

ÉNERGIES RENOUVELABLES: *LES EOLIENNES*



Aérogénérateurs Electriques

- ✓ *Introduction*
 - Histoire éolien, potentiel éolien et prospective, coûts de production
 - Aspects pratiques – Législation
 - ✓
 - ✓ *Turbines éoliennes*
 - Caractérisation du vent
 - Rendement énergétique d'un capteur éolien
 - ✓ *Constitution des aérogénérateurs*
-

Éléments d'histoire



Pompage dans les polders (Hollande)



Pompage d'eau

Production d'électricité

1891 : 1er aérogénérateur **Danemark** (La Cour)

1941 : **USA** bipale de 1,25 MW

France : 1920 bipale ϕ 20 m (CEM)

1950-60 tripale ϕ 30 m 800 kW

bipale ϕ 35 m 1 MW

Californie : années 1980 près de 400 MW en 1985

Deux grands secteurs d'application :

- **sites isolés, camping, bateaux... qq 10 W à qq 10 kW**

Air 403 : 400 W



USA 10 kW



- **production au fil du vent couplé au réseau qq 100 kW à qq MW**

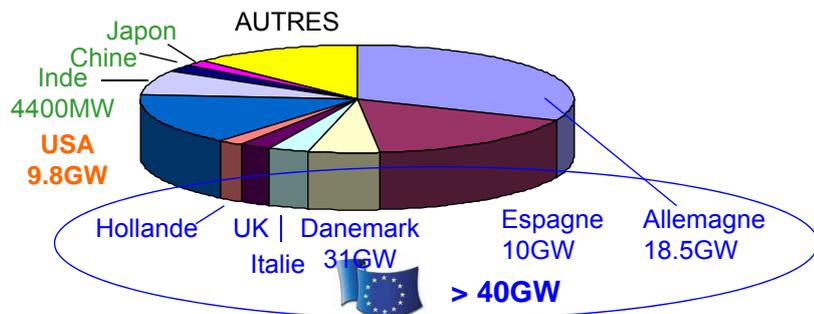


Donzère : 5 x 600 kW



OFFSHORE Danemark : 20 x 2 MW

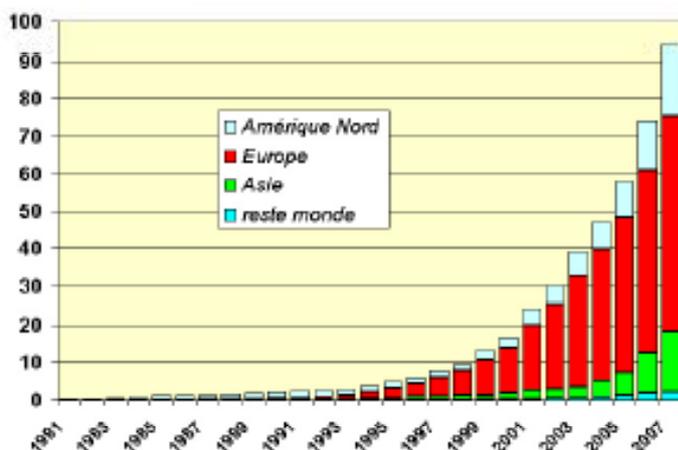
État de la filière mondiale (2005)



Rang	Pays	MW
01	Allemagne	18 428
02	Espagne	10 027
03	États-Unis	9 149
04	Inde	4 430
05	Danemark	3 128
06	Italie	1 717
07	Royaume-Uni	1 353
08	Chine	1 260
09	Pays-Bas	1 219
10	Japon	1 040
11	Portugal	1 022
12	Autriche	819
13	France	757
14	Canada	683
15	Grèce	573
16	Australie	572
17	Suède	510
18	Irlande	496
19	Norvège	270
20	Nouvelle-Zélande	168
	Total mondial	58 982

Source : World Wind Energy Association

Croissance de la filière



Nombre d'heures équivalentes à pleine puissance :

- > 2000 h en terrestre (10 GW donnent plus de 20 TWh)
- > 3000 h en offshore (10 GW donnent plus de 30 TWh)

Croissance annuelle > 20 %

Fin 2007 : 94 GW installés
 (2,45 GW en France +50% par rapport à 2006)
 ≅ 1 % de la production mondiale électrique
 En Europe, le vent a fourni 3 % de l'énergie électrique en 2007

En 2010 4,5 GW installés en France



Prévisions Eurobserv'ER :
89 GW en 2010
en Europe

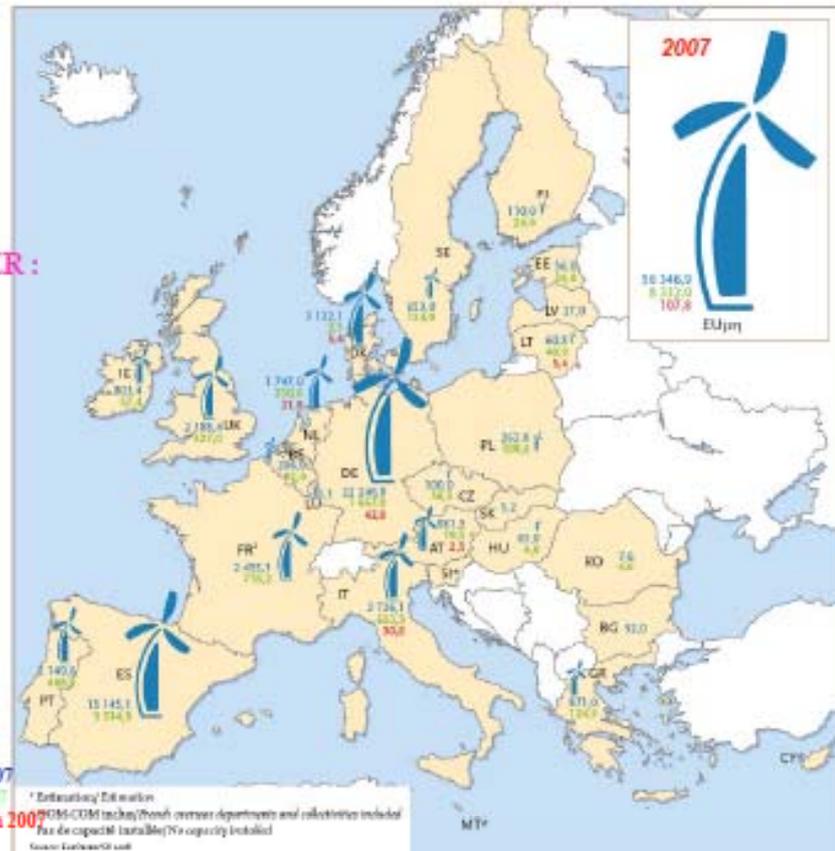
(souhaité livre blanc :
40 000 MW)

Source :
Revue Systèmes solaires,
Observ'ER

En bleu : puissance cumulée fin 2007

En vert : puissance installée en 2007

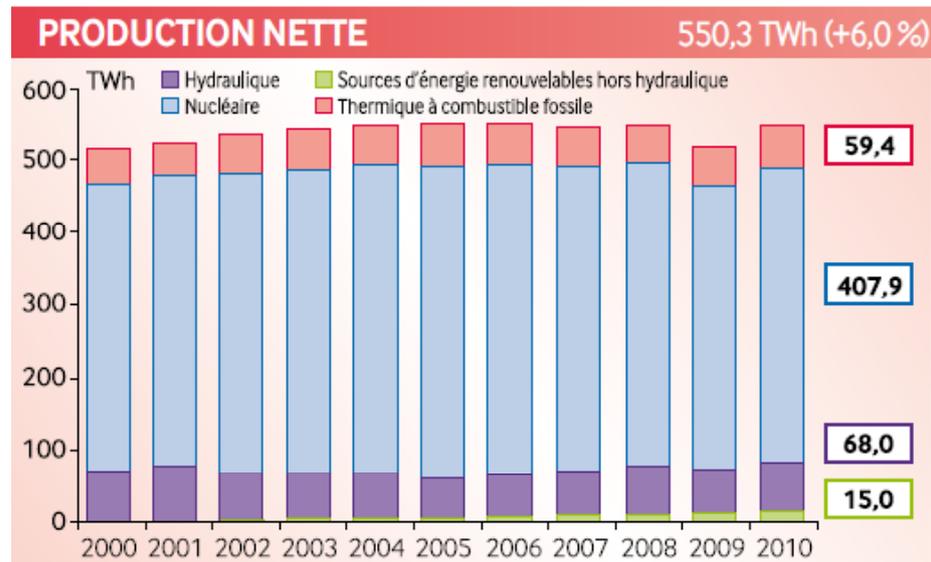
En rouge : puissance démantelée en 2007



Par pays, en TWh, en 2007 (Observ'ER/EDF - Dixième inventaire – Édition 2008))

Allemagne	39,5	23,4%
Espagne	32,3	19,1%
États-Unis	27,1	16,0%
Inde	12,7	7,5%
Danemark	7,2	4,2%
Chine	6,5	3,9%
Royaume- Uni	5,3	3,1%
France	4,1	2,4%
Italie	4,0	2,4%
Portugal	4,0	2,4%

En France en 2010

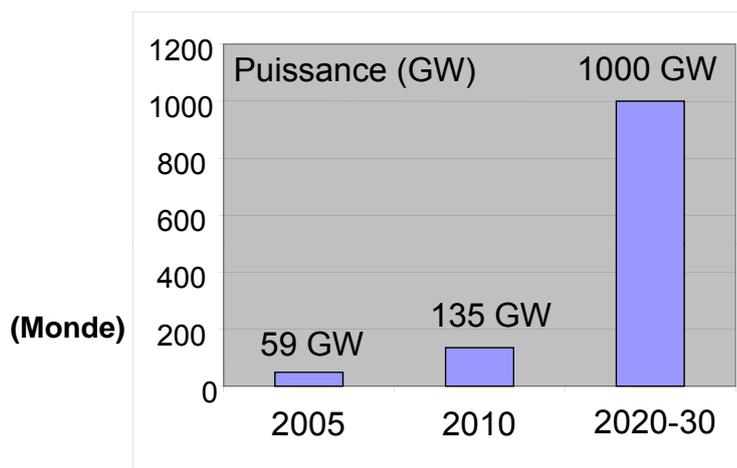


ÉNERGIE PRODUITE	TWh	Variation 2010/2009 (%)	Part de la production (%)	Emissions de CO2 (Millions de tonnes)
Production nette	550,3	+6,0	100,00	34,1
Nucléaire	407,9	+4,6	74,1	0,0
Thermique à combustible fossile	59,4	+8,3	10,8	31,2
<i>dont charbon</i>	19,1	-7,6	3,5	18,3
<i>dont fioul</i>	7,9	+2,7	1,4	3,5
<i>dont gaz</i>	30,0	+24,7	5,5	9,3
Hydraulique	68,0	+9,9	12,4	0,0
Éolien	9,6	+22,2	1,7	0,0
Photovoltaïque	0,6	+281,6	0,1	0,0
Autres sources d'énergie renouvelables*	4,8	+11,1	0,9	2,9

Répartition de l'objectif de 20% par filière

Energie	Situation en 2006	Objectifs 2020 selon le SER		Feuille de route selon le SER
		Objectif	Modalités	
Bois et cultures dédiées	8,5 MTep	23 MTep	7 MTep à mobiliser en forêt + 7 MTep de cultures dédiées (2 millions d'hectares)	+ 14,5 MTep
Solaire thermique et PAC	200 000 à 300 000 logements	4 à 6 millions de logements		+ 4 à 6 Mtep
Hydraulique	25 000 MW	27 000 MW	76 TWh	+ 10 TWh
Eolien	2 000 MW (2 000 éoliennes)	25 000 MW (env. 8 000 éoliennes)	55 TWh	+ 50 TWh
Photovoltaïque raccordé au réseau	30 MW	7 000 MW	6 TWh	+ 6 TWh
Biomasse dont biogaz et déchets (production d'électricité)	580 MW	1 300 MW (équivalent de 2 centrales thermiques)	9 TWh	+ 5,5 TWh
Biocarburants	0,5 MTep	6 MTep	4 millions d'hectares de colza	+ 5,5 Mtep

Prospective de la filière éolienne :

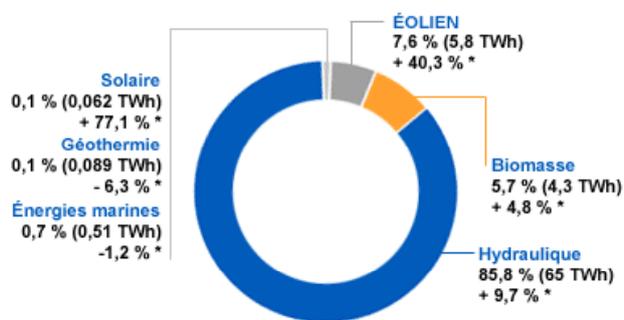


Prospective énergétique à 2020-2030 :

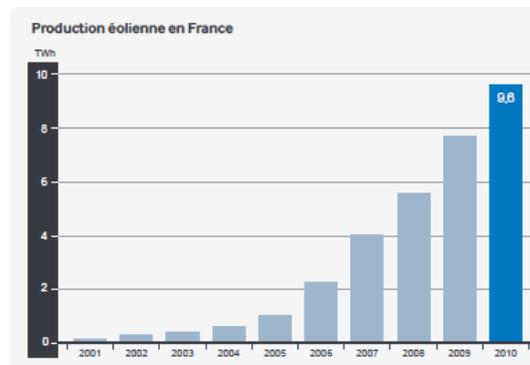
- L'éolien serait la seconde source d'électricité renouvelable après l'hydraulique d'ici 2030.
- France : 10 GW pour 2010, 25 MW pour 2020

Production d'énergie électrique d'origine renouvelable en France (83 TWh en 2010 soit 15,1%)

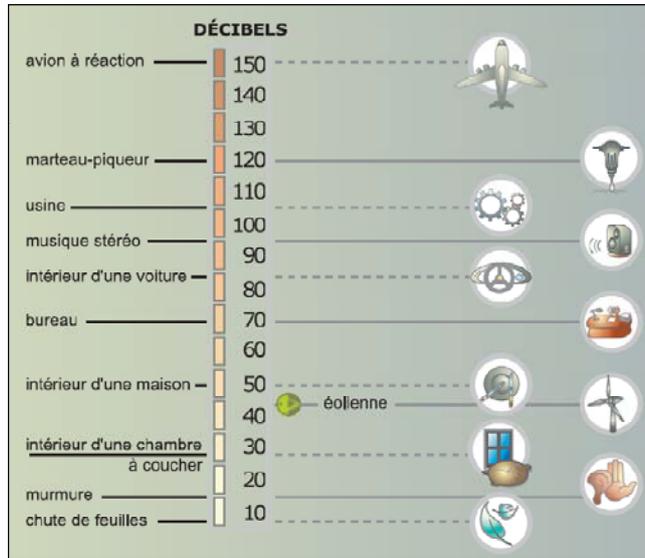
Eolien en 2010: 9,6 TWh soit 1,7%



Part de l'éolien dans la production française d'électricité d'origine renouvelable * par rapport à 2007
 (Observ'ER/EDF - Onzième inventaire, 2009 - chiffres de production 2008) © EDF



Le bruit généré par une éolienne a deux origines :



Le bruit mécanique

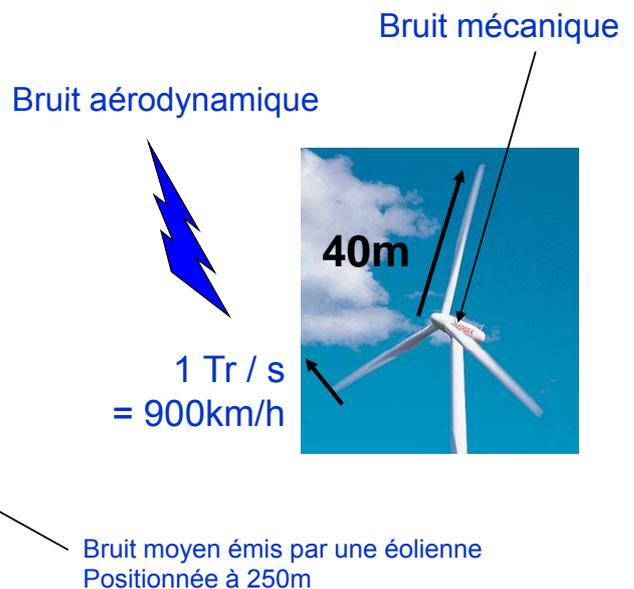
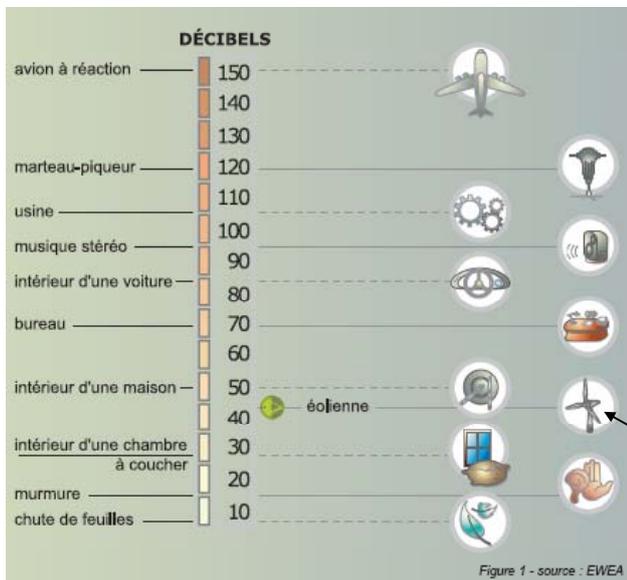
Créé par les différents organes en mouvement (engrenages multiplicateur).

Le bruit aérodynamique

Le freinage du vent et son écoulement autour des pales.

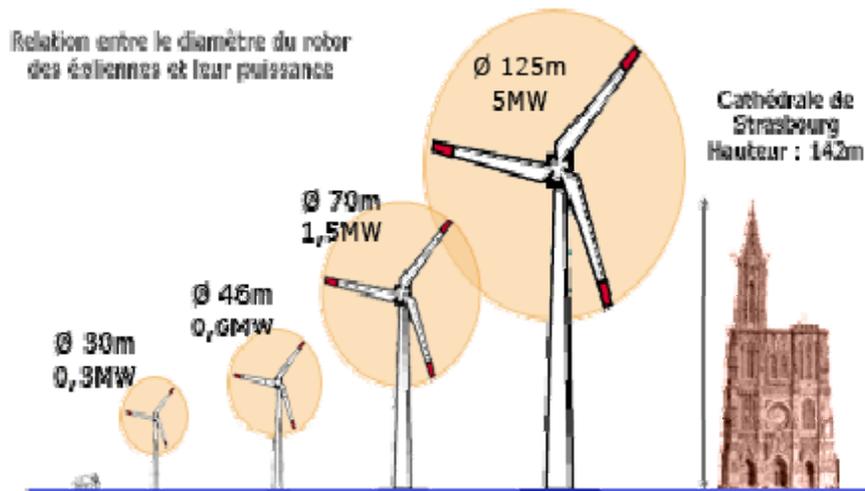
Prospective de la filière éolienne :

- Principaux facteurs d'accélération / freinage : l'incitation tarifaire
- Principales évolutions techniques :
 - Diminution du bruit :



Classification des éoliennes

Éoliennes	Diamètre des pales	Puissances
Grande	> 46 m	> 1MW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Petite	< 12 m	< 40 kW



EOLIENNES SIEMENS

SWT-3.6-107

Capacité: 3600kW avec un vent de 12-14 m/s

Fonctionnement: vent entre 3-5 m/s et 25 m/s

Rotor: diamètre 107m, 3 pales, vitesse 6 à 18 rpm

Niveau sonore: non communiqué

SWT-2.8-82 VS

Capacité: 2800kW avec un vent de 13-14 m/s

Fonctionnement: vent entre 3-5 m/s et 25 m/s

Rotor: diamètre 82.4m, 3 pales, vitesse 6 à 18 tr/mn

SWT-2.3-93

Capacité: 2300kW avec un vent de 13-14 m/s

Fonctionnement: vent entre 4 m/s et 25 m/s

Rotor: diamètre 93m, 3 pales, vitesse 6 à 16 tr/mn

SWT-2.3-82

Capacité: 2300kW avec un vent de 13-14 m/s

Fonctionnement: vent entre 4 m/s et 25 m/s

Rotor: diamètre 82.4m, 3 pales, vitesse 11 à 17tr/mn

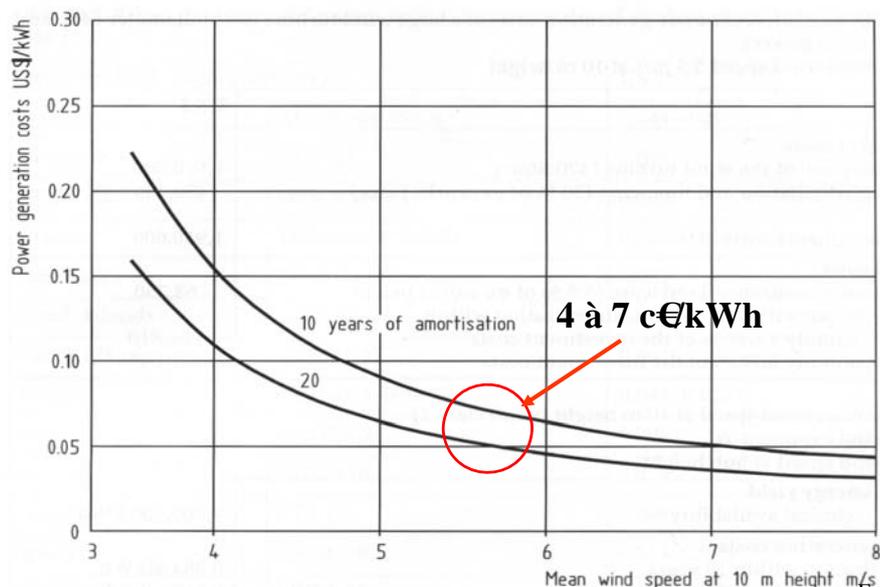
SWT-1.3-62

Capacité: 1300kW avec un vent de 13-14 m/s

Fonctionnement: vent entre 4 m/s et 25 m/s

Rotor: diamètre 62m, 3 pales, vitesse 13 à 19 tr/mn

Coût de production



Power-generation costs of a medium-sized wind turbine with 40 m rotor diameter and 500 kW rated power in dependency of the annual mean wind speed at 10 m height and the amortization time. E. HAU, *Wind-Turbines*, Springer, 2000.

En 2002: coût de l'investissement: 0,8 à 1,1 €/W (terrestre) et 1,7 à 2 €/W (offshore)

une éolienne de hauteur:

de moins de 12 m : Déclaration de travaux

entre 12 et 50 m: Demande de permis de construire (mairie, DDE).

Etude d'impact

au-delà de 50 m: Demande de permis de construire (mairie, DDE).

Etude d'impact

Enquête publique

Sélection d'un site éolien

- Répondre au moins à 5 questions :

- Quelle ressource en vent ?
 - Comment et où se raccorder électriquement (détermine la puissance maximale du Parc et le coût de raccordement) ?
 - Comment et où se raccorder au réseau routier (conditions d'accès au site pour «gros engin»)?
 - Quelles sont les contraintes environnementales et réglementaires ?
 - Quels sont les propriétaires des terres ?
-

Développer un parc éolien

1. Choix du site
 - Campagne de mesure (généralement mât de 40m) étude rugosité, carte météo
 2. Etude environnementale
 - Analyse paysagère et étude d'insertion environnementale (paysage, eau, faune, flore,...)
 3. Etablissement des documents d'urbanisme
 - L'implantation du Parc doit être conforme au PLU (Plan Local d'Urbanisme), POS,...
 4. Enquête Publique
 - Obligation pour tout Parc de plus de 25m de haut
 5. Obtention du permis de construire
 - Impératif au-delà de 12m de hauteur
 - Si hauteur inférieure à 12 m : déclaration de travaux
-

Développer un parc éolien

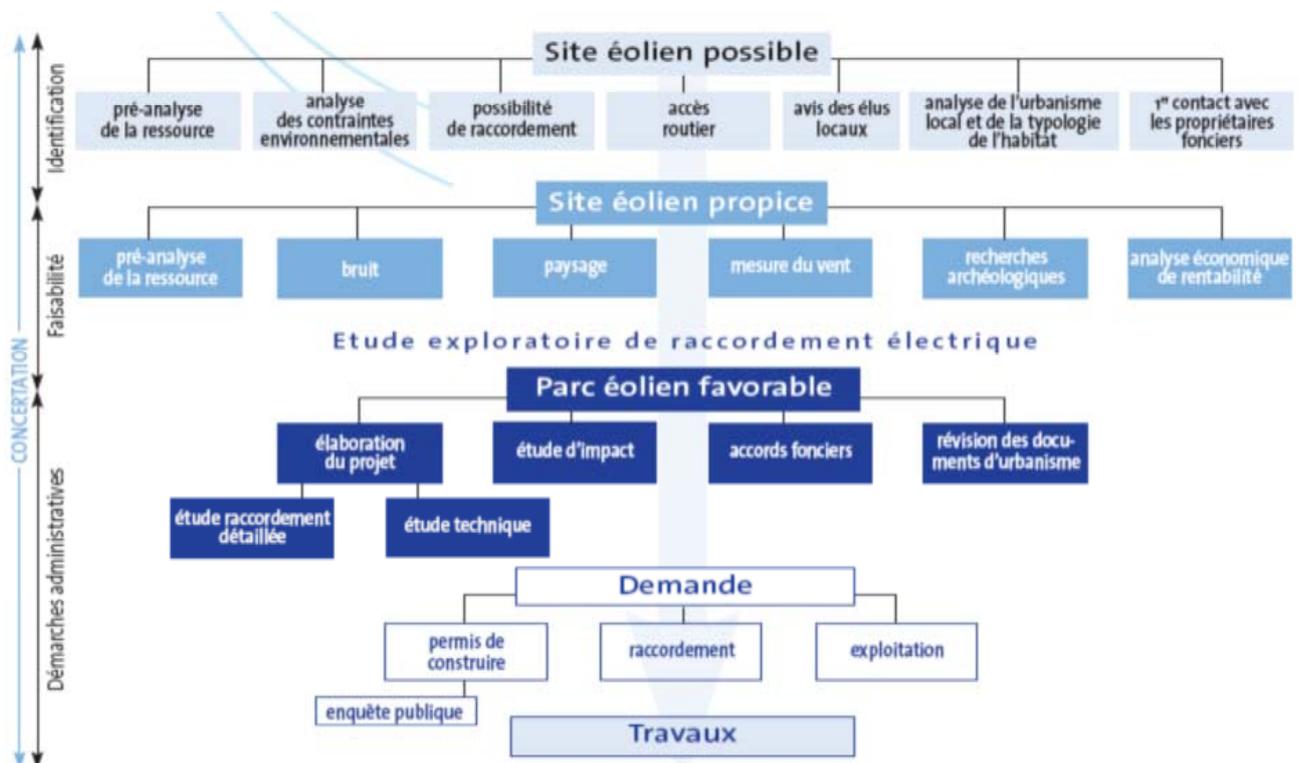
6. Raccordement au Réseau

- Les travaux de renforcement du réseau liés à l'installation du Parc sont à la charge du gestionnaire du réseau (RTE). Le coût de raccordement est à la charge de l'investisseur;
- L'investisseur requiert à RTE une étude exploratoire de faisabilité et de coût
 - File d'attente (durée indéfinie)

7. Démarches complémentaires

- Demande auprès du Préfet d'un contrat commercial de vente : bénéficiaire de l'obligation de rachat par EDF;
- Demande « d'autorisation d'exploiter » auprès du ministre chargé de l'énergie.

Démarche administrative



Réglementation & Tarification du rachat

• Réglementation

➤ **Obligation d'achat (Loi du 10 Juillet 2006)** : tarif garanti pour 15 ans:

o Terrestre (15 ans garantis):

✓ Première phase (10 années) **8,2 c€/kWh**

✓ Deuxième phase (5 années) **2,8 à 8,2 c€/kWh selon sites**

o Offshore (20 ans garantis):

✓ Première phase (10 années) **13 c€/kWh**

✓ Deuxième phase (10 années) **3 à 13 c€/kWh selon sites**

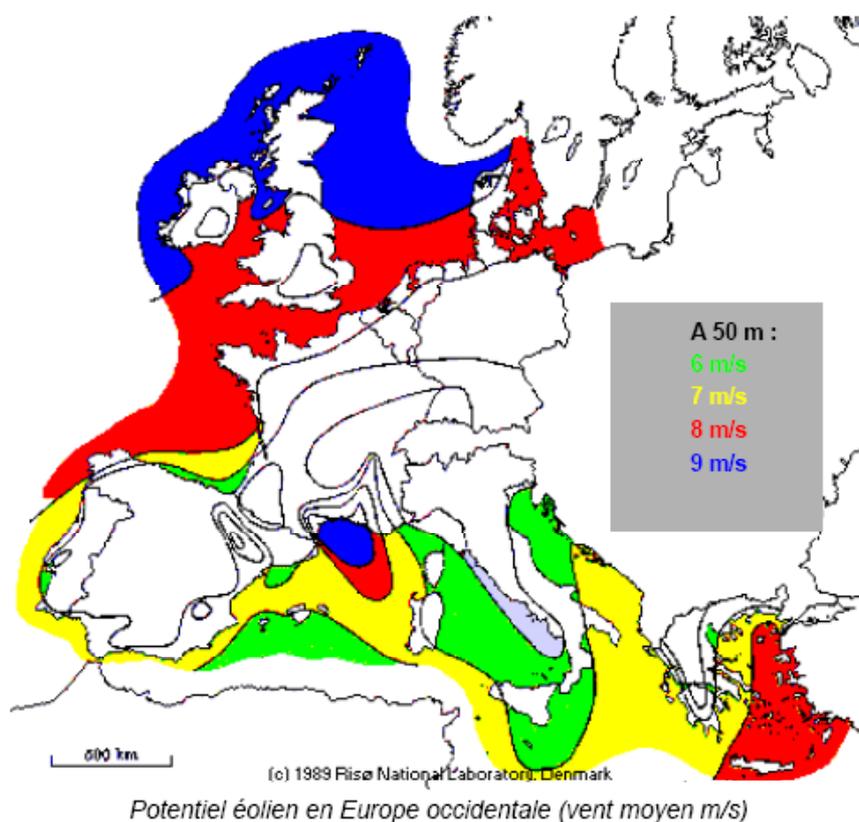
/ Prix achat des particuliers à EDF
HP 12,75 c€/kWh, HC : 8,64 c€/kWh

☀ L'obligation d'achat se limite à des fermes de 12 MW (max)

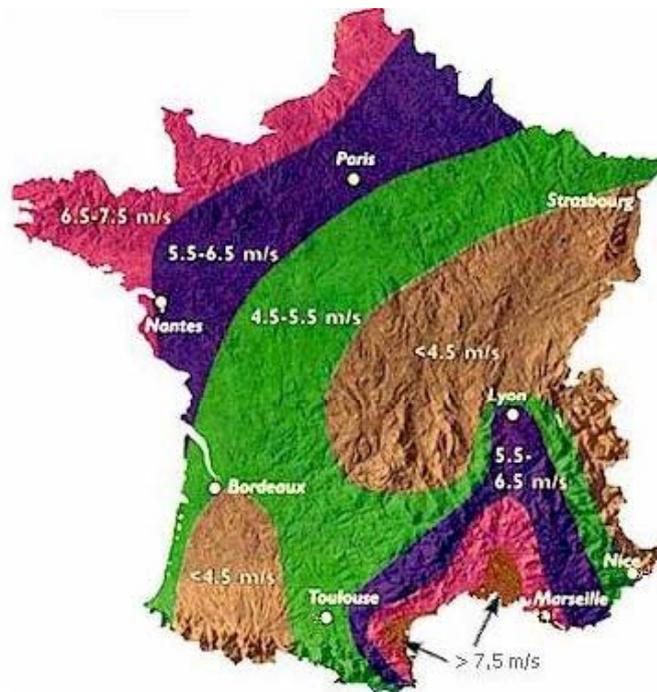
=> dispersion de « petits îlots de puissance »

➤ La durée de vie d'une éolienne est d'environ 20 ans, une grande éolienne sera rentabilisée en 7 à 10 ans en France.

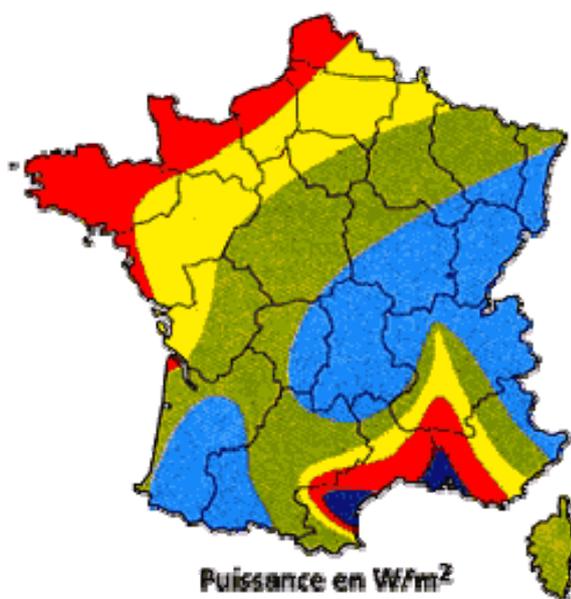
➤ Nécessite un ensemble d'étapes à franchir : « le parcours du combattant »



Gisement éolien en France



Gisement éolien en France



Puissance en W/m^2

	Plaine	Côte maritime	Collines
Red	> 500	> 200	> 1800
Yellow	300-500	400-700	1200-1800
Green	200-300	250-400	700-1200
Blue	100-200	150-250	400-700
Light Blue	< 100	< 150	< 400

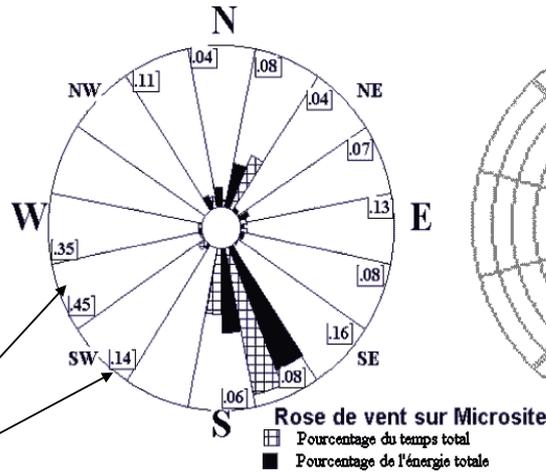
Source : IUP ANVAR/EM 1996 - SOE/EM

Nécessite des vents réguliers :

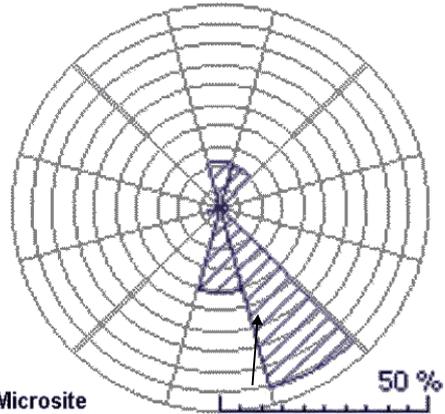
- ✓ Vitesse moyenne minimale du vent :
4,5 m/s à 10 m de hauteur
- ✓ Régions côtières
- ✓ Sommets ou cols en montagne
- ✓ Vallées orientées E-O

Caractérisation du vent

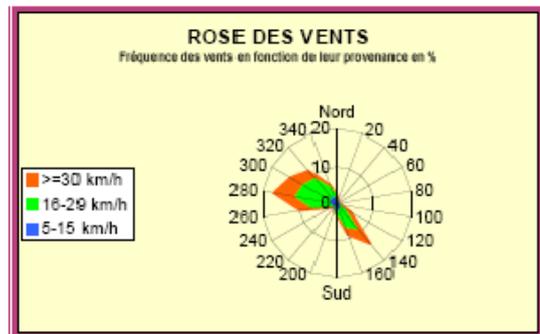
La rose des vents (site du Havre)



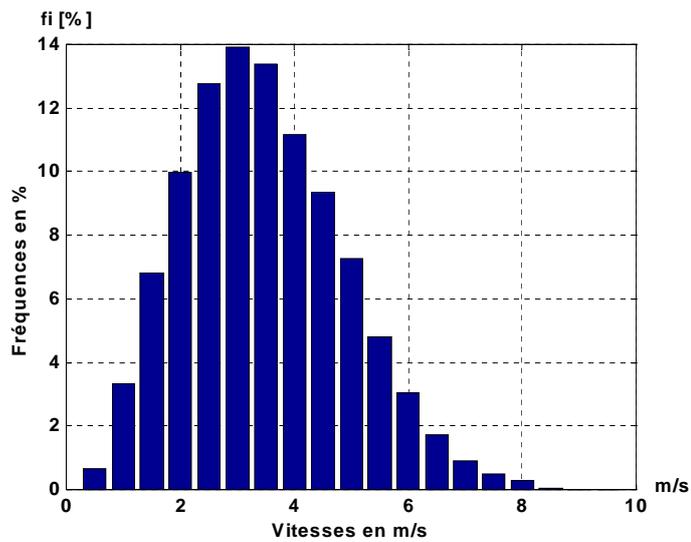
Moyenne de l'intensité de turbulence par secteur



La rose des vents (Toulouse)



Distribution des vents sur une année



% temps passé à une vitesse de vent donnée

Détermination du diamètre :

Puissance de vent disponible : $P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot V^3$

Puissance récupérable : $C_p = 0,59$ maximum

Eolienne du marché : $C_p = 0,25$ à $0,4$

Eolienne autoconstruite : $C_p = 0,15$ à $0,2$

Ex : pour 3 m de diamètre et à 10 m/s, $P = 750$ à $1500W$

$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$
 $\rho \sim 1,25 \text{ kg/m}^3$, masse volumique de l'air
 $P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$
 $P_{max} = \rho S V_1^3 \left(\frac{8}{27}\right)$
 Les éoliennes détournent le vent

Aérodynamique des turbines éoliennes

• Vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_{vent}}$$

