

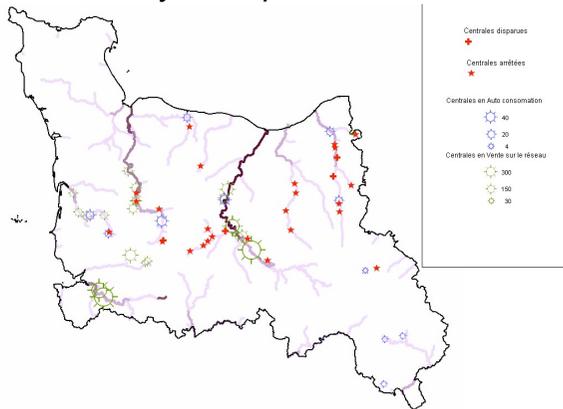
# HYDRO-ELECTRICITE



# L'Hydroélectricité

## État des lieux

*Exemple: La production d'électricité d'origine hydraulique en Basse-Normandie. Petite région hydraulique*



**La grande hydroélectricité :**  
 Usage : production électrique en injection  
 Potentiel : inexistant sauf marémotrice

**La micro, mini et petite hydroélectricité :**  
 Usage : production électrique en réinjection ou en réseau autonome, mécanique

Type	Puissance
Micro	100 kW ou moins – 1 ou 2 maisons
Mini	100 kW à 1 MW – petite usine ou collectivité isolée
Petite	1 MW à 20 MW – production indépendante

# L'hydroélectricité

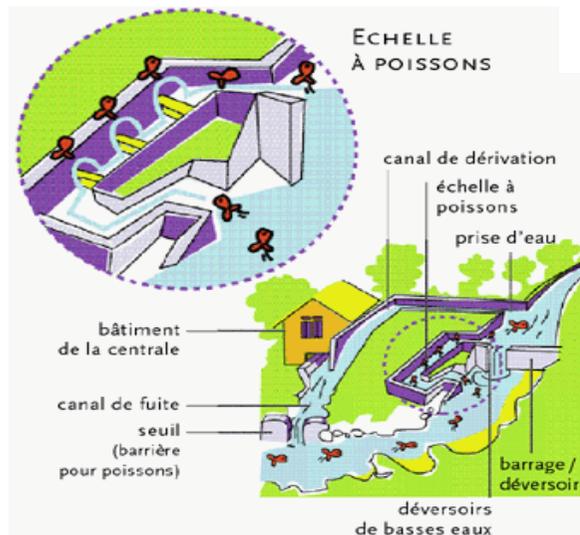
## Potentiel

Exemple: 3500 moulins ont existé en Basse-Normandie - la réhabilitation de l'ensemble des installations représenterait : 76,5 MW

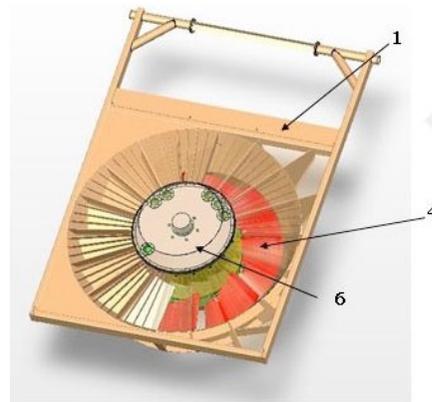
Potentiel de réhabilitation : de 3 à 5 MW

Une prise en compte de l'environnement déterminante pour l'avenir de la production

Des technologies **adaptées** à développer



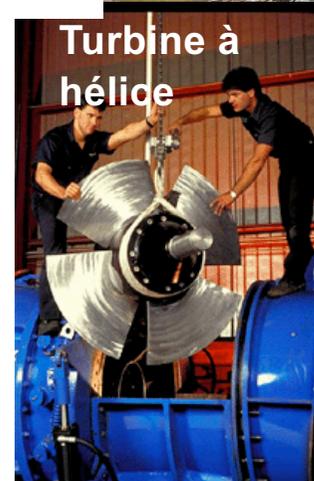
Technologie "au fil de l'eau"



2. Moyeu et roue de la structure



Moulin



Turbine à hélice



Turbine Pelton

# Définition

Classement par type :

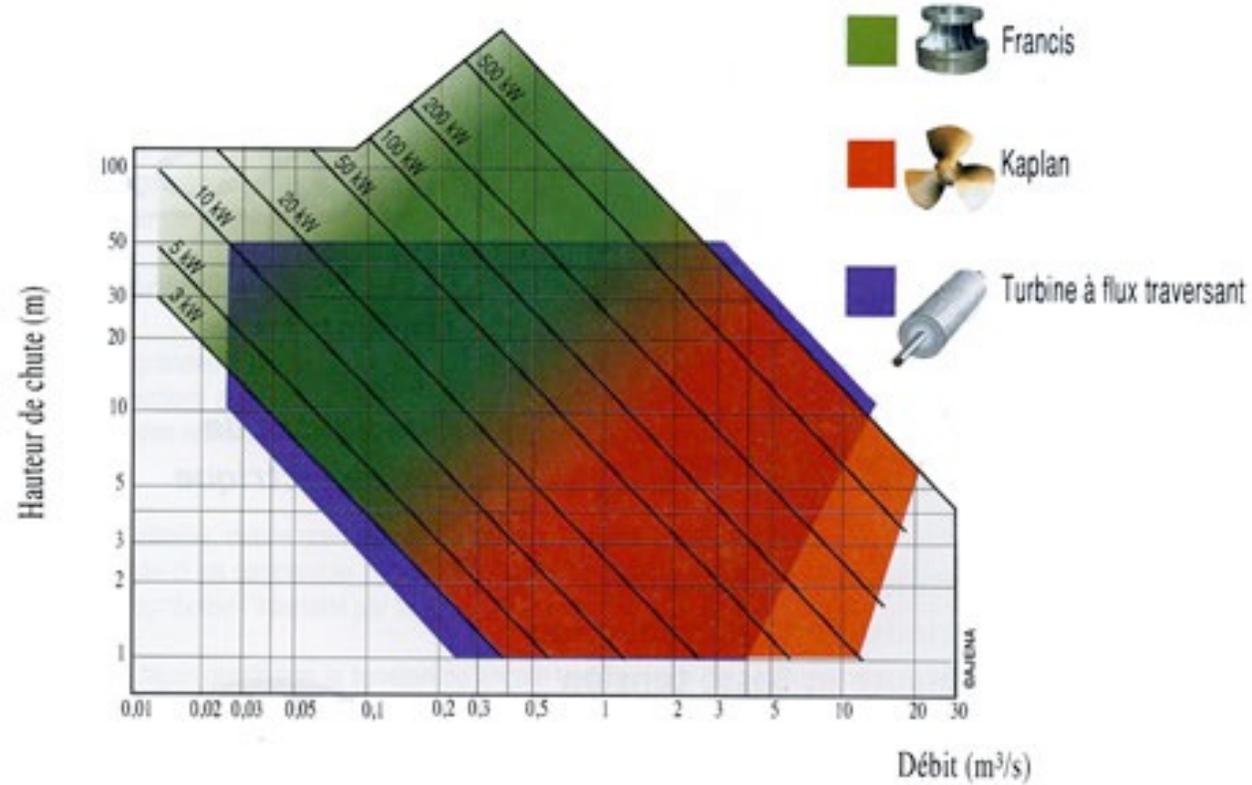
- **Hydraulique au « fil de l'eau »** : pas de stockage, la production suit le débit du cours d'eau
- **Hydraulique de barrage** : Création d'une retenue d'eau, permet de moduler la production en fonction de la demande. Stockage intersaisonnier possible.
- **Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)** : Méthode de stockage d'énergie, constituée de deux retenues d'eau d'altitude différente, reliées par une conduite forcée munie d'un groupe réversible turbinage/pompage

# L'hydroélectricité

## Choix du type de technologie

Le graphique ci-dessous vous donne une première idée du choix d'une turbine.

Attention ! Ces données varient suivant les caractéristiques des différents produits proposés par les constructeurs.



# Définition

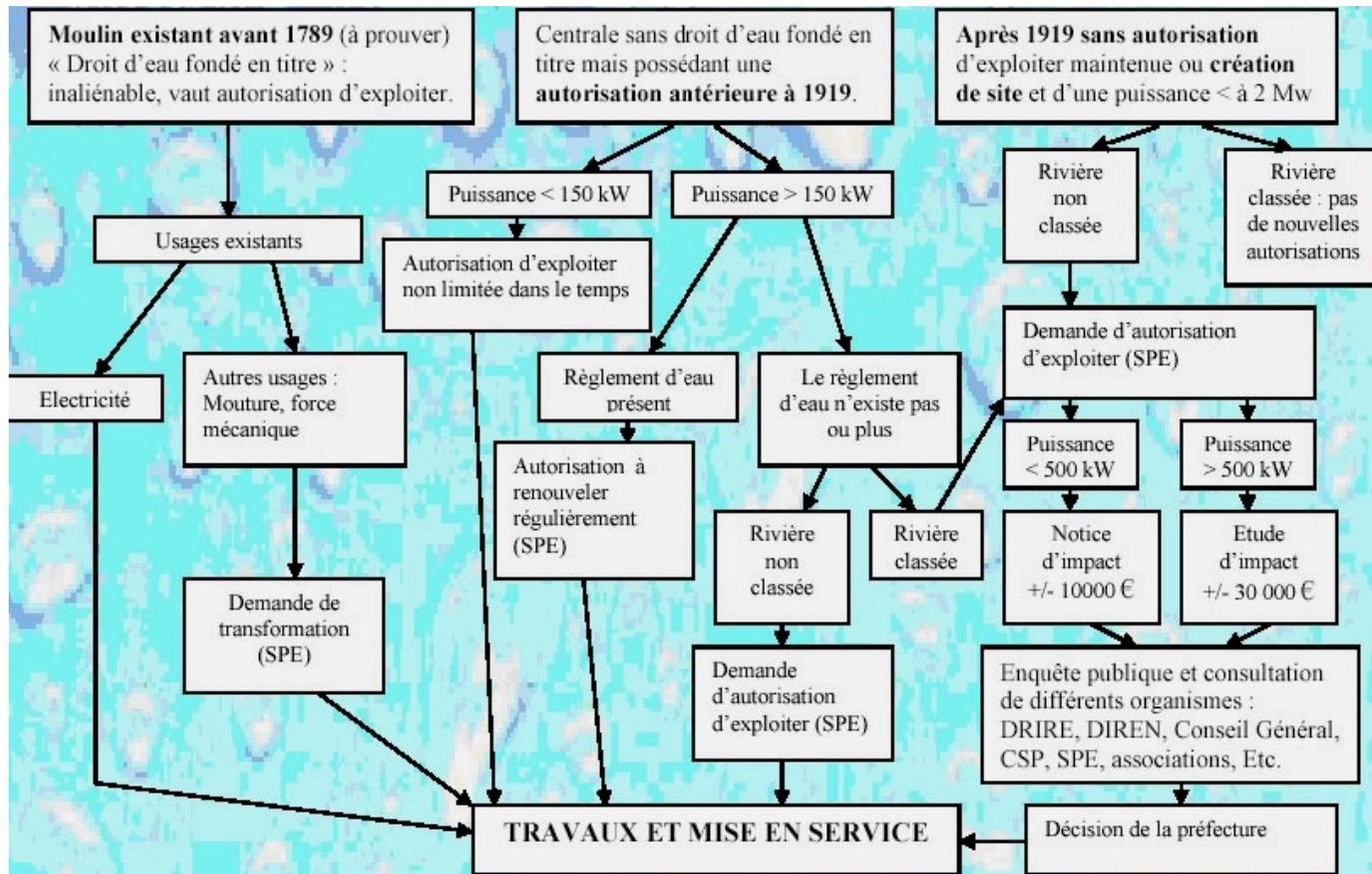
## Puissance

$$P = \rho g Q H$$

- P : puissance [W]
- $\rho$  : densité de l'eau [kg/m<sup>3</sup>]
- g : accélération de la pesanteur [m/s<sup>-2</sup>]
- Q : Débit [m<sup>3</sup>/s]
- H : différence de hauteur d'eau [m]
  
- Pour simplifier  $P = 7QH$

# L'hydroélectricité

## Comment faire ? Le trajet administratif !



SPE = Service de la Police de l'Eau

► Pour des petites puissances, seul les sites ayant un droit d'eau fondé en titre ou bénéficiant d'une autorisation antérieure à 1919 paraissent acceptables. En dehors de ces 2 configurations, l'ampleur des démarches et les coûts d'étude ou de traitement sont démesurés

# Technologies

STEP de Revin (4x200MW)



# Exemples extrêmes !

## Barrage des trois gorges

- 18 200 MW (85 TWh)
- 1,8 Mhab déplacés

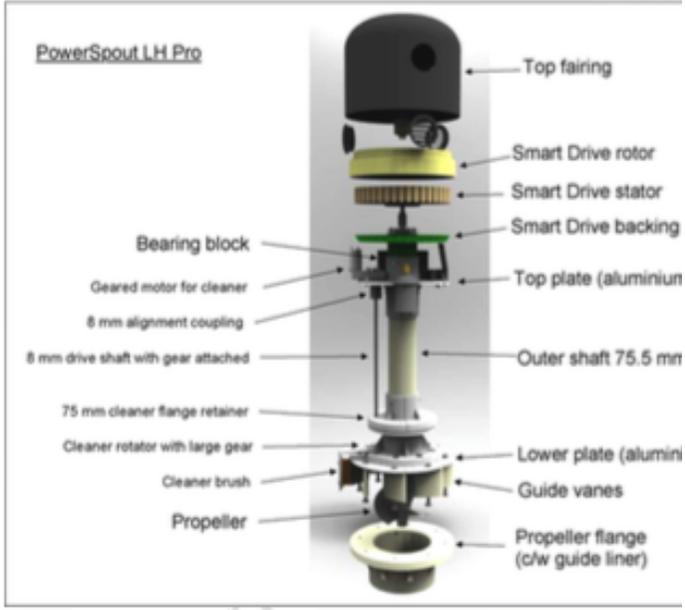


Pico-hydro 120 W

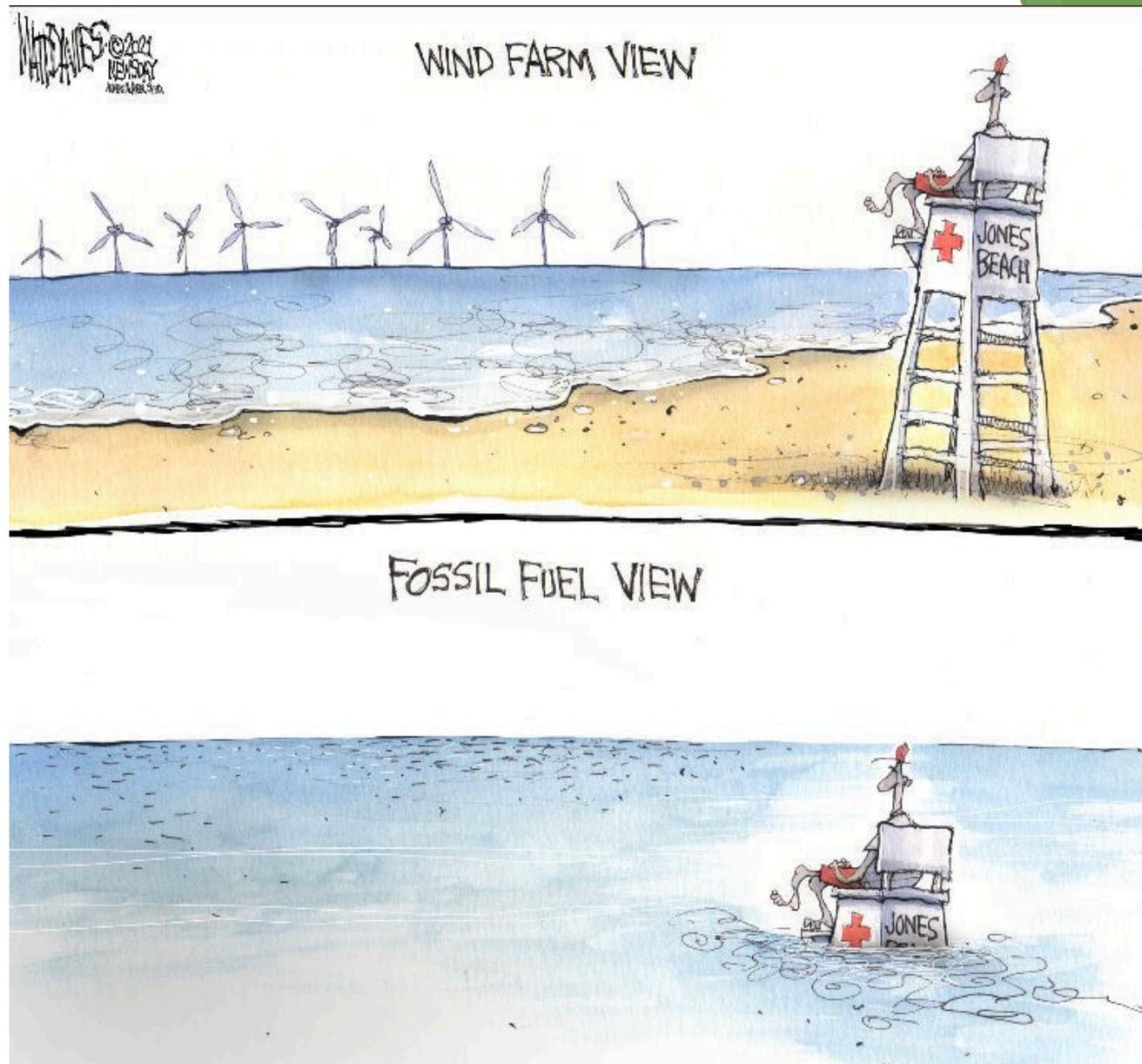


# Exemples pico-hydro de 100 à 5 000 W

(Low Head 1600 W maximum output/unit)



# EOLIEN



# L'éolien Terrestre

## Le Grand éolien en chiffres



### ↳ Caractéristiques techniques :

- Pour une machine d'1,3 MW : hauteur 60 m, rayon 25 m, nacelle 45 t, mat 75 t, rotor 49 t

### ↳ Investissement : 1€ du W

### ↳ Retombées économiques territoriales :

- 1 500 € /MW/an (location du terrain)
- 550 € /MW et par point de TP (Exemple pour une TP de 10 % et pour 1 éolienne de 2 MW :  $550 \times 10 \times 2 = 11\ 000$  €)

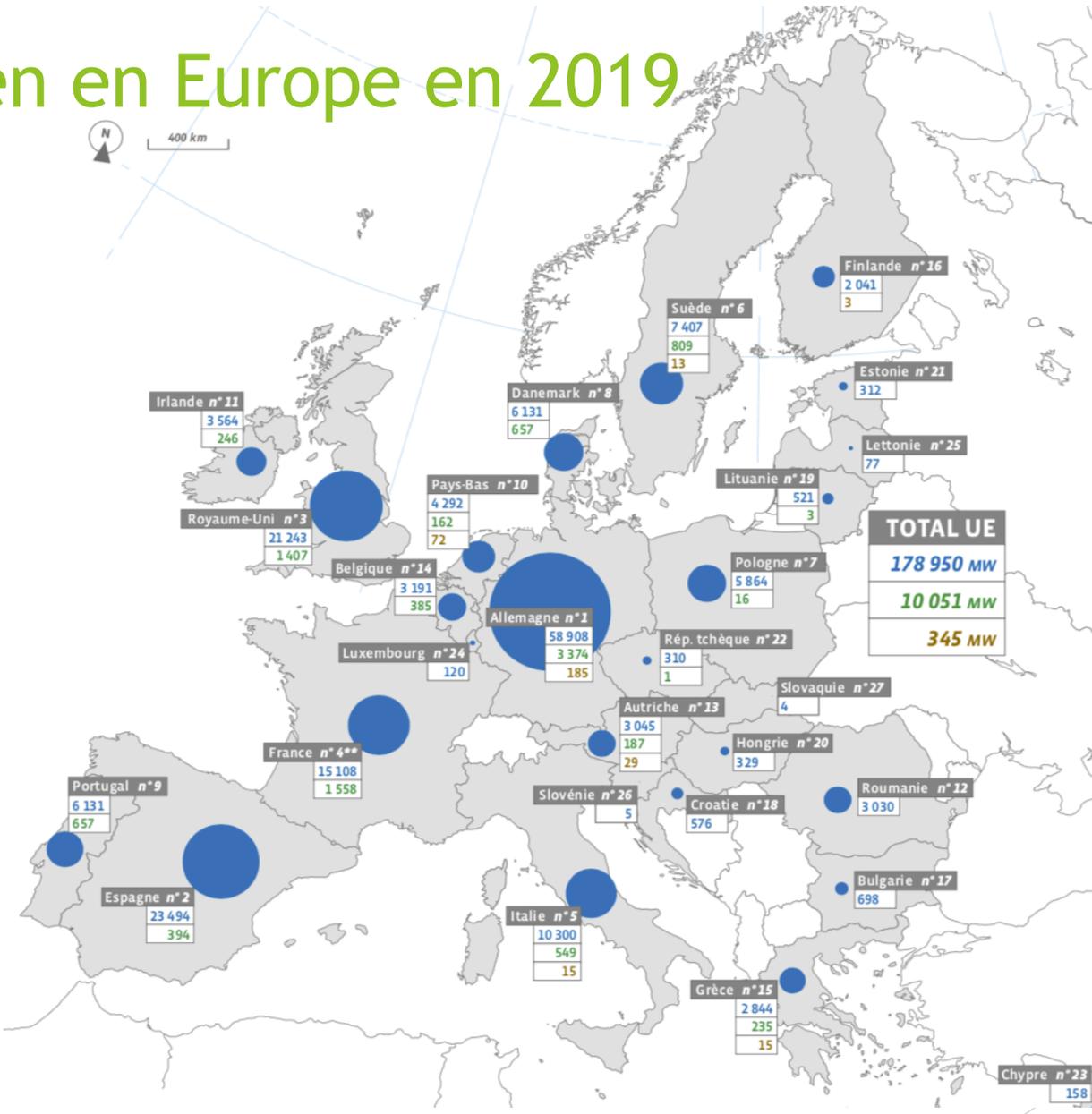
### ↳ Retombées énergétiques locales :

- un parc de 12 MW alimente hors chauffage 10 à 15000 foyers environ (production : 2 à 3000 kWh/an)

### ↳ Des **impératifs** pour la réussite du projet :

- **La sensibilisation**
- **La démocratie participative**

# Eolien en Europe en 2019



Production d'électricité d'origine éolienne dans les pays de l'Union européenne en 2017 et 2018 (en TWh)

	2017	Dont offshore	2018	Dont offshore
Allemagne	105,693	17,675	111,590	19,341
Royaume-Uni	50,004	20,916	55,802	25,503
Espagne	49,127		50,787	
France	24,711		27,900	
Italie	17,742		17,492	
Suède	17,609	0,670	16,716	0,636
Pologne	14,909		15,000	
Danemark	14,772	5,180	13,892	4,630
Portugal	12,248		12,657	
Pays-Bas	10,569	3,700	10,549	3,630
Irlande	7,445		7,500	
Roumanie	7,407		7,410	
Autriche	6,574		6,700	
Belgique	6,511	2,645	6,418	3,311
Finlande	4,795	0,109	5,857	0,244
Grèce	5,537		5,800	
Bulgarie	1,504		1,600	
Lituanie	1,364		1,400	
Croatie	1,204		1,334	
Hongrie	0,758		0,800	
Estonie	0,723		0,800	
Rép. tchèque	0,591		0,615	
Luxembourg	0,235		0,268	
Chypre	0,211		0,220	
Lettonie	0,150		0,150	
Slovaquie	0,006		0,006	
Slovénie	0,006		0,006	
Malte	0,000		0,000	
<b>Total UE 28</b>	<b>362,404</b>	<b>50,894</b>	<b>379,270</b>	<b>57,295</b>

Source : EurObserv'ER 2019.

# L'éolien

État des lieux 2018/2019  
Onshore et offshore

Puissance éolienne offshore installée dans l'Union européenne fin 2018 (en MW)

	2017	2018
Royaume-Uni	6 987,9	7 940,0
Allemagne	5 427,0	6 405,0
Danemark	1 263,8	1 700,8
Belgique	877,2	1 178,0
Pays-Bas	957,0	957,0
Suède	203,0	195,8
Finlande	72,7	72,7
Espagne	5,0	10,0
France	0,0	2,0
<b>Total UE 28</b>	<b>15 793,6</b>	<b>18 461,3</b>

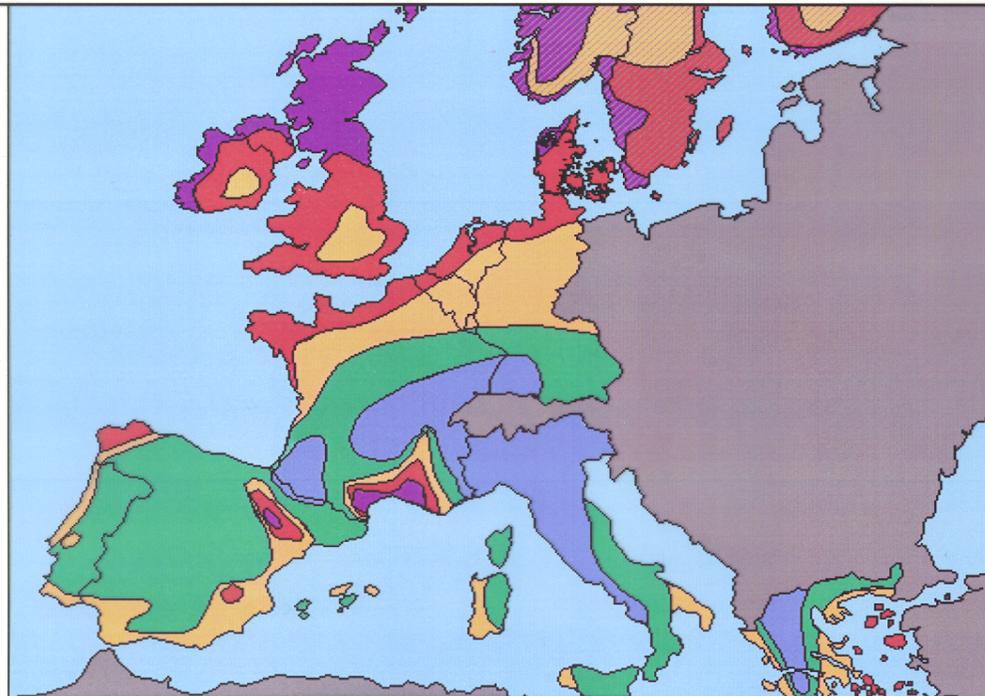
Source : EurObserv'ER 2019.

📌 France : une progression régulière en mais faible par rapport aux autres pays leaders

## Potentiel éolien à 50 m du sol

Terrain accidenté    Plaine    Bord de mer    Pleine mer    Collines

	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>						
	>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
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							



La France est  
le 2eme  
potentiel  
après  
l'Angleterre

# L'éolien

Préalables à la mise en place d'un parc

Zone ventée,

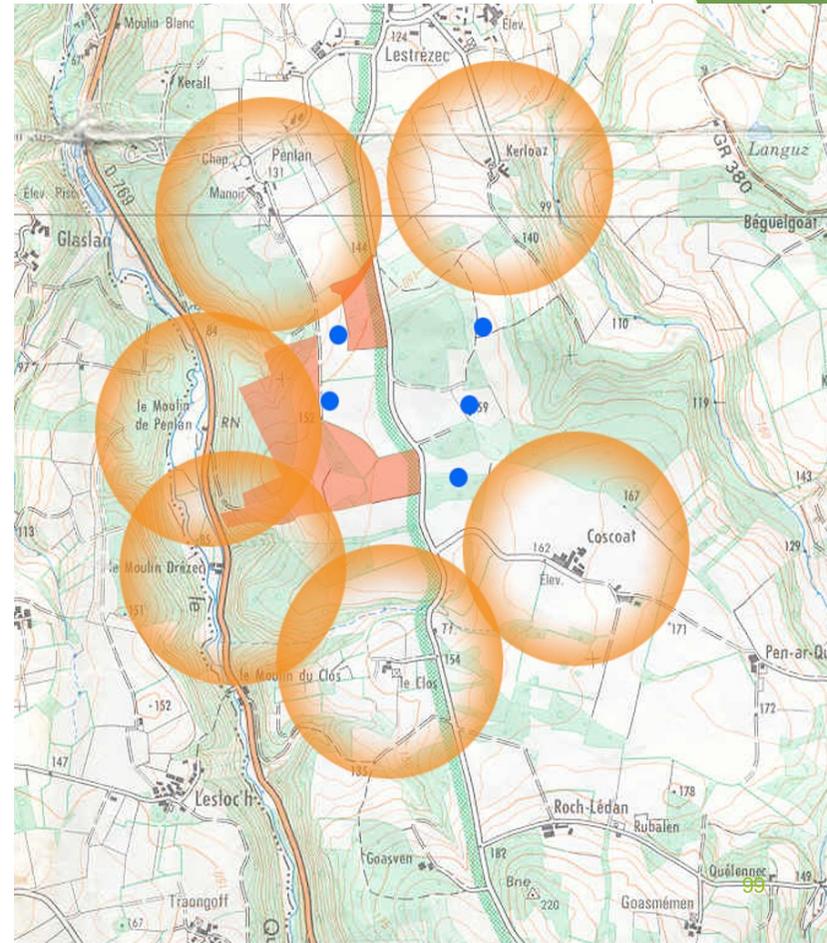
Territoire agricole propice à l'implantation d'éoliennes

Proximité du raccordement : poste source à - de 10 Km

Zones éloignées des bourgs et des habitations (> à 500 m environ)

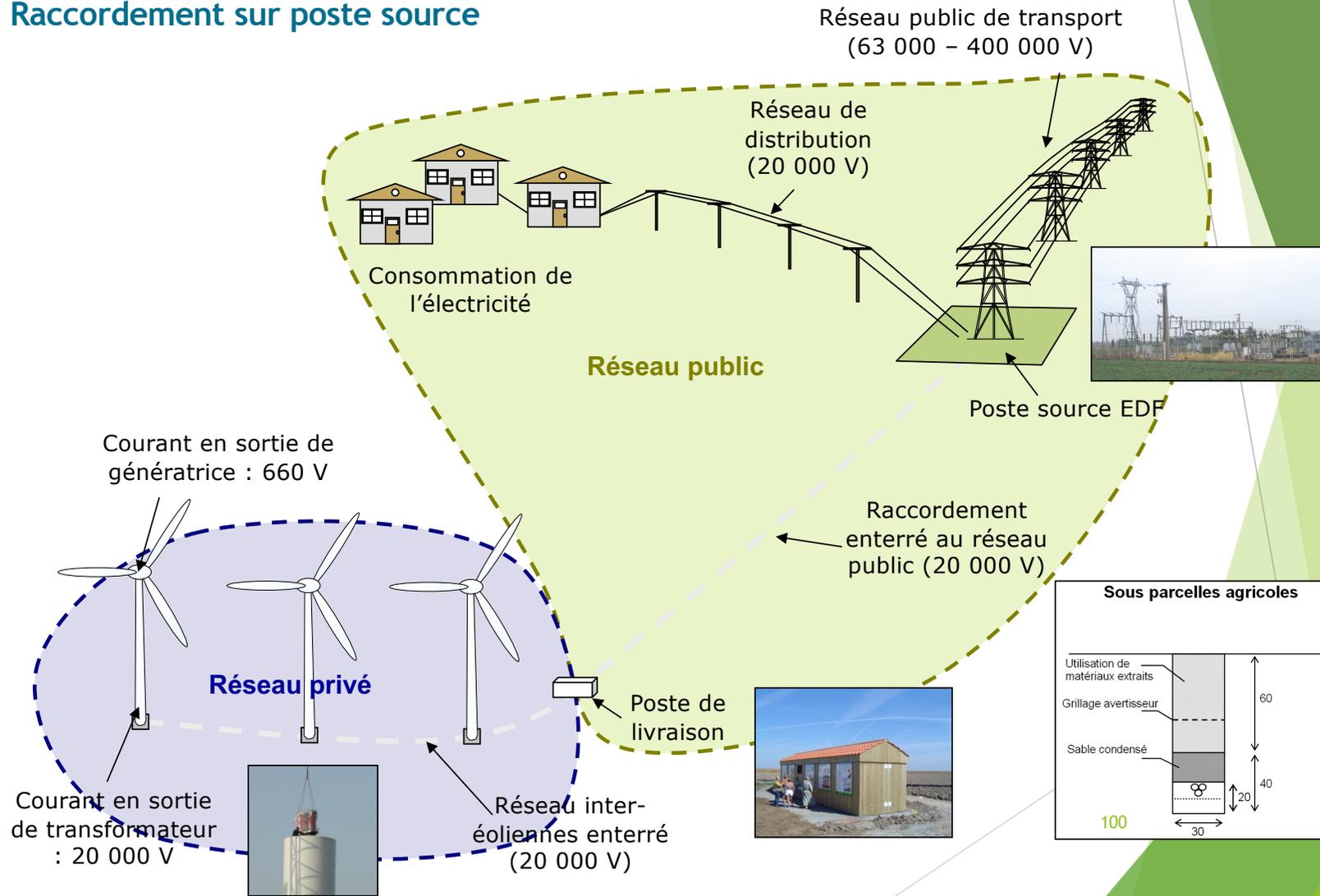
Prise en compte des servitudes présentes sur le site (servitudes aéronautiques, hertziennes...)

Accès facile par le réseau routier



# Raccordement électrique

## Raccordement sur poste source



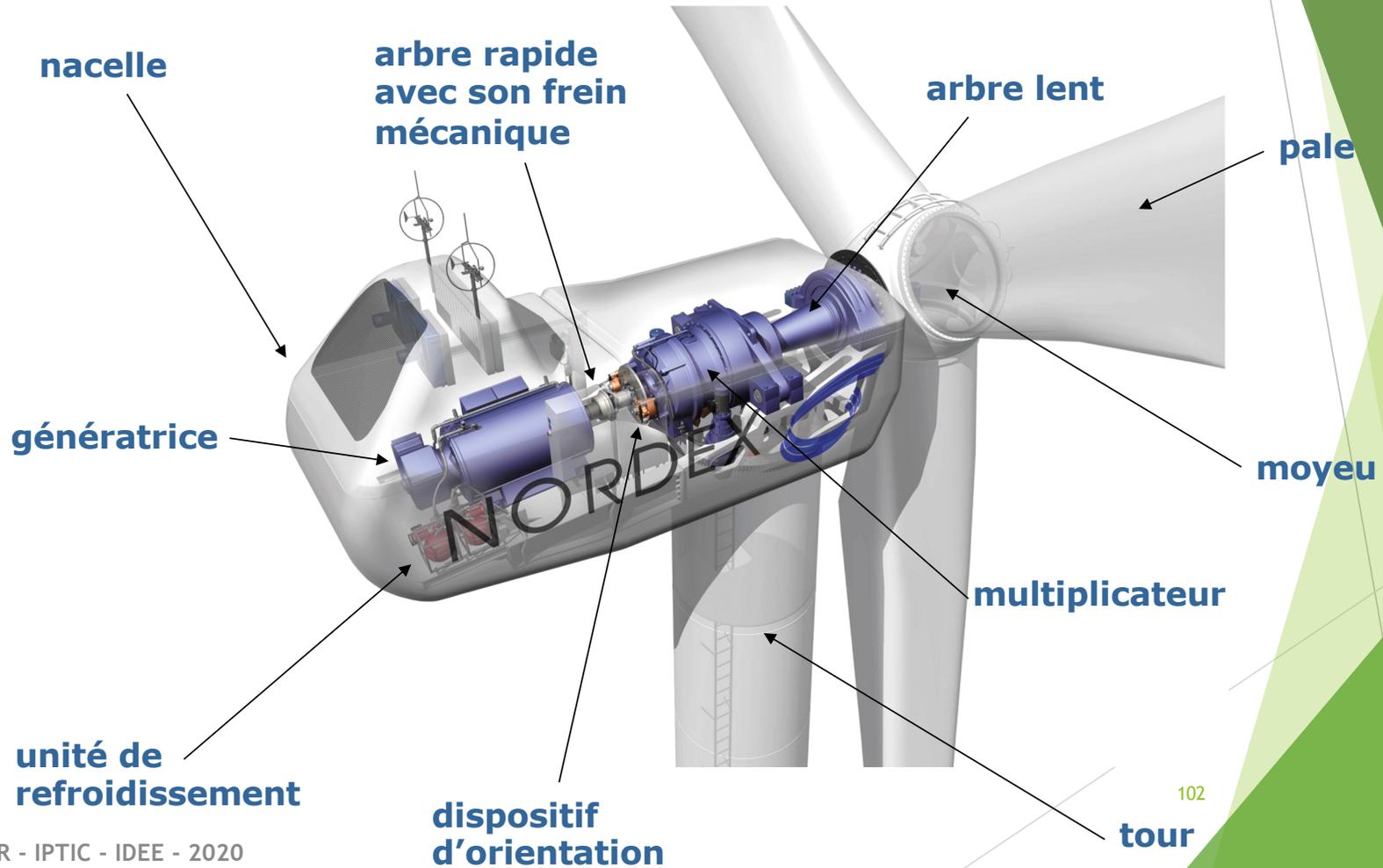
# Pourquoi l'énergie éolienne ?

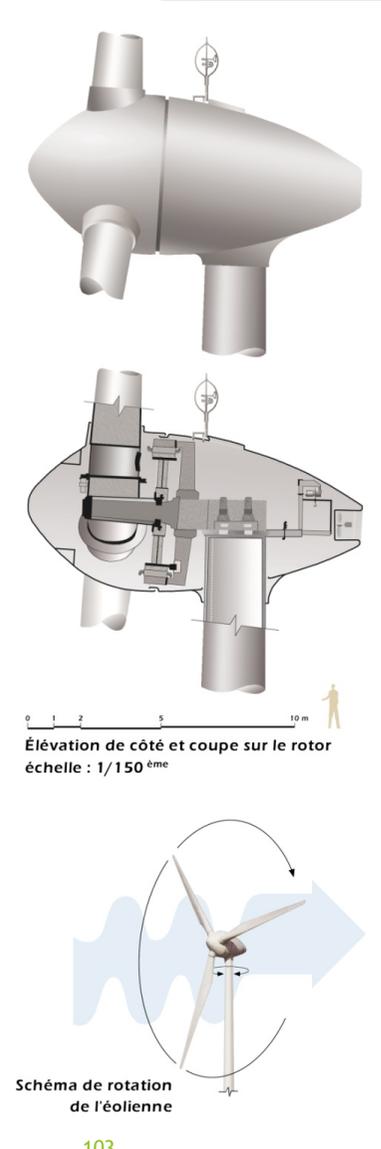
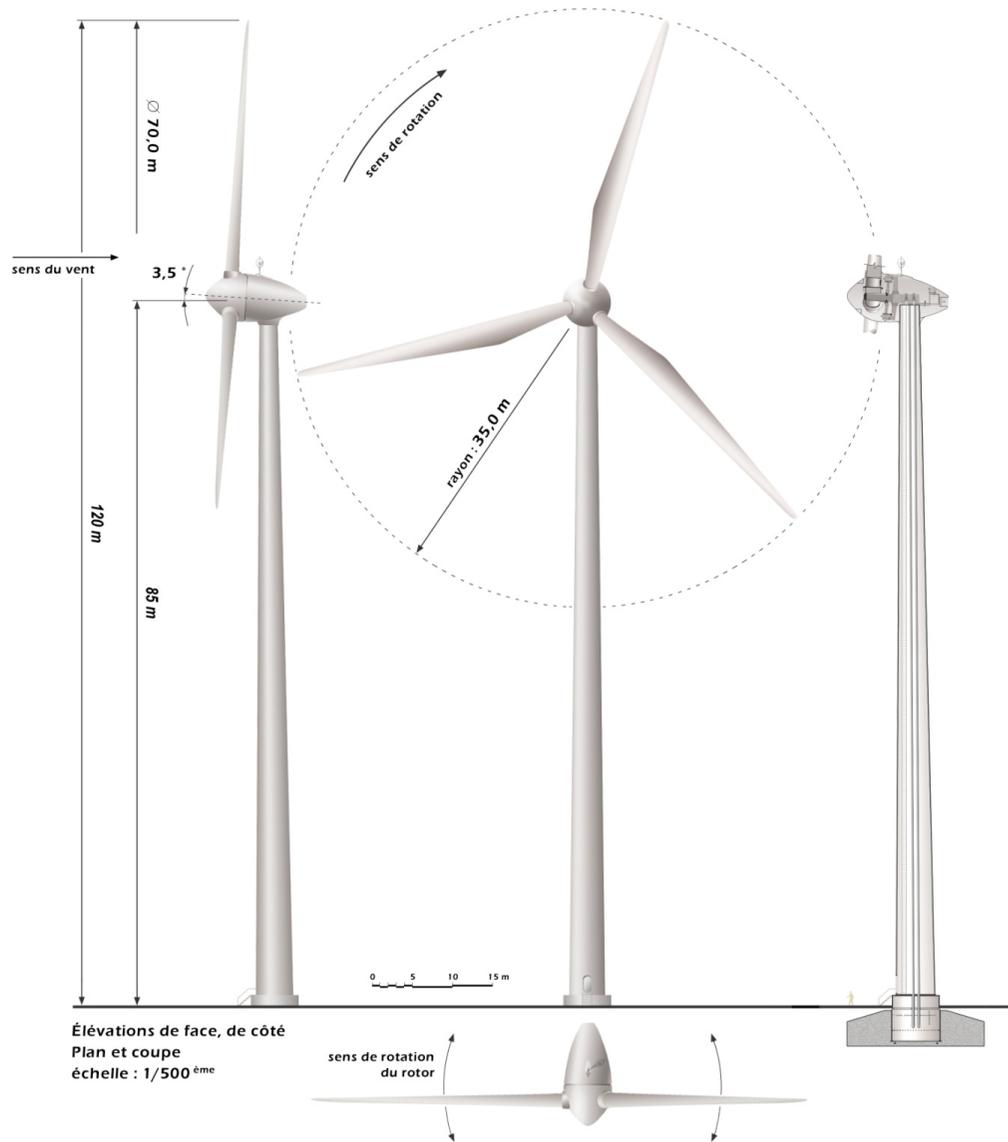
- Energie **propre** (pas de dégagement liquide, solide, gazeux, pas de déchets à vie longue)
- Energie sûre (forte disponibilité > 97%, risque technologique minime)
- Energie **de flux renouvelable** (pas de risque d'épuisement)
- **Démantèlement aisé et assuré** (restitution du site à l'état initial, assuré par un dépôt de garanties bancaires)



**L'éolien se veut une référence en matière d'environnement  
exigences très fortes au niveau de l'ensemble des phases du projet.**

# Composants d'une éolienne





## Variabilité de l'énergie éolienne



**L'énergie éolienne est variable,  
elle n'est pas intermittente.**

Les éoliennes sur le territoire français tournent et produisent de l'électricité 95% du temps.  
(Source : ADEME)



**L'énergie éolienne est prévisible.**

Les technologies, notamment météo, permettent de prévoir la production éolienne 3 jours à l'avance.



**Une technologie de plus en plus efficiente.**

L'évolution des technologies permet de produire de l'énergie éolienne avec des vents de plus en plus faibles.

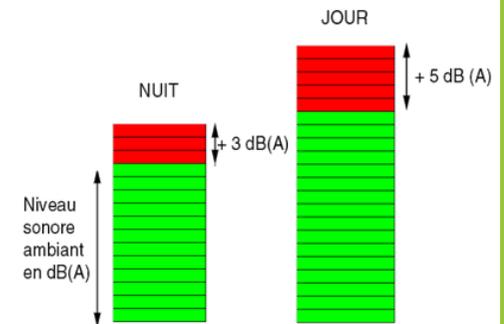
Exemple de facteur de charge observé sur le Calvados : 25%  
(= 2 200h/an à pleine puissance)

## Impact acoustique

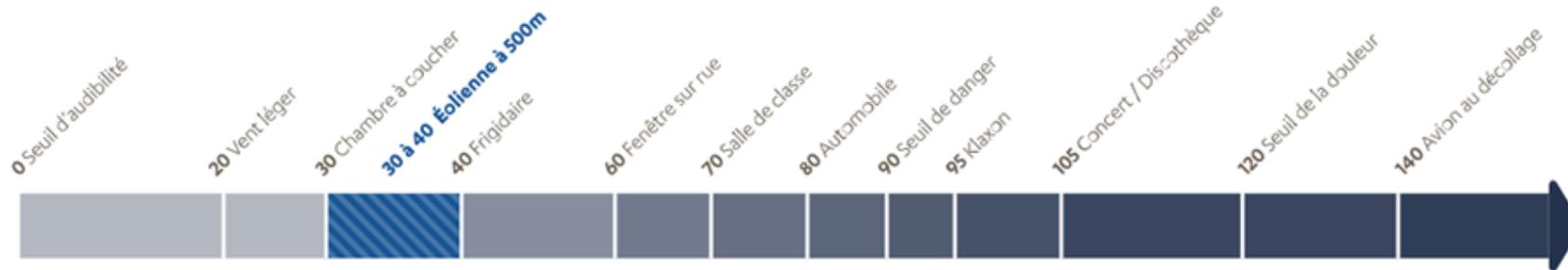


La loi française impose aux parcs éoliens de ne pas dépasser le bruit ambiant de +3 dB la nuit et +5 dB le jour.

Les parcs éoliens de ne pas dépasser le bruit ambiant de +3 dB la nuit et +5 dB le jour.



### Échelle du bruit

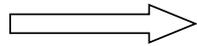


Exemple d'action : Mise en place de plan de bridage nocturne pour des vents compris entre 5 et 6 m/s

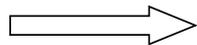
# Impact paysager

L'impact paysager d'un projet éolien est **réel** :

- les éoliennes sont obligatoirement sur un **site exposé** au vent, donc visibles
- les dimensions des éoliennes (80 – 100 m de tour, 125 – 145 m en bout de pale) les rendent forcément visibles



travail avec un **cabinet de paysagistes indépendants**



**Consultation** de nombreuses **administrations** :

- DIREN (Direction Régionale de l'Environnement),
- architecte des bâtiments de France,
- architecte conseil de la DDE et paysagiste conseil de la DDE,
- CAUE, commission des sites.

# Impact Faune-Flore

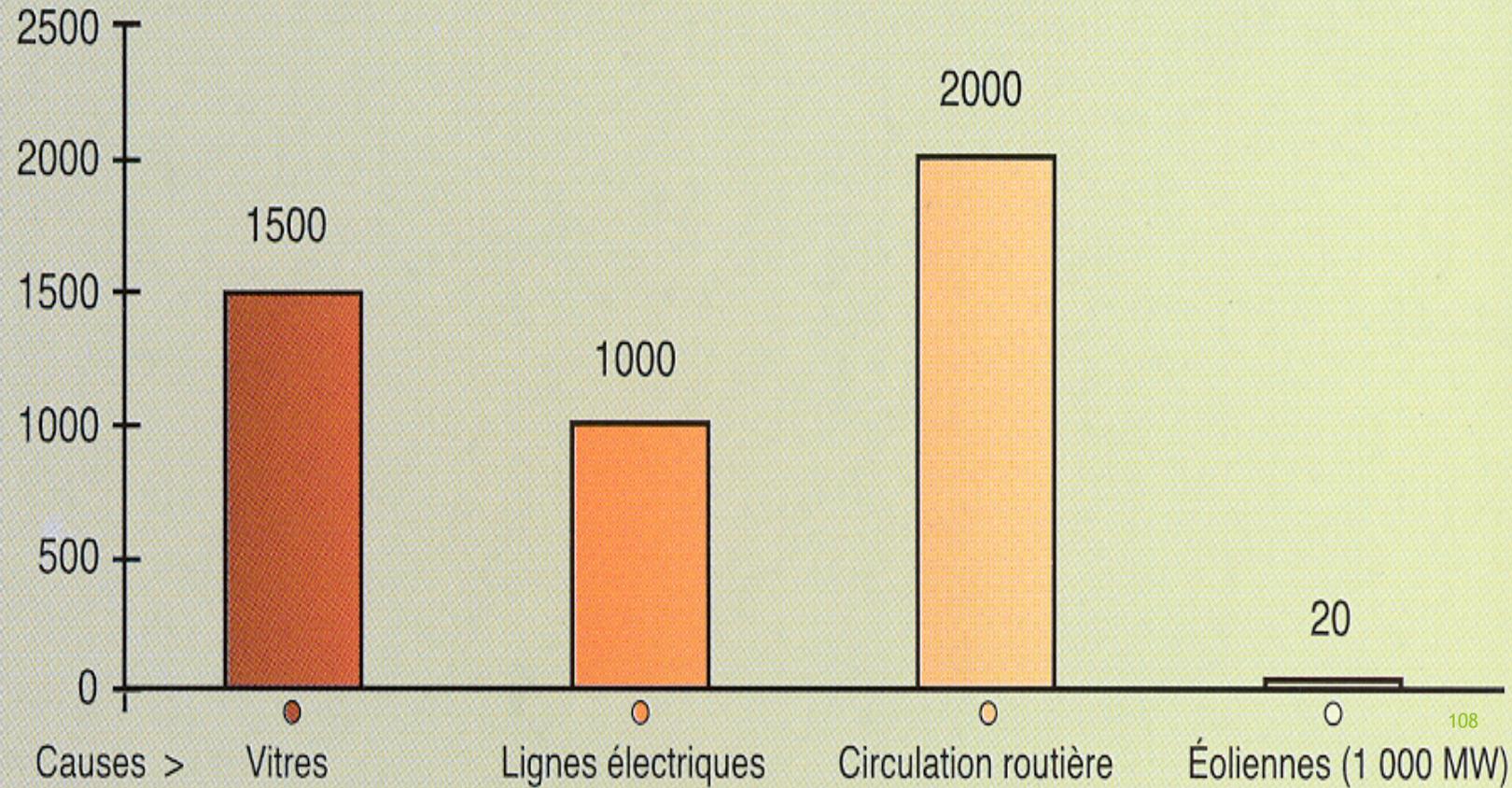
- Etudes sur le terrain par des associations locales de protection de l'environnement
- Participation généralement de la Fédération Départementale des Chasseurs
- Suivis avifaunistiques et chiroptérologiques après installation des éoliennes



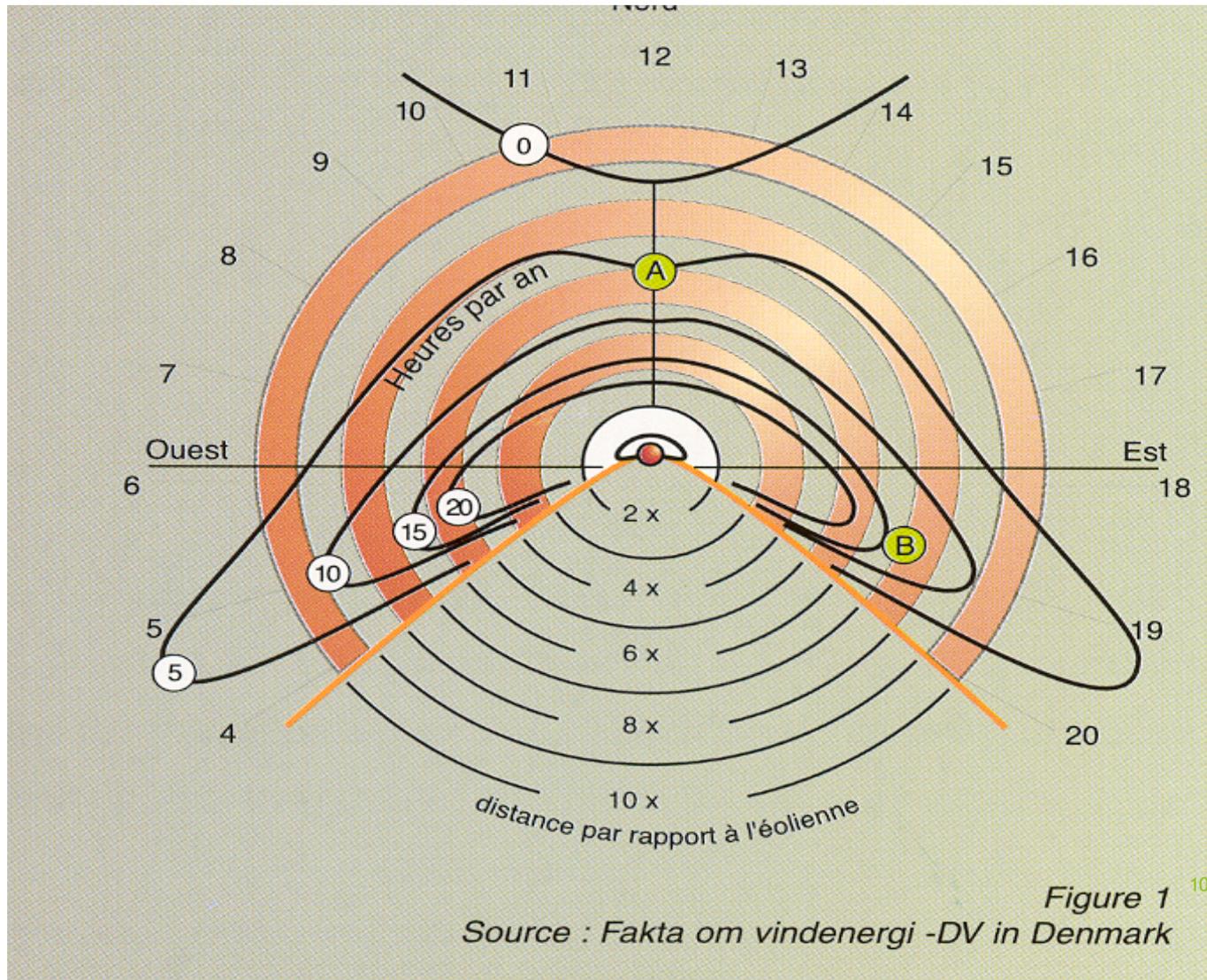
## IMPACT DES EOLIENNES SUR L'AVIFAUNE

> Estimation du nombre d'oiseaux tués par an (Pays Bas)

En millier d'oiseaux



# EFFET STROBOSCOPIQUE – Peu d'impact dans l'année



## Recyclage et démantèlement

### Quel avenir pour un parc éolien ? 3 scénarios possibles :

- Prolongement de la durée de vie,
- Fin d'exploitation et démantèlement,
- « Repowering » (ou renouvellement).

**Démantèlement** → Garanties financières préalables à la mise en activité d'une installation fixées à 50 000€ par éolienne de 2MW et 10 000€ par MW supplémentaires

(Arrêté du 22 juin 2020)

- Démontage des éoliennes, postes de livraison et câbles électriques,
- Excavation totale des fondations,
- Décaissement des aires de grutages et des chemins d'accès (hors avis contraire du propriétaire),
- Remblaiement avec des terres similaires au terrain d'origine,
- Démantèlement validé par un état des lieux contradictoires.

### Recyclage → 90% d'une éolienne est recyclable

- 100% du béton dans le secteur de la construction (granulats),
- 100% des métaux (acier, aluminium, cuivre...),
- Pales valorisées de façon thermique et énergétique (cimenteries).

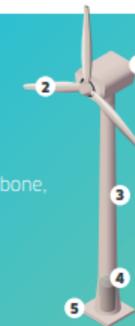


**90%**

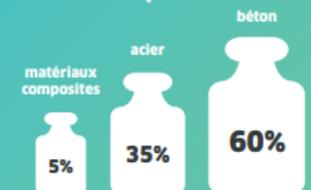
d'une éolienne est recyclable

### De quoi une éolienne est-elle composée ?

- **Nacelle et moyeu (1)** : acier et composites de résine, de fibre de verre et carbone,
- **Pales (2)** : composites de résine, de fibre de verre et carbone,
- **Mât (3)** : béton et acier,
- **Transformateur et installations de distribution (4)** : déchets électroniques et électriques,
- **Fondations (5)** : béton et acier.



### Pourcentages en poids



## Recyclage des pales

### Que deviennent les pâles d'éoliennes ?

- Broyées et mélangées à d'autres composants, elles deviennent un excellent combustible solide dans l'industrie du ciment, remplaçant les carburants fossiles traditionnellement utilisés, comme le mazout.
- Valorisation en aires de jeux ou bancs publics.

### Et à l'avenir...

- A partir des broyats, produire de nouveaux matériaux composites aux performances moindres, mais qui pourraient servir à fabriquer des glissières de sécurité ou des panneaux pour le bâtiment.
- **Sept 2020** : Lancement du projet Zebra (Recherche sur les pales zéro déchet) sur 3 ans ½ avec un budget de 18,5 millions d'euros (IRT Jules Vernes - Nantes).



**Objectif** → Concevoir des pales d'éoliennes en composite thermoplastique, 100% recyclable

## Point sur les « terres rares »

- ▶ Les terres rares regroupent une **quinzaine d'éléments métalliques** (groupe des lanthanides principalement). Ceux qui concernent les éoliennes sont le **Néodyme et le Disprosium**
- ▶ Ces éléments ne sont pas rares sur Terre, mais leur production est principalement localisée en Chine (à 86% en 2017). L'enjeu est donc notre dépendance à ces matériaux.



Seul **3%** de l'**éolien terrestre** en France utilise des terres rares

Terres rares : utilisées pour les générateurs synchrones à aimants permanents, surtout pour l'éolien marin



moins de maintenance  
poids de la nacelle réduit

### Éolien marin

#### Objectifs 2030 en France

Néodyme < 1%  
Disprosium < 4%  
de la demande mondiale annuelle

#### Horizon 2030 dans le monde

Néodyme < 6%  
Disprosium > 30%  
de la production mondiale annuelle

Technologies alternatives : génératrices asynchrones ou génératrices synchrones sans aimants permanent (ou moins)

Pour éviter tout problème, une bonne information est nécessaire !





Ne pas manquer le train !



Auteur : Hervé Martin

# Eolien offshore



Potentiel Offshore considérable

- exemple l'Allemagne prévoit 20-25 GW en 2030 et 40 en 2050 avec peu de façades maritimes (soit l'équivalent de 12 EPR!)

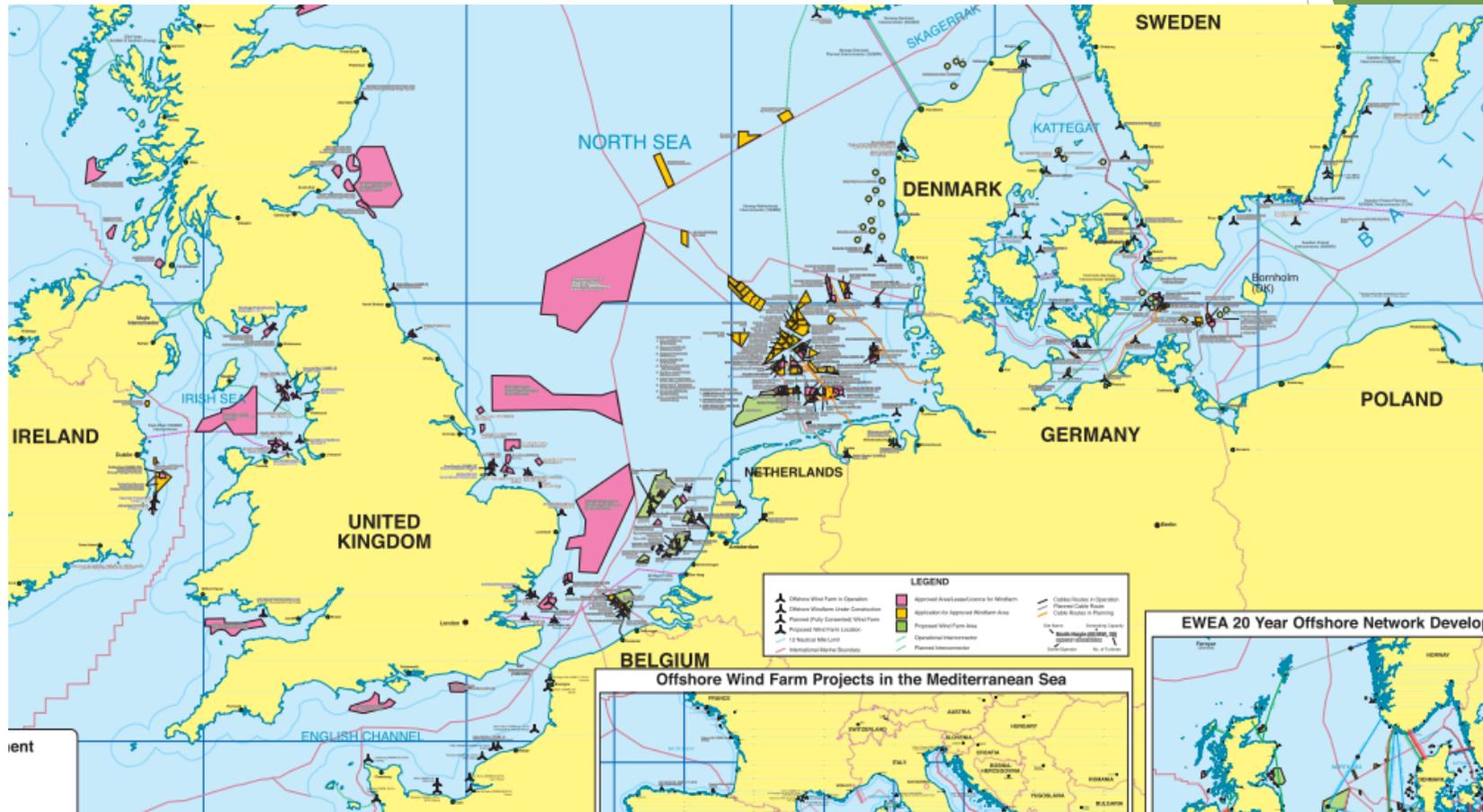
## Les spécificités

- Productible plus important
- Moins de pression sur l'usage de l'espace
- Difficulté de structure (fondation, ancrage)
- Difficulté de maintenance
- Permet innovation technologique (simplification de l'orientation de la nacelle...)

# Eolien offshore



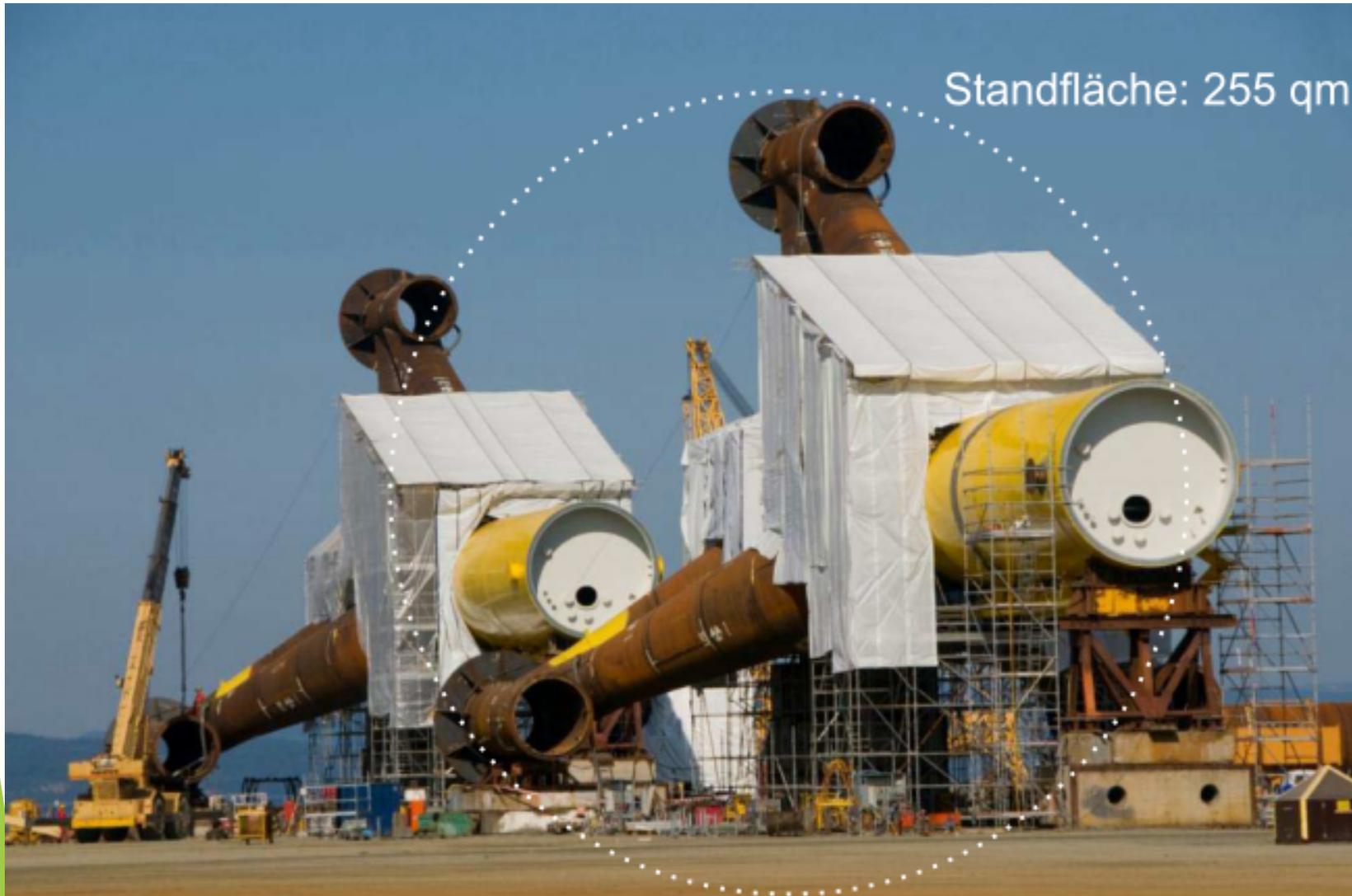
# Eolien offshore



3500 MW aujourd'hui,  
Plus de 100 000 MW annoncés



# De très grosses pièces





# Expédition des tripodes, Cuxhaven (près de Hambourg)



# Des manutentions spéciales (ici Alpha Ventus)



# Béton posé (Thornton-BE)



# UK – DE : le match du siècle



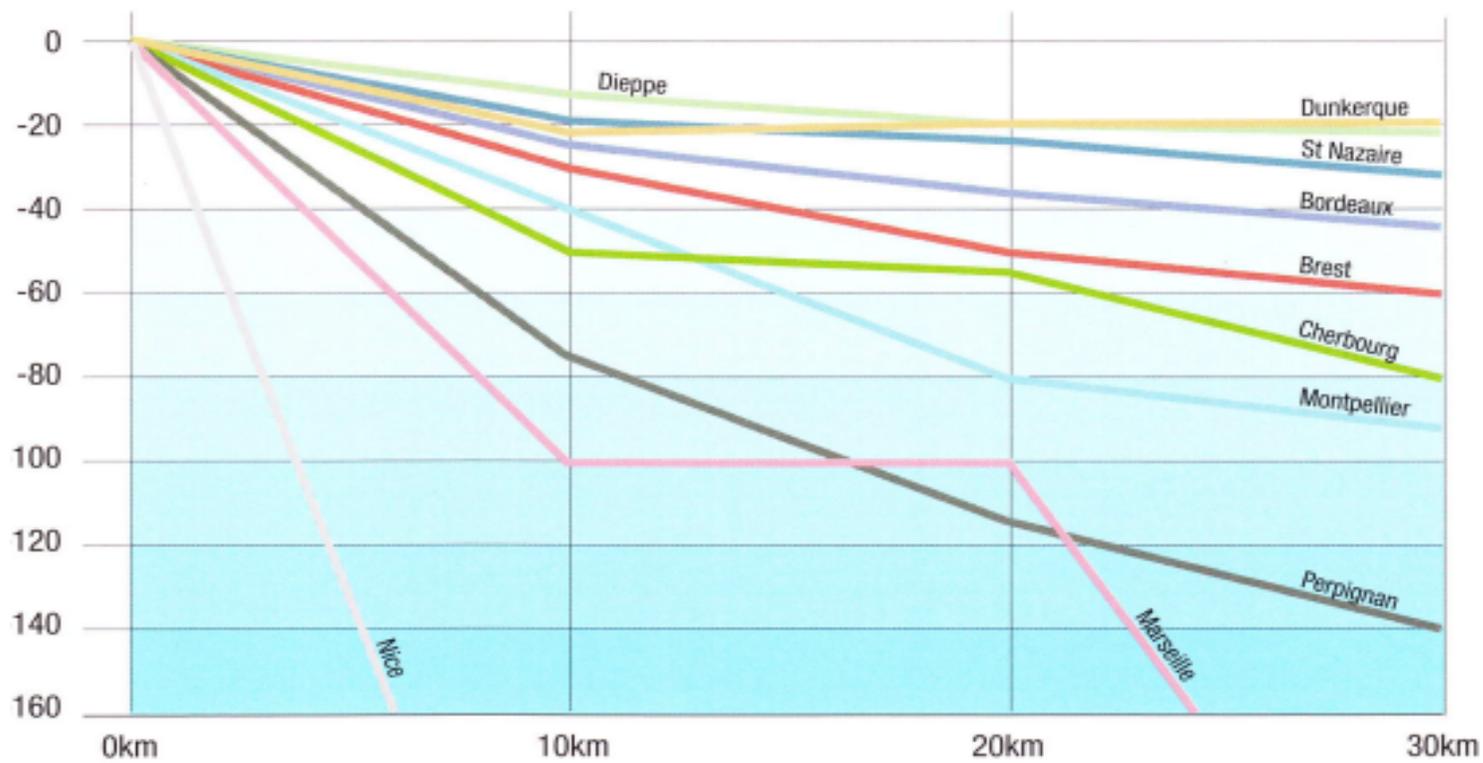
# Des ports spécialisés : Cuxhaven (DE) vs Hull (UK)



Niedersachsens Strategie  
für die Offshore-Windenergie

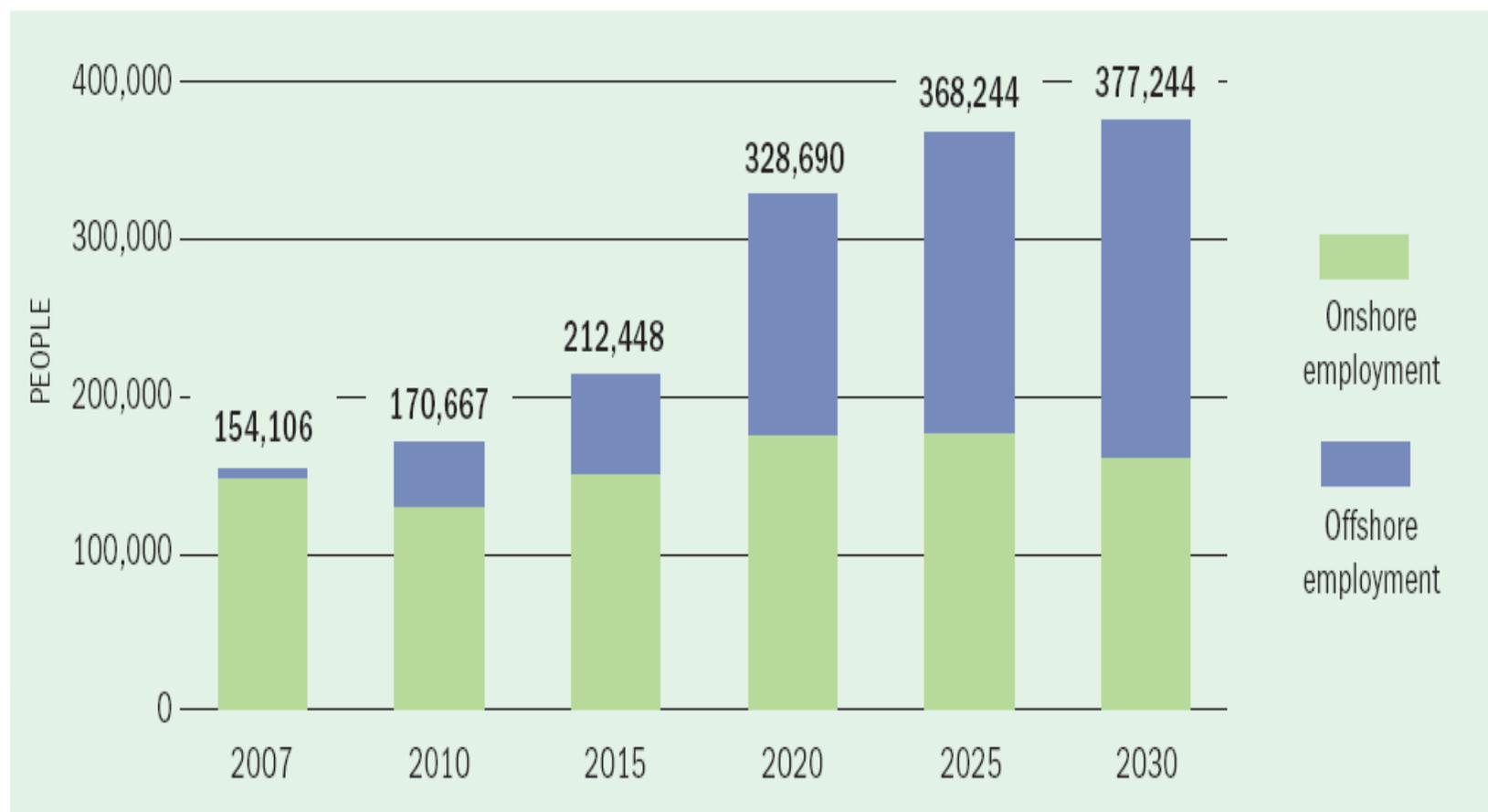
# Les meilleurs sites sont au Nord

Profondeurs depuis les ports



# A terre et en mer : de 180 000 emplois actuels à 370 000 emplois en Europe (source EWEA)

FIGURE 02: Wind energy sector employment (EU 2007-2030)

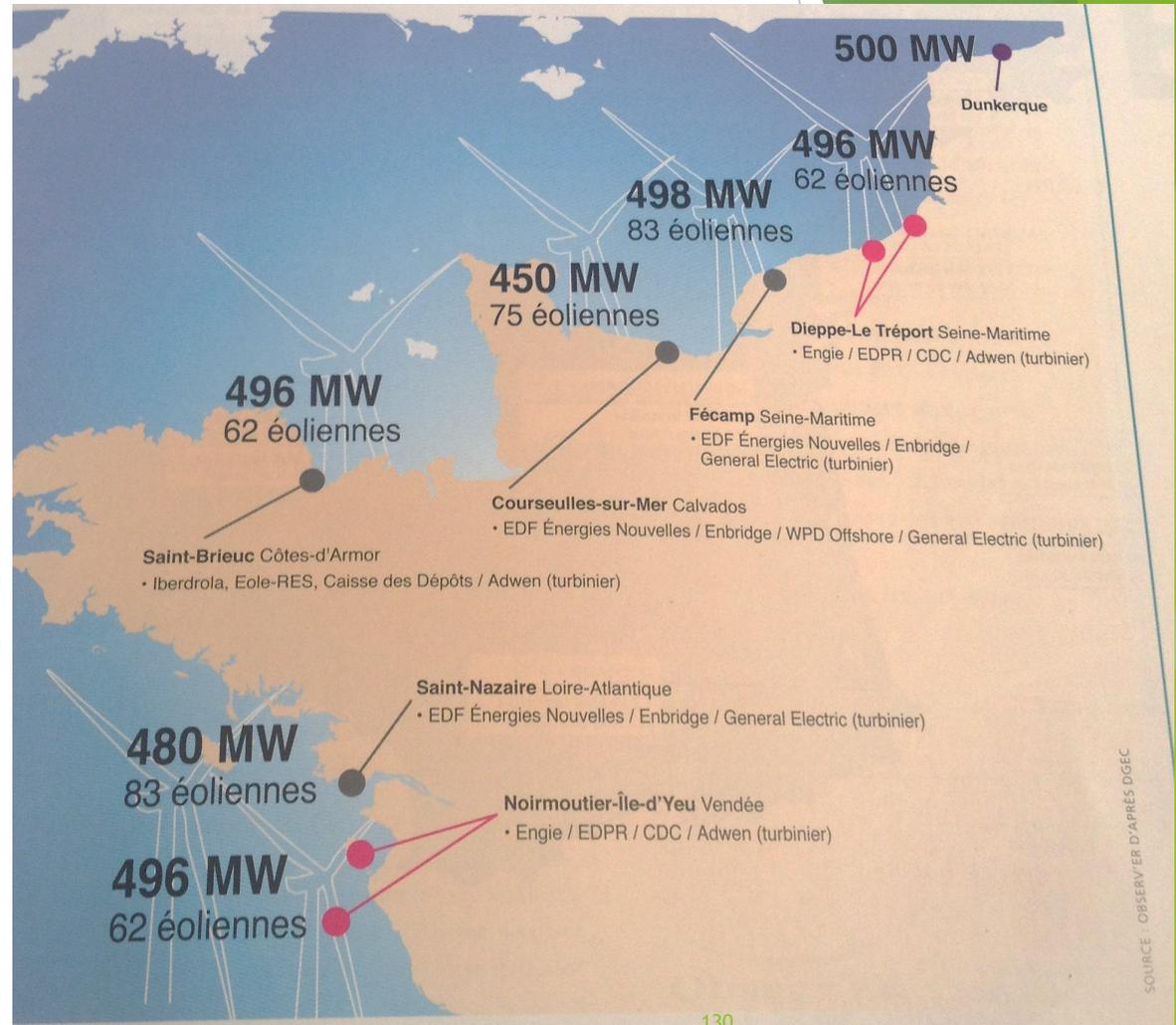


# Dunkerque et le « super-grid »



# Cadré réglementaire en France

## ► Exemples en France à venir



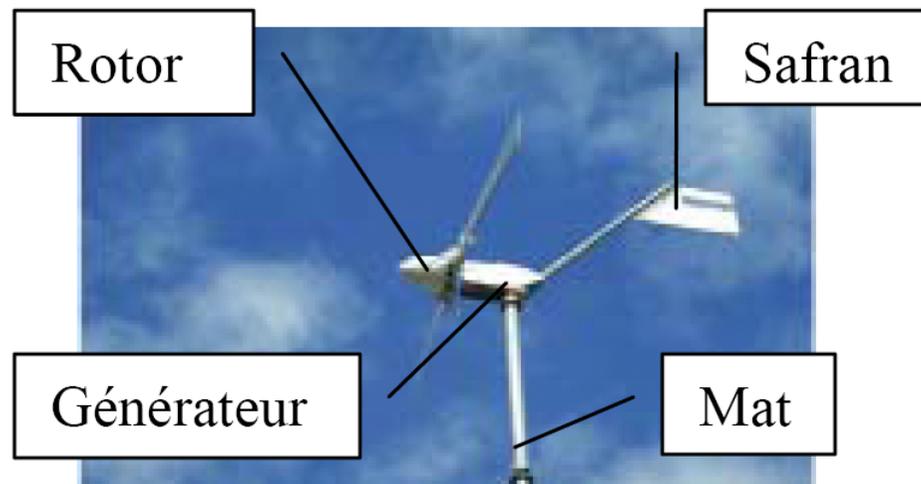
# Le petit éolien



# L'aérogénérateur

## Principe

- ▶ Le couple d'entraînement du rotor résulte des forces aérodynamiques qui s'exercent sur les pales en fonction de l'intensité du vent. Monté à l'extrémité d'un mât parfois haubané, le générateur produit une énergie électrique proportionnelle à la puissance du vent.
- ▶ Les petits aérogénérateurs ont la particularité de s'orienter automatiquement en fonction du vent (sans dispositif électronique) grâce au safran.



# L'aérogénérateur

## Taille/Puissance

- ▶ Énergie récupérable et les utilisations possibles dans la zone ouest (pour un terrain bien dégagé) :

Diamètre d'hélice en m	Surface de capteur en m <sup>2</sup>	Hauteur typique du mât	Puissance de l'éolienne	Utilisations possibles
1	0,8	6 m	600W	Bateau, cabane de pêche, caravane
3	7	6 à 12 m	1 à 3 kW	Maison de vacances ou habitation « éco »
5	20	10 à 15 m	4 à 6 kW	Habitation : électricité, réfrigérateur...
8	50	15 à 25 m	15 kW	Exploitation agricole
10	78	20 à 35 m	20 à 25kW	Exploitation agricole, Industriel
20	315	> 30 m	60 à 75 kW	Industriel

# Exemple

## *Site Isolé*

- ▶ Eolienne de 1 kW
  - ▶ Etude de vent non nécessaire
  - ▶ Diamètre de 3 à 4 m, mat <12m
  - ▶ Vitesse de démarrage : 2,5 m/s / vitesse pour atteindre la puissance nominale : 10m/s
  - ▶ Production à 6,5 m/s, 1000 à 1500 kWh/an
  - ▶ Investissement (avec raccord au réseau) à partir de 5000€
- ▶ Photovoltaïque (1 kW)
  - ▶ 7000 € investissement
  - ▶ Production 1050 kWh/an



# Exemple

## *Raccordé réseau*

- ▶ Eolienne de 10 kW
  - ▶ Étude des vents nécessaire, sauf si station météo proche
  - ▶ Diamètre de 7 à 10m, mats moins de 12m (pas permis de construire)
  - ▶ Vitesse de démarrage 4 m/s
  - ▶ Vitesse pour atteindre la puissance nominale : 10m/s
  - ▶ Production à 6m/s, 18000 à 20000 KWh/an
  - ▶ Investissement (raccordement compris) de 38000 à 40000€
  - ▶ Vente d'électricité (au tarif éolien xxx le KWh) : xxx / an



# Conclusion

Construire une vision, un projet fait par et pour le Territoire

**Michel Frémont pour le CAN OUEST**

SCIC IDEE - Bureau d'études en coopérative

IDEE - Initiatives pour le Développement de l'Efficacité Energétique

[www.ideo-energies.fr](http://www.ideo-energies.fr)

**contact@ideo-energies.fr**