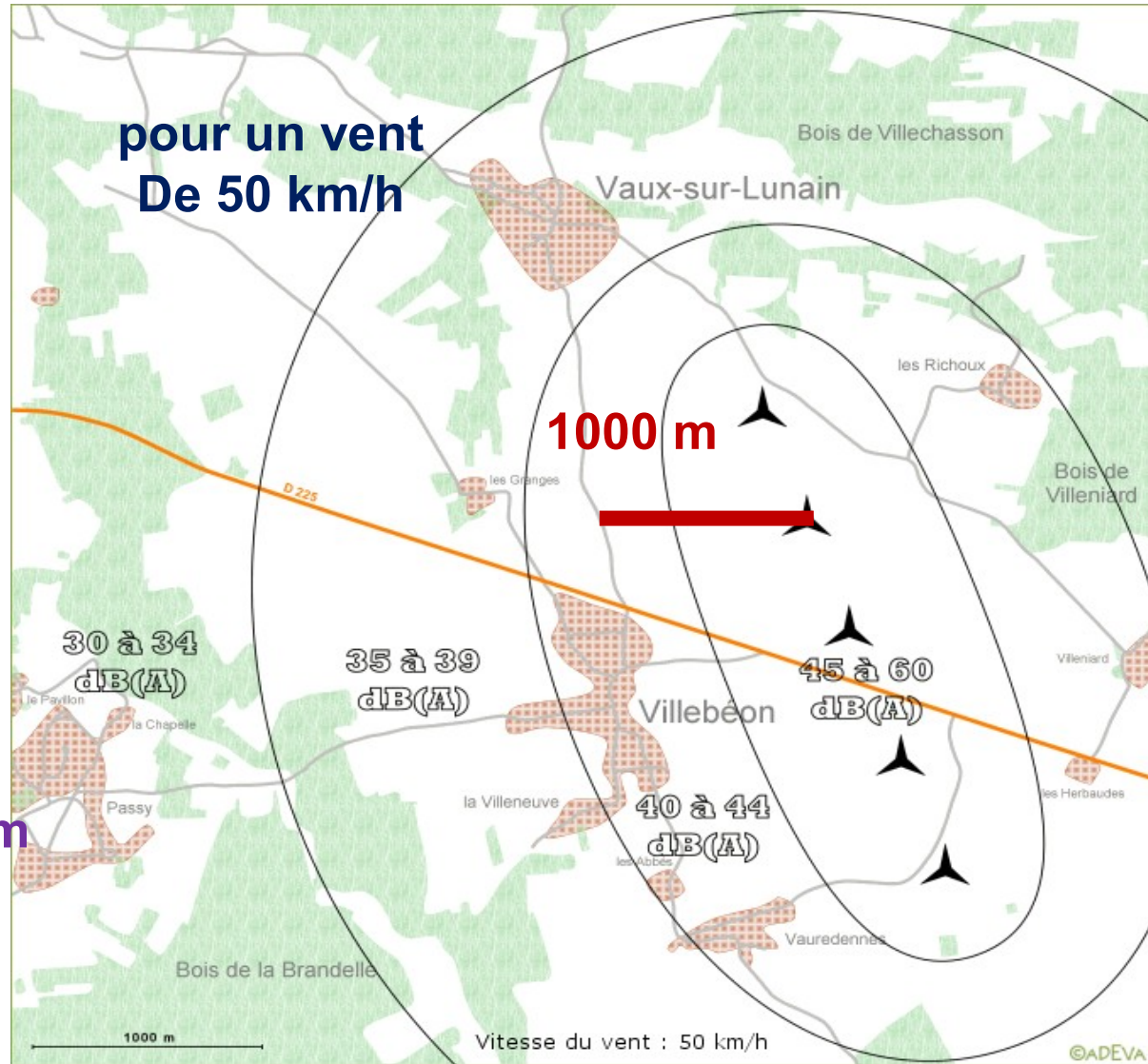
# LES PRINCIPALES NUISANCES

## LE BRUIT DES EOLIENNES (Basse fréquence)

45 dB(A) lave-vaisselle  
35 dB(A). réfrigérateur

L'académie de médecine  
recommande d'interdire  
les éoliennes de plus de  
2,5 MW à moins de 1500 m  
des maisons

L'état autorise à 500 m



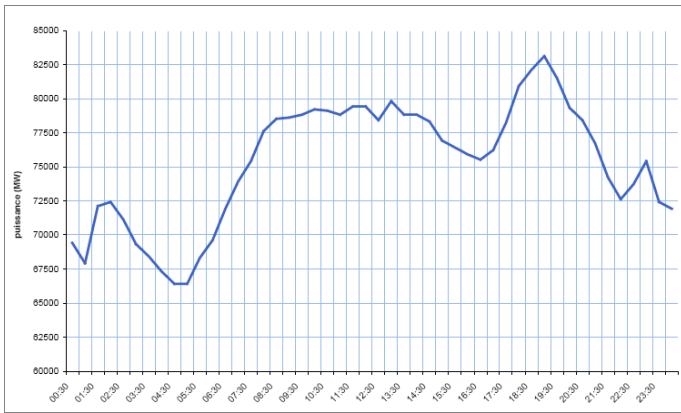
+ effet stroboscopique et aspect paysager 58

**Le préfet refuse, le juge autorise, le préfet ne fait pas appel  
Des procès systématiques dans les deux sens  
Des règles floues!**

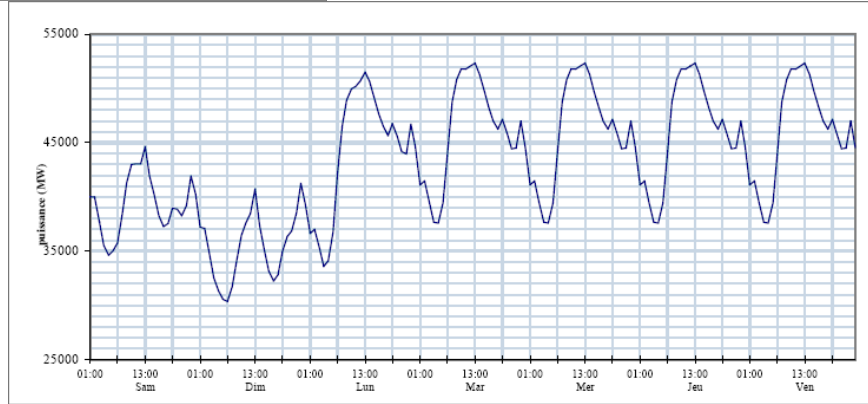


**Coutances**

# **Comment s'insère l'éolien dans la production en France**

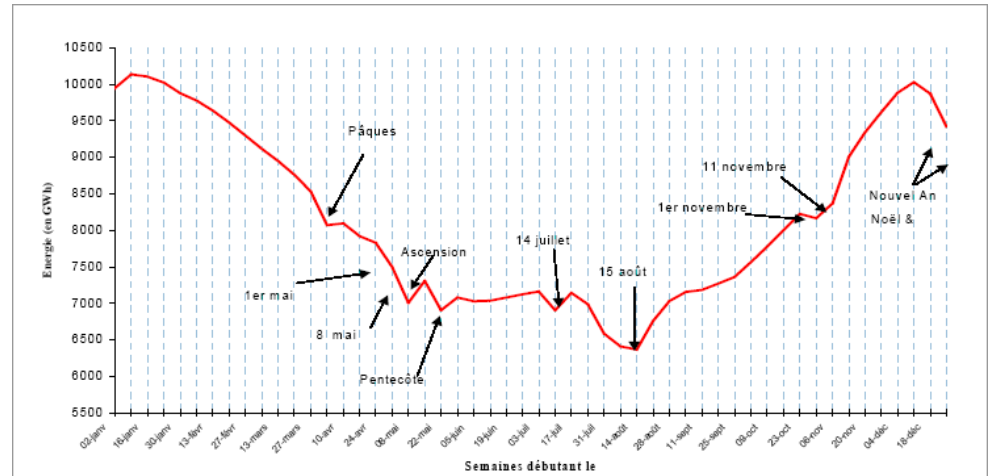


## Cycle journalier de la consommation



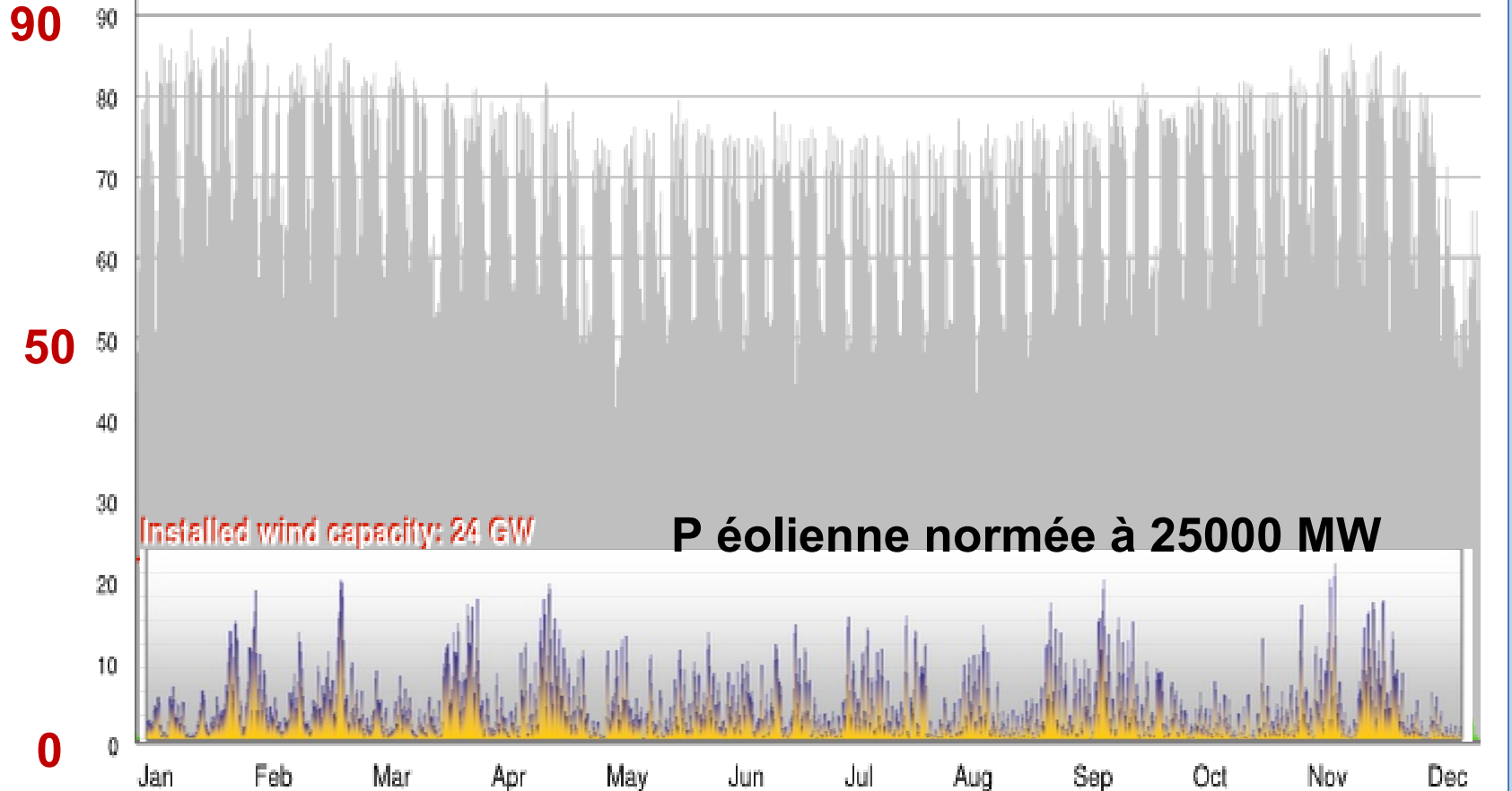
## Hebdomadaire

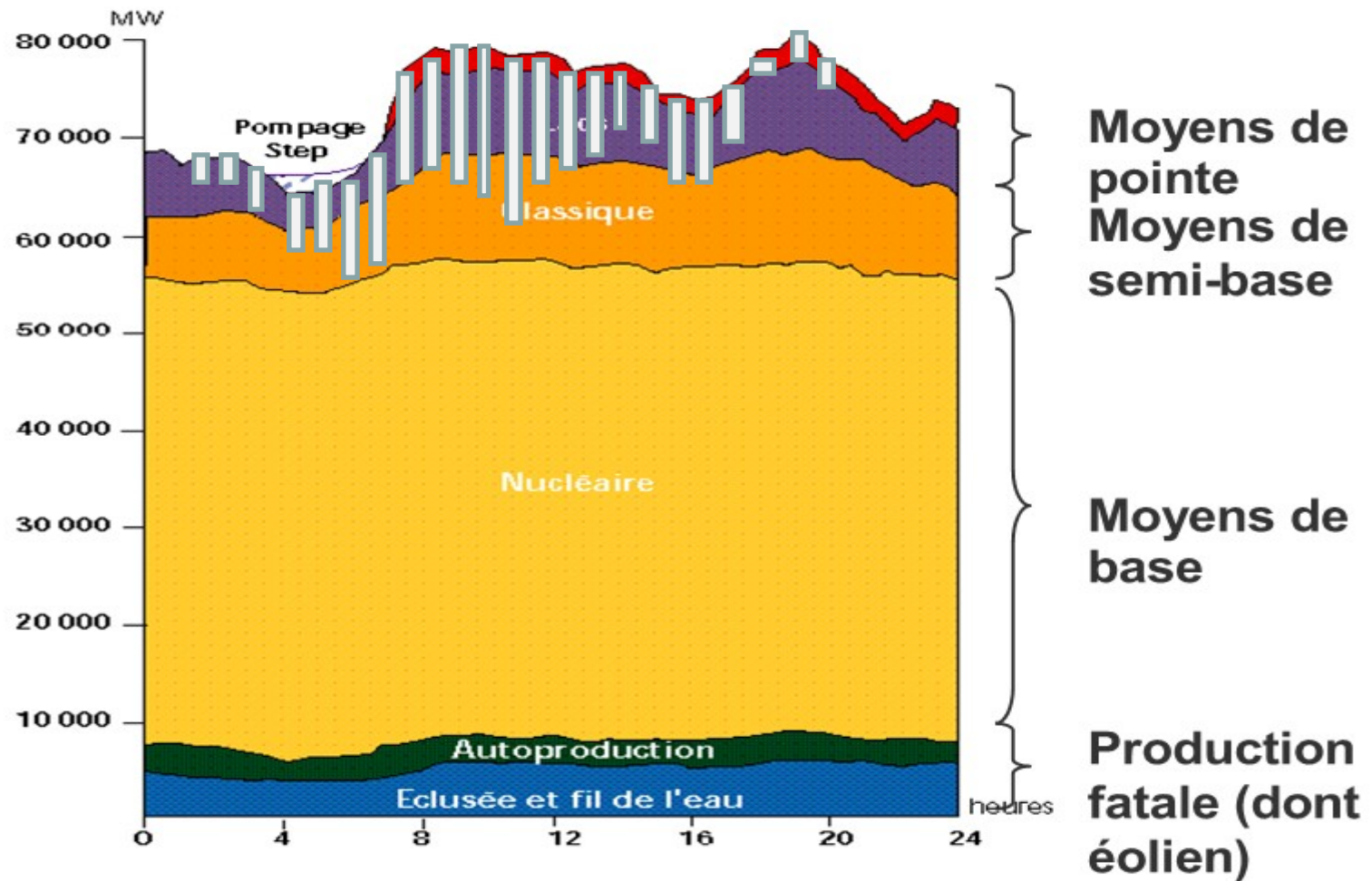
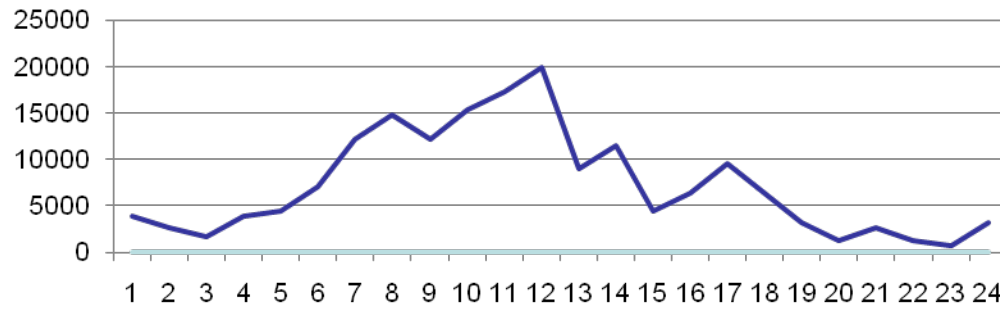
**France:**  
**importance**  
**du suivi**  
**de charge**  
**Annuel**



# France 2020: Consommation et production éolienne Comment réguler

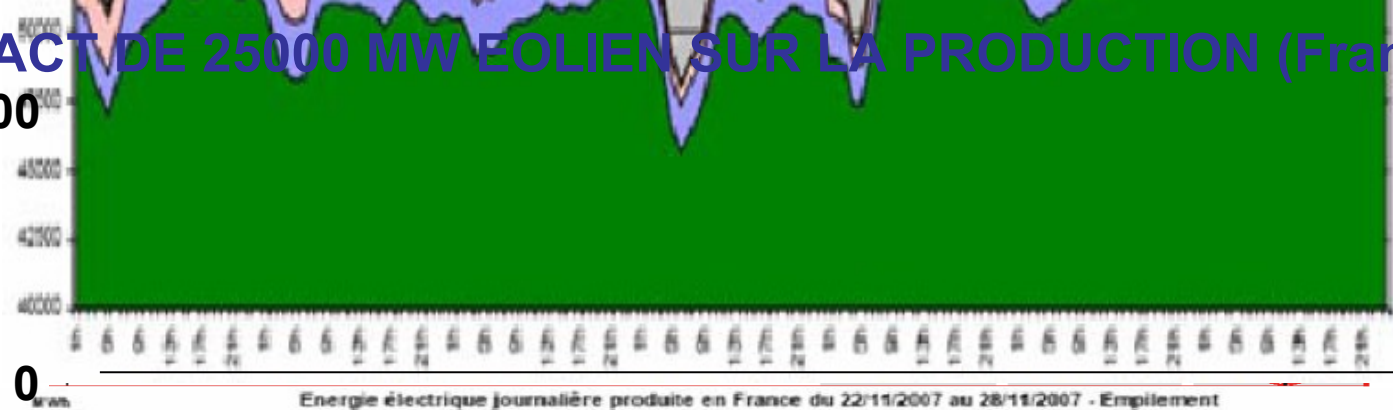
P (GW)





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

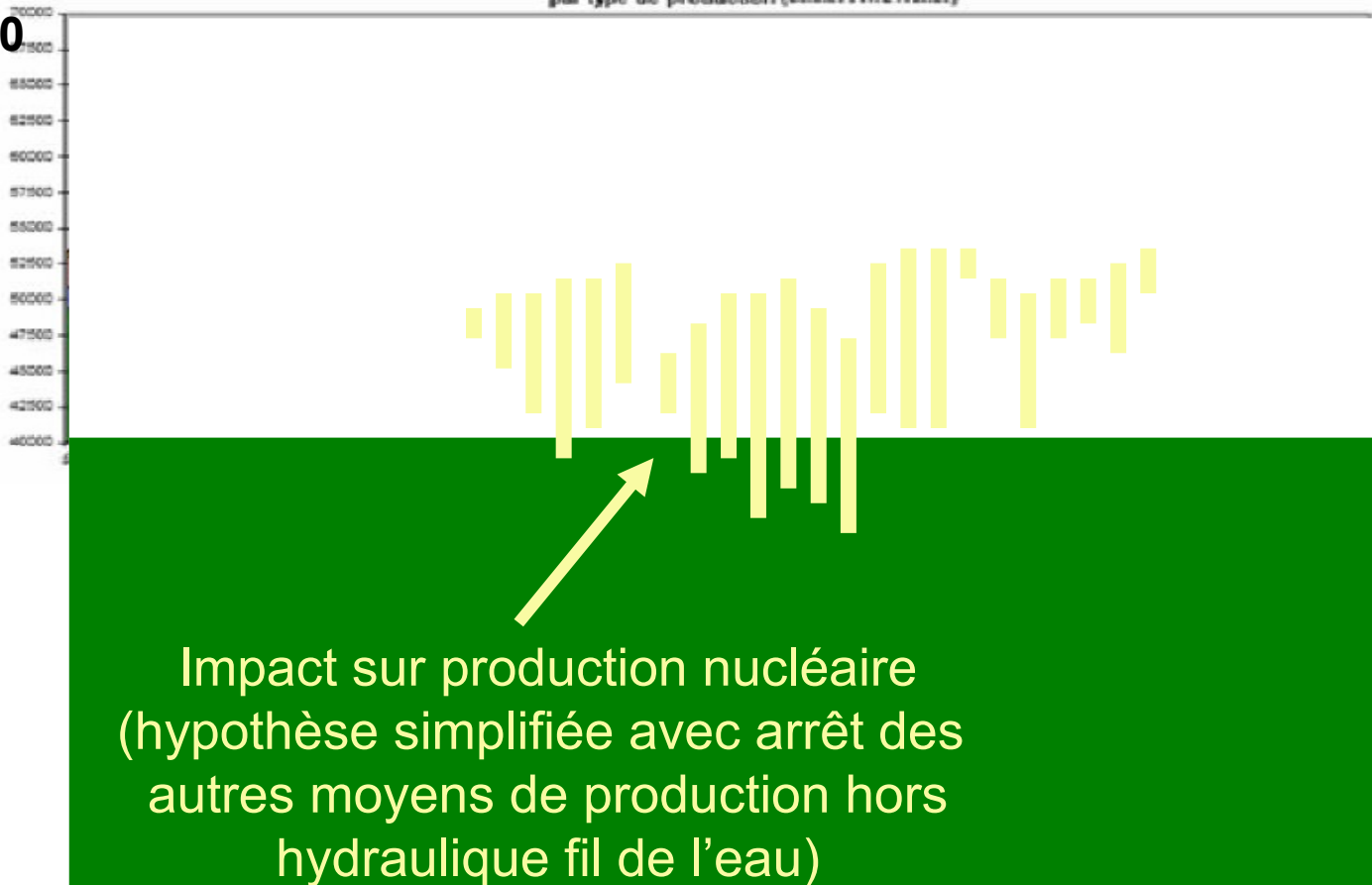
20000



Nucléaire  
Fluctuation Éolien Réaliste 2020

70000

MW



France Novembre 2007 RTE



# RTE ou comment le dire élégamment

---

---

---

---

---

---

---

---

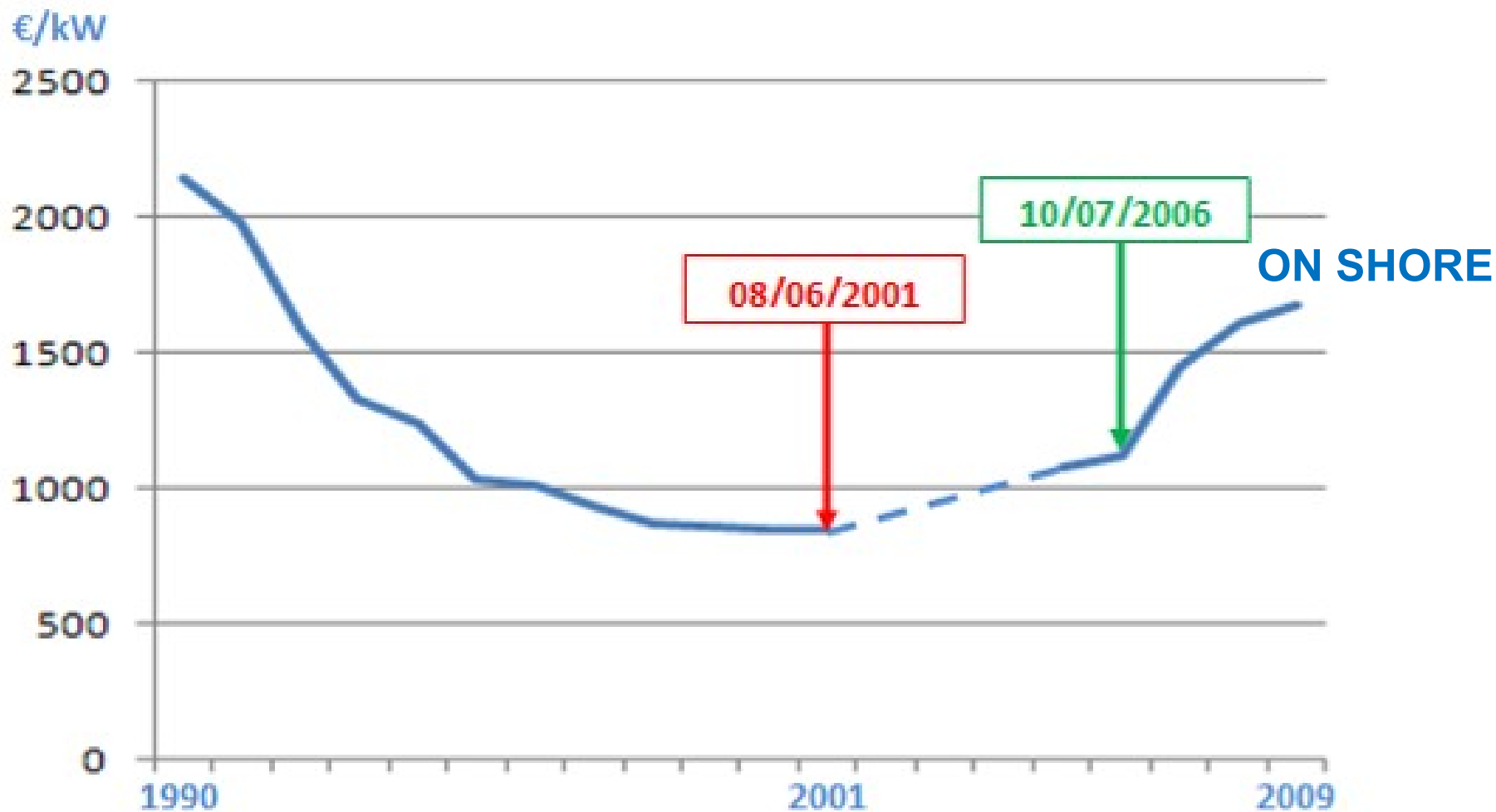
# Comment gérer cette variabilité?

- Appel au gaz
- Peser sur la consommation
  - Matériel basse consommation (- de pointe)
  - Effacement des consommations
- Développer des STEP (stations de transfert d'énergie par pompage)
- Associer des stockages d'électricité « horaires » aux parcs éoliens
- Transporter à grande distance

**ET A QUEL PRIX?**

# Coût de l'électricité éolienne

# On shore: évolution de l'investissement €/kW



**OFFSHORE: de 3500 à 4000 €/kW crête**

# Un tarif d'achat « obligé » sur le long terme (base 2006)

- Eoliennes terrestres: (aujourd'hui ~ 2000h/an)
  - année 1 à 10 : 82 €/MWh → en fait pendant 15 ans
  - 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 ( impossible
    - 28 à plus de 3600 h/an (
- Outre-mer (générateurs fuel):
  - 110 €/Mwh
- Eoliennes marines:
  - année 1 à 10 : 130 €/MWh → en fait pendant 20 ans
  - année 10 à 20
    - 130 si moins de 2800 h/an
    - 130 à 90 de 2800 à 3200 h/an ( très peu probable
    - 130 à 30 de 3200 à 3900 h/an ( impossible
    - 30 au delà de 3600 h/an (

# Et une évolution des tarifs très favorable jusqu'en 2020

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	74,2	70,2
	après 2006		82,0	83,9	84,1	84,3	84,4	85,4	86,4
	$\Delta$ en %		0,0	3,4	4,8	6,2	7,6	15,1	23,0

**Hypothèse ADEME: augmentation de 3% du coût de l'électricité conduisant à une parité de coût entre éolien et autres moyens de production en 2020**

# Comment comparer les investissements (M€)

	<b>Invest. Unitaire (M€)</b>	<b>Invest./MW (M€)</b>	<b>Invest. €/MWh annuel</b>
<b>Eolienne terrestre 3 MW et 2000 HEPP</b>	<b>4,5</b>	<b>1,5</b>	<b>745</b>
<b>Eolienne marine 5 MW et 2600 HEPP</b>	<b>17,5</b>	<b>3,5</b>	<b>1340</b>
<b>Centrale de série 1600 MW et 7800 HEPP</b>	<b>4500</b>	<b>2,5</b>	<b>401</b>

## **Hypothèses:**

- **En supposant une même durée de vie de 25 ans (EPR: 60)**
- **Rendements: 23% on-shore, 30% off-shore et 80% EPR**

# Le surcoût « production » de l'éolien

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

€/MWh	Coût évité	Surcoût
- Nucléaire	15	70
- Gaz	63	28
- Charbon	50	35

## Hypothèses (on et offshore)

- 85 /130 €/MWh pour 15 ans pour 7500 / 1000 MW avant 2013
- 75 /120 €/MWh pour 15 ans pour 12500 / 4000 MW après 2013
- Substitution fossile 70%/nucléaire 30% : 8500 MW → + 43/98,5 €/MWh
- Substitution fossile 30%/nucléaire 70% : 16500 MW → + 59/104 €/MWh

## Surcoût sur 15 ans d'exploitation (dont 40% offshore)

- 13600 M€ pour les 8500 premiers MW
- 38700 M€ pour les 16500 derniers MW

**Soit 52 milliards €  
en 15 ans**



# Qui paye ce surcoût éolien en 2009?

- **Surcoût officiel (via EDF à 98%):**
  - Il est défini à partir d'un coût annuel moyen: 65 €/MWh
  - $6.800.000 \text{ MWh} \times (85-65) \text{ €/MWh} = 136 \text{ millions €}$
  - Facturé aux « petits » clients (384 TWh/an) au titre de la CSPE « Contribution au service public d'électricité » qui figure au verso des factures EdF.  
**Soit 5,2 €/foyer et par an**
- Reste du surcoût réel, soit 23,4 €/MWh ou **159 millions €** en 2009, est pris en charge par EDF essentiellement, et pèsera sur la compétitivité et les prix de vente futurs d'EDF.
- Le surcoût 2009 pour la nation est de **295 M€**, soit environ **11 € HT par foyer**

# Surcoût éolien: projection sur 2020

**En prenant les mêmes hypothèses** (hors investissements sur les réseaux et les moyens de production de secours)

– **Surcoût officiel via la CSPE: 3,3 milliards €/an**

→ **Soit 122 €/foyer et par an en 2020**

– **Surcoût pour EdF: 2,85 milliards €/an**

→ **Soit environ 5,7 €/MWh**



– **Surcoût total pour le pays: 6,16 milliards €/an**

(pour 57% éolien offshore qui représentera 25% de la production)

– **Impact moyen sur le coût de l'électricité**

→ **12,3 €/MWh ou + 20% ou 220 €/foyer**

# **Quel impact sur les émissions de CO2 de la France en 2020**

# Trois études indépendantes

- Production de CO<sup>2</sup> du secteur électrique: 32 /381 millions de tonnes, soit 8 % du total en 2008
- Economie CO<sup>2</sup> de 25000 MW éolien
  - ADEME (configuration européenne): 16 Mt
  - Institut Montaigne: 6,8 Mt
  - Académie de technologie: ~ 5/6 Mt
  - Centre d'observation économique et de recherches pour l'expansion de l'économie et le développement des entreprises ~5 Mt

# C0<sup>2</sup> évité par le programme éolien: Quel coût ? Est le bon investissement?

- **Hypothèses:**
  - 25000 MW
  - Durée 25 ans
  - Production: 1575 TWh
- **Investissement total: 49,5 milliards €**
- **Tonnes de CO<sub>2</sub> évitées: 150 Mt (6 Mt/an)**
- **Investissement par tonne économisée: 330 €**
- **Taxe carbone 2010: ~ 15 à 25 €**
- **Taxe carbone 2020 (ADEME): 100 €**

Noter qu'en substitution à une production charbonnière on trouve environ 100 €

# **L'industrie de l'éolien et l'emploi 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 %			
<b>Total</b>		<b>22 207</b>	<b>100 %</b>			

\*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€  
Effectif Europe 62000**

**(En France Vergnet)**

# Vergnet, l'industriel français de l'éolien

**Des technologies innovantes  
pour territoires isolés  
et zones soumises à des ouragans**

**Moins coûteuses que la pétro-électricité**



**GEV HP 1 MW : le système Birdlike**



**Farwind**



# ONSHORE

	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
<b>Total</b>	<b>1227</b>	<b>100</b>

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

Source: Risø DTU

# Structure du coût des éoliennes et importations

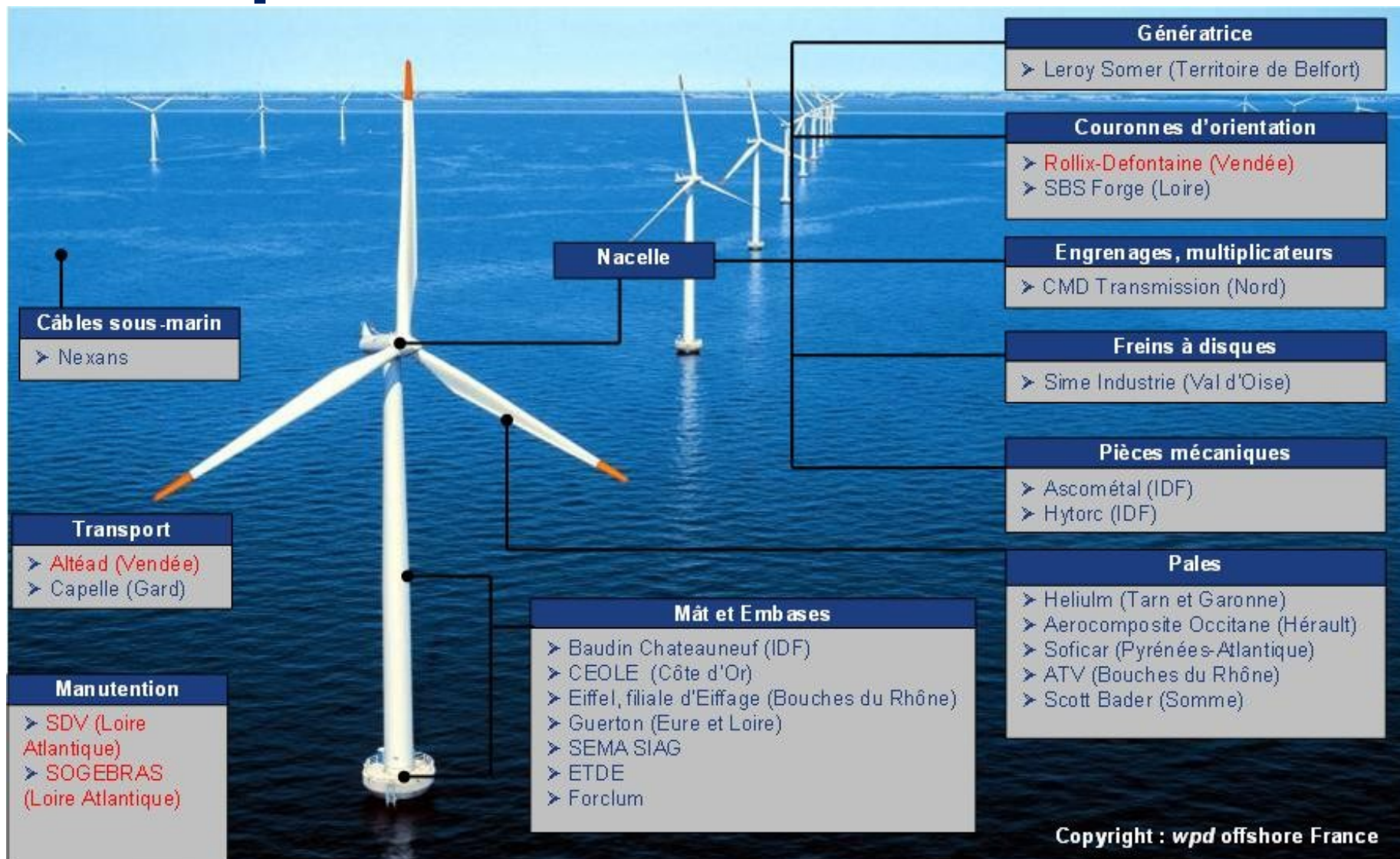
## OFFSHORE

- **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

## Importé à 70/80 % ?

# L'emploi en France selon le SER



Copyright : wpd offshore France

# Emploi en France?

- L'industrie européenne annonce 62000 emplois pour fabriquer 22.000 MW d'éoliennes en 2008 soit: **3000 emplois par 1000 MW**
- Le ministre indique 200000 à 300000 emplois pour équiper la France de 25.000 MW soit **10000 emplois par 1000 MW**
- La SER: 7000 emplois en France en 2008 pour 3500 MW opérationnel + 1000MW installés soit 1,5 G€ d'investissement et 0,6 G€ d'exploitation
- 70 à 80 % de l'investissement est hors France

**QUI CROIRE?**

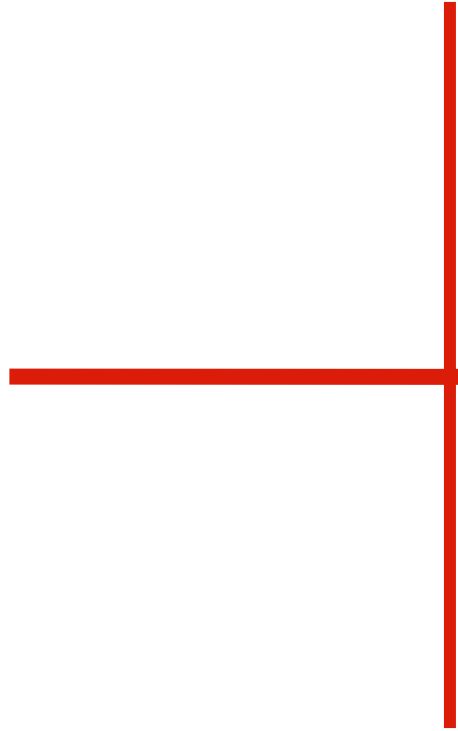
Une industrie (très)rentable  
pour les investisseurs

# 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 normal
- La garanties données sur l'achat permettent d'emprunter jusqu'à 80% de l'investissement à taux faible (< 5 % ): 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 d'où la profusion de projets
  - La Commission de Régulation de l'Electricité a parlé d'une « rente indue »

TRI sur fonds propres en fonction  
de la vitesse moyenne du vent (en m/s)

V moyenne France



V: m/s

CRE sur données DIDEME

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

e du vent



# 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 achetait en fait le portefeuille des accords obtenus auprès de maires ruraux et propriétaires terriens par l'entreprise
- Suez paye pour une entrée accélérée sur ce marché très profitable

# Que gagnent les locaux (collectivités et propriétaires de terrain)

- **peu dans l'absolu**
- **mais appréciable pour les propriétaires terriens et pour les petites municipalités**



# On shore: Exemple d'un parc français de 32 MW

- Trois parcs voisins de 12, 8 et 12 MW
- 16 éoliennes
- 73,5 GWh par an soit 2300 HEPP
- Indemnisations terrain (3600 €/éolienne et par an)
  - Terrain de l'éolienne: 1680 €/éolienne pour le propriétaire et 720 pour l'exploitant agricole si ce n'est pas le propriétaire
  - Autres terrains à moins d'un diamètre de pales (100m): 840 et 360 €/éoliennes
- Taxe professionnelle: 700 €/MW et par point de TP, soit pour 5% de TP, 112 k€/an
- **Bilan global:**
  - **Chiffre d'affaire du parc:** 6.250 k€
  - **Indemnisation propriétaires et exploitants:** 57 k€
  - **Taxe professionnelle (5 %):** 112 k€
  - soit ressources locales: **2,7% 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 km<sup>2</sup>
- Câble de 30 km
- Transformateur 35 kV
- Invest.: ~1500 M€ (2,5 M€/MW)
- Fonctionnement: 2600 HEPP
- Production: 1560 GWh
- CA annuel: 210 M€
- Recettes locales: 7,2 M€/an
  - 3,6 M€ municipalités limitrophe
  - 3,6 M€: marins et plaisanciers
  - Soit 3,4 % du CA



# EUROPE 2020

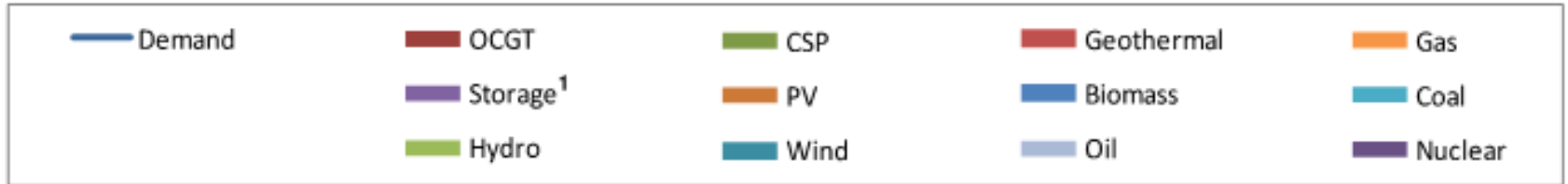
**Que va-t-il se passer?**

**Sommes nous très engagés?**

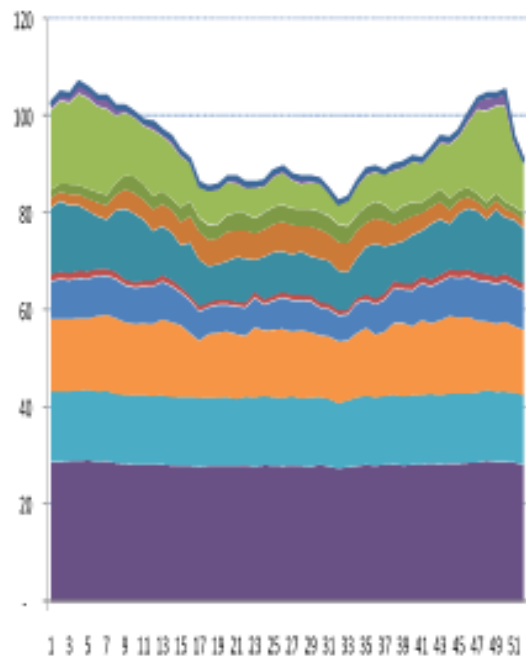
**Va-t-elle devenir une plaque de cuivre unique?**

# A combination of solar and wind is more stable than wind alone

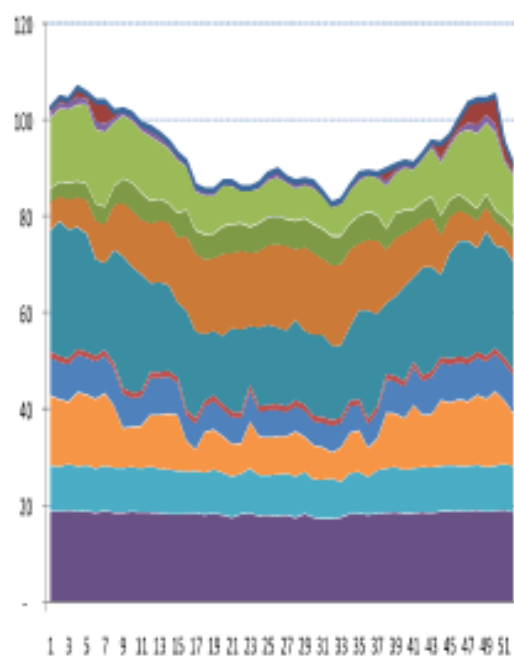
Yearly energy balance, 20% DR, TWh per week



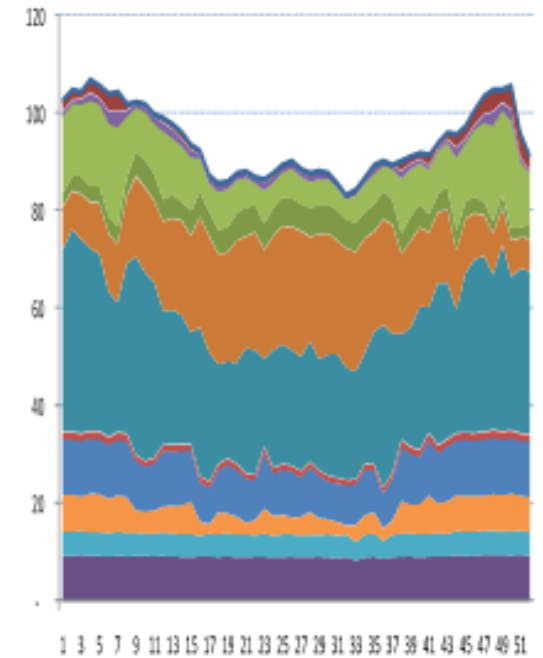
40% RES pathway



60% RES pathway



80% RES pathway

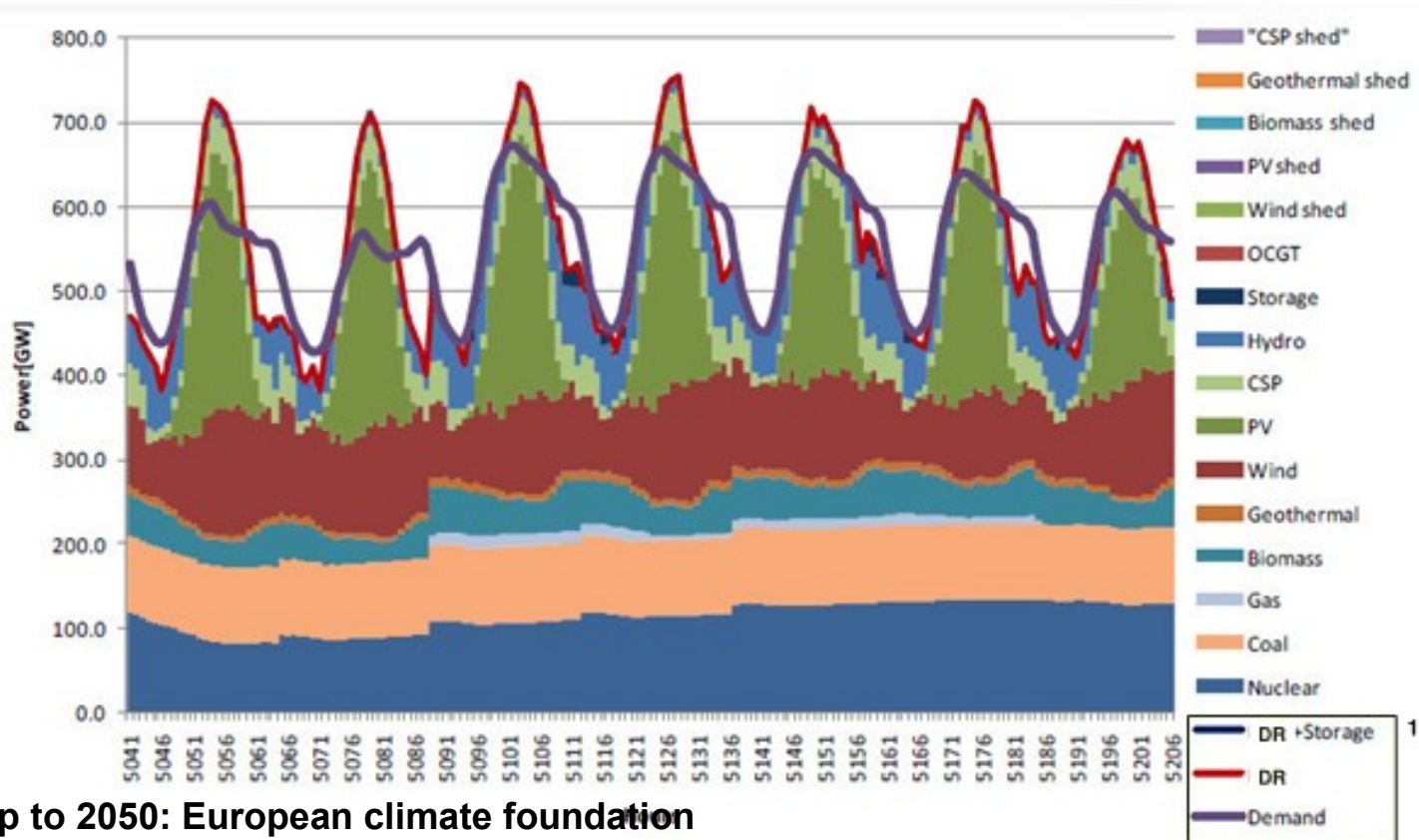


Roadmap to 2050: European climate foundation

# Hypothèse 20% nucléaire et 60% ENR

## La consommation doit s'ajuster en fonction de la production

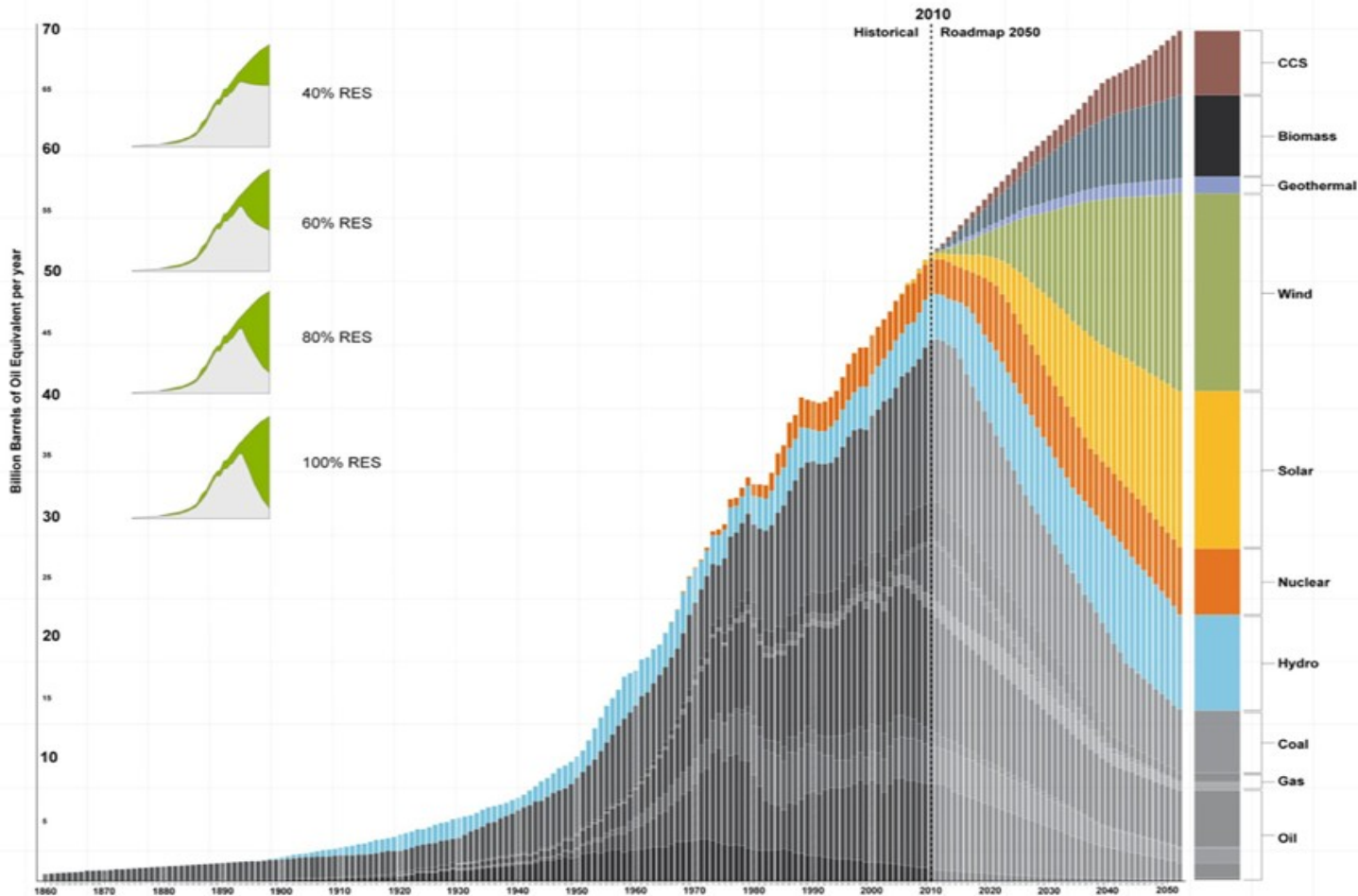
**Jour ensoleillé avec vent**



Roadmap to 2050: European climate foundation

# LE POINT DE VUE DES INDUSTRIELS DES ENR LA REGULATION DU RESEAU N'EST PAS LEUR PROBLEME!

ENERGY SUPPLY IN 2050 (HIGH RES PATHWAY)



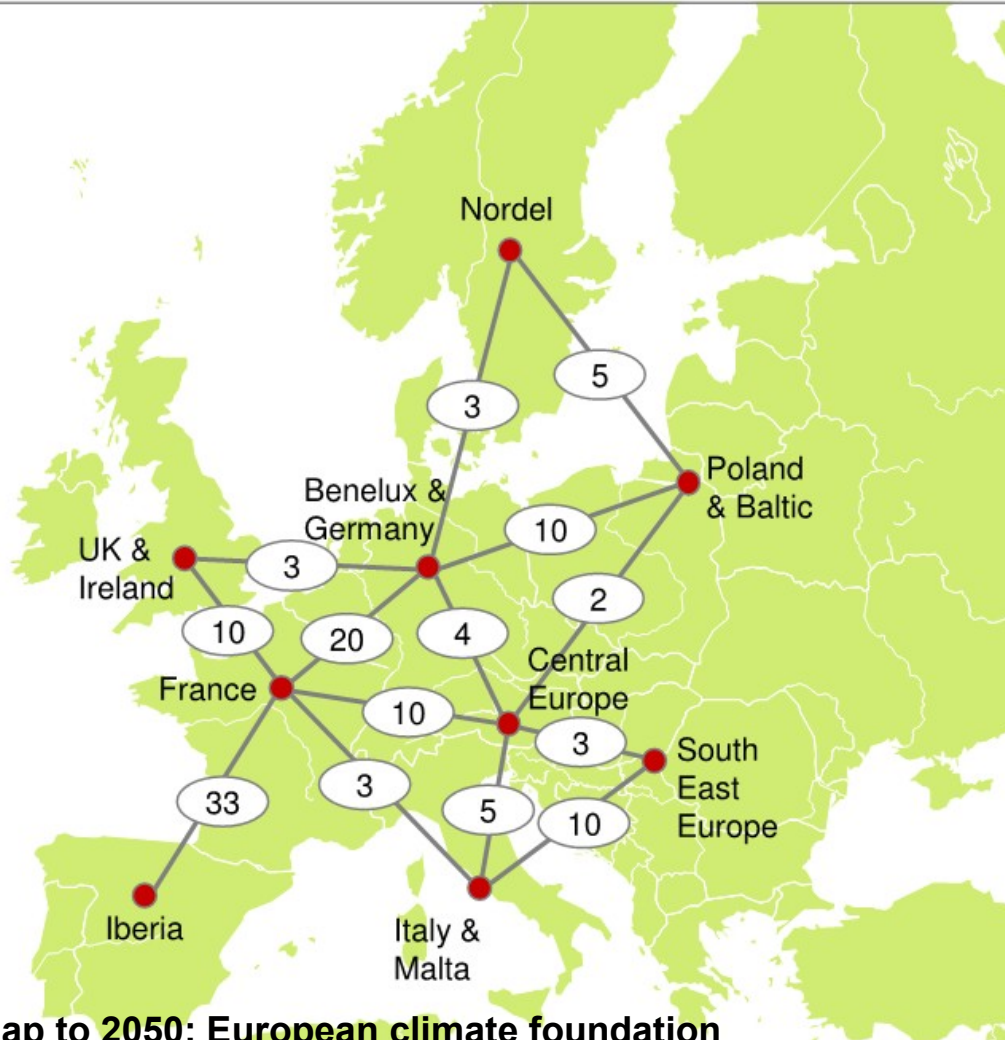
Source: Roadmap 2050 Technical Analysis, NREL/ITC; Lynn Orr, Changing the World's Energy Systems, Stanford University Global Climate & Energy Project (offer John Edwards, American Association of Petroleum Geologists); IRE Consulting; David Rutledge, Professor, California Institute of Technology; 2010: The Oil Age: World Oil Production 1850-2010, San Francisco, CA: Country of San Francisco Information; Dr. Colin J. Campbell's oil depletion model; The Coming Oil Crisis, by Colin J. Campbell, Independent Publishers Group, April 1, 2004; The Twenty-First Century, The World's Endowment of Conventional Oil and Its Depletion, BURLY, Project Gutenberg, 1994; International Energy Agency.

Roadmap to 2050: European climate foundation

# EUROPE ROADMAP: 60% ENR, 20% séquestration C, 20% nucléaire

## Total net transfer capacity requirements

GW (existing + additional)



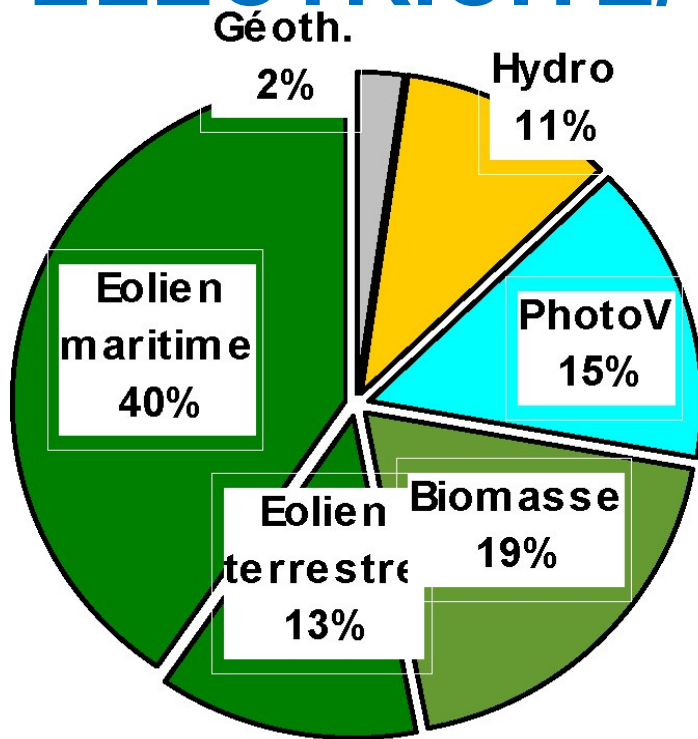
## Interconnection

- UK&Ireland-France
- UK&Ireland-Nordel
- UK&Ireland-Benelux & Germany
- France-Iberia
- France-Benelux & Germany
- France-Central-Europe
- France-Italy&Malta
- Nordel-Benelux & Germany
- Nordel-Poland&Baltic
- Benelux & Germany-Central-EU
- Benelux & Germany-Poland&Baltic
- Central-Europe-Poland & Baltic
- Central-South East EU
- Central-Europe-Italy
- South East EU-Italy

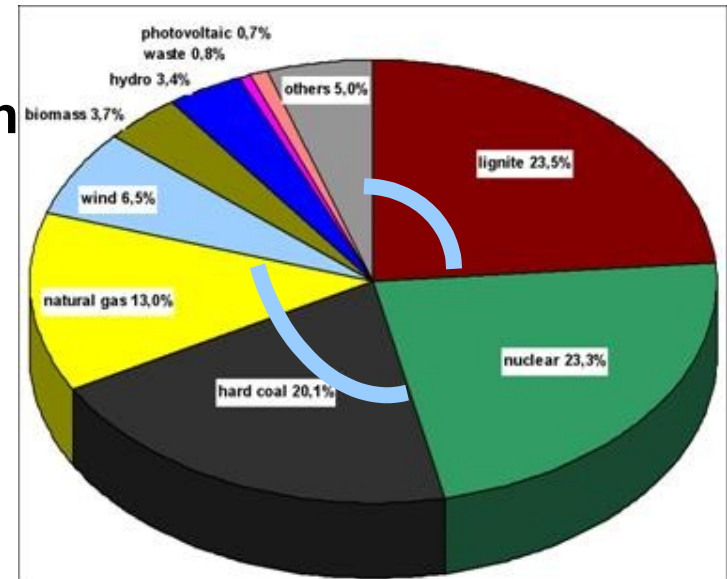
Roadmap to 2050: European climate foundation

# ELECTRICITE/ Allemagne 2020 ?

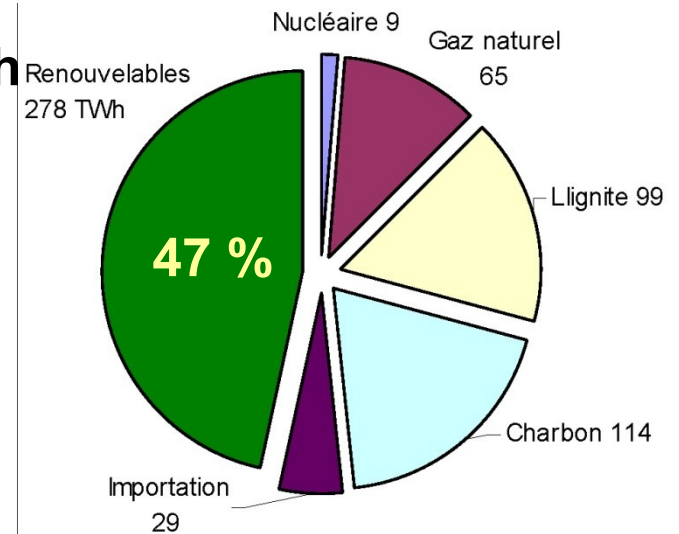
ENR  
2020



2008  
639 TWh



2020  
594 TWh



	2008	2020	Change
<b>FOSSILES:</b>	362	278	soit - 23 %
<b>NUCLEAIRE:</b>	142	9	soit - 94 %
<b>ENR:</b>	96	278	soit + 290 %
<b>BALANCE:</b>	+ 20/30	- 29	soit - 55 TWh

Bundesverband Erneuerbare Energie (SER)



# Un point de vue

- Les éoliennes sont matures
- Elles présentent un intérêt réel « mais limité » pour les pays qui produisent leur électricité avec des combustibles fossiles (et qui subiront une taxe carbone croissante)
- Les pics et creux éoliens seront coûteux à gérer dans une Europe interconnectée. Ils fragiliseront les réseaux
- L'intérêt CO2 est très limité en France avec une électricité très peu carbonée: 5 à 7000 MW seraient suffisants ?
- L'éolien marin sera très coûteux,
- L'emploi national restera marginal
- Le prix réseau/secours est à évaluer et financer
- Les pressions politique, européenne et industrielles sont prépondérantes encore pour quelque temps
- **Il faudrait réviser la politique d'achat**





