

Ecole Thématique Energies Marines Renouvelables (EMR)  
GDR EMR, EC Nantes, 19-20 Octobre 2016

# Energie éolienne: Les grands défis à relever

Sandrine Aubrun

Maitre de Conférences à l'Université d'Orléans  
[sandrine.aubrun@univ-orleans.fr](mailto:sandrine.aubrun@univ-orleans.fr)



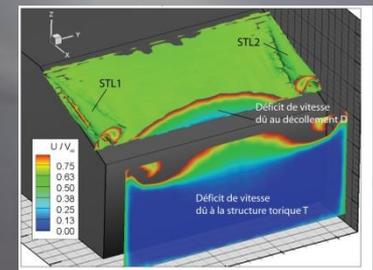
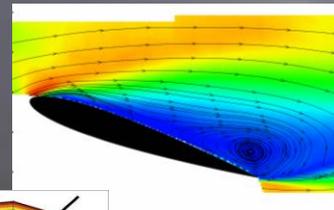
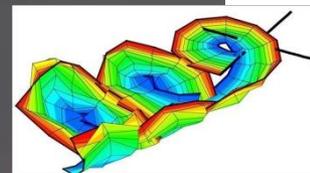
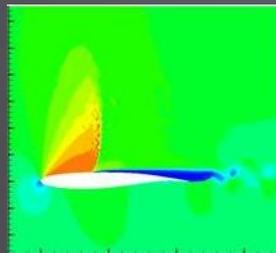
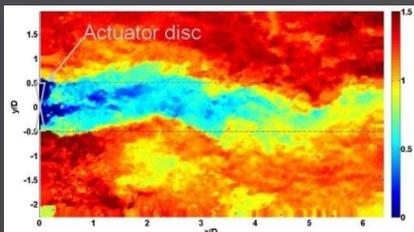
# Écoulements et Systèmes Aérodynamiques

## Objectif scientifique :

*Améliorer les performances des systèmes aérodynamiques en alliant la proposition de **solutions innovantes** à la **compréhension fine** des phénomènes physiques*

## Thèmes de recherche :

- 1) Etude et contrôle actif des écoulements turbulents, développement d'actionneurs (plasma, fluidiques,...)
- 2) Mécanismes de transport en couche limite atmosphérique
- 3) Aérodynamique des systèmes à rotors (rotors hélicoptères, éoliennes)



# Les moyens expérimentaux

- Une installation remarquable : LM1

## La soufflerie Malavard (2 veines)

- Veine principale pour les essais en écoulement uniforme

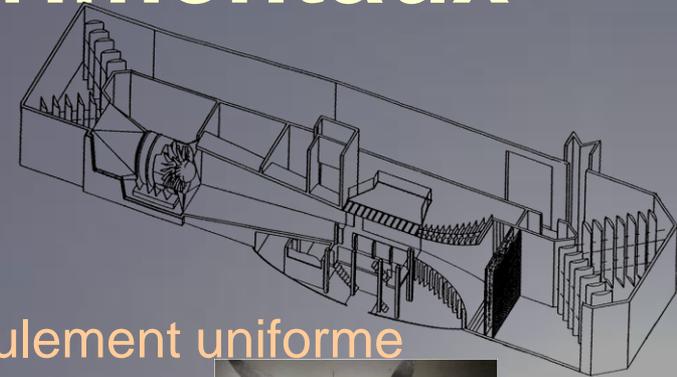
2m × 2m × 5m ;  $V_{\max} = 55 \text{ m/s}$

- Circuit de retour transformé en veine secondaire

- Veine secondaire pour les essais en écoulement uniforme (section adaptable)

- Soufflerie à Couche Limite Atmosphérique 3m × 5m × 16m

$V_{\max} = 15 \text{ m/s}$



- La « Petite » soufflerie LM2 :

■ 0,5m × 0,5m × 1m ;  $V_{\max} = 50 \text{ m/s}$

- Equipement de mesures : Balance aérodynamique, anémométrie par diagnostics optiques, anémométrie fil chaud, capteurs de pression multivoies et/ou instationnaires,



# Programme

- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- Les grands défis scientifiques
  - Vent et turbulence
  - Matériaux et structures
  - Aérodynamique
  - Contrôle
  - Conversion électromécanique
  - Intégration au réseau électrique
  - Acceptation sociale
  - Impacts environnementaux

# La production électrique française

- Besoin en temps réel entre 40 000 et 100 000 MW
- En moyenne :
  - 75% énergie nucléaire
  - 12% hydroélectricité
  - 3 % énergie éolienne
  - 10% autres sources

# Quelques chiffres...

- 1 éolienne de 90m de diamètre fournit 2,5MW
- Tourne 80 à 90% du temps (mais pas à son optimum)
- Rendement annuel 25%
- Rendement énergétique: 7mois/15 ans
- Vitesse de fonctionnement optimum : 13m/s (50km/h)
- La pale pèse 10 tonnes
- La nacelle pèse 50 tonnes
- Le mat fait 80m de haut
- La fondation béton 400m<sup>3</sup>
- Coute environ 3,5M€
- Obligation de rachat par EDF à 0,083€/kWh...

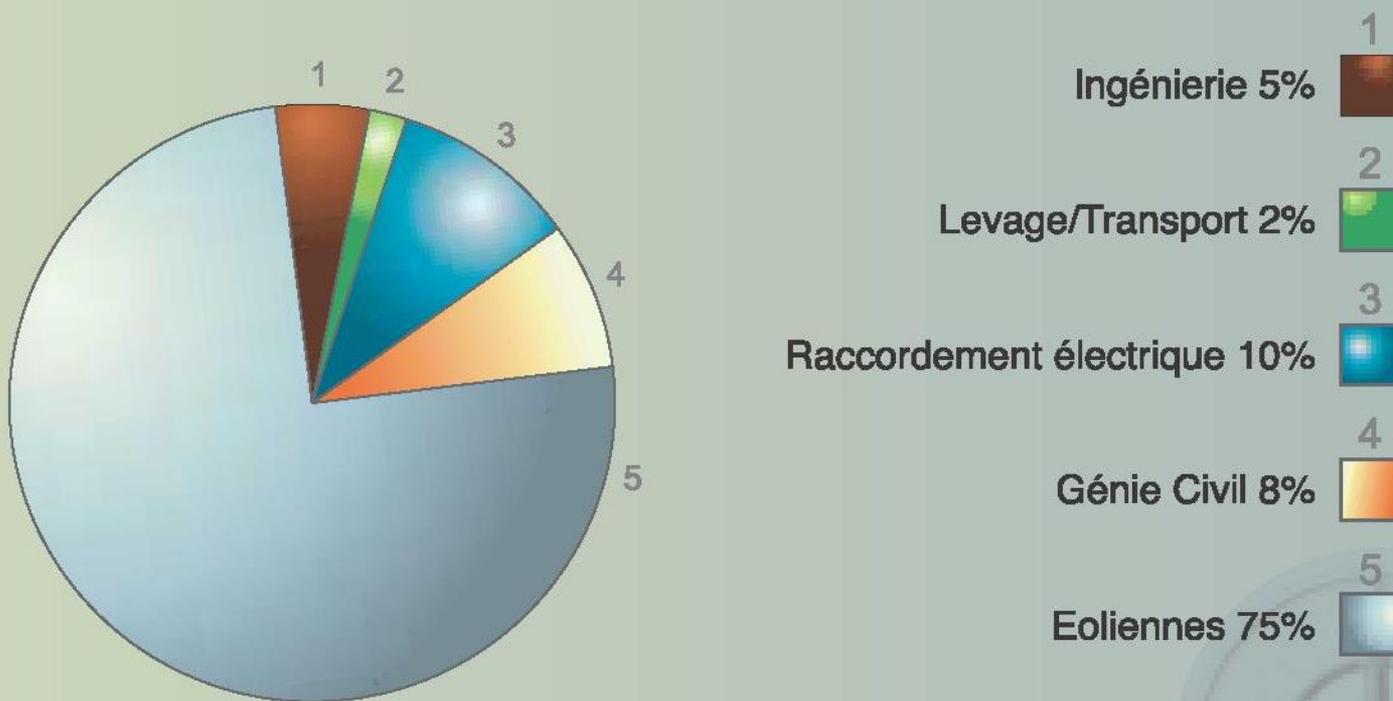


# Coûts d'un projet éolien

coût moyen du kW installé : 1,5 k€  
Retour sur investissement ~ 8-12 ans

Durée de vie : 15-20 ans (plus long en mer)

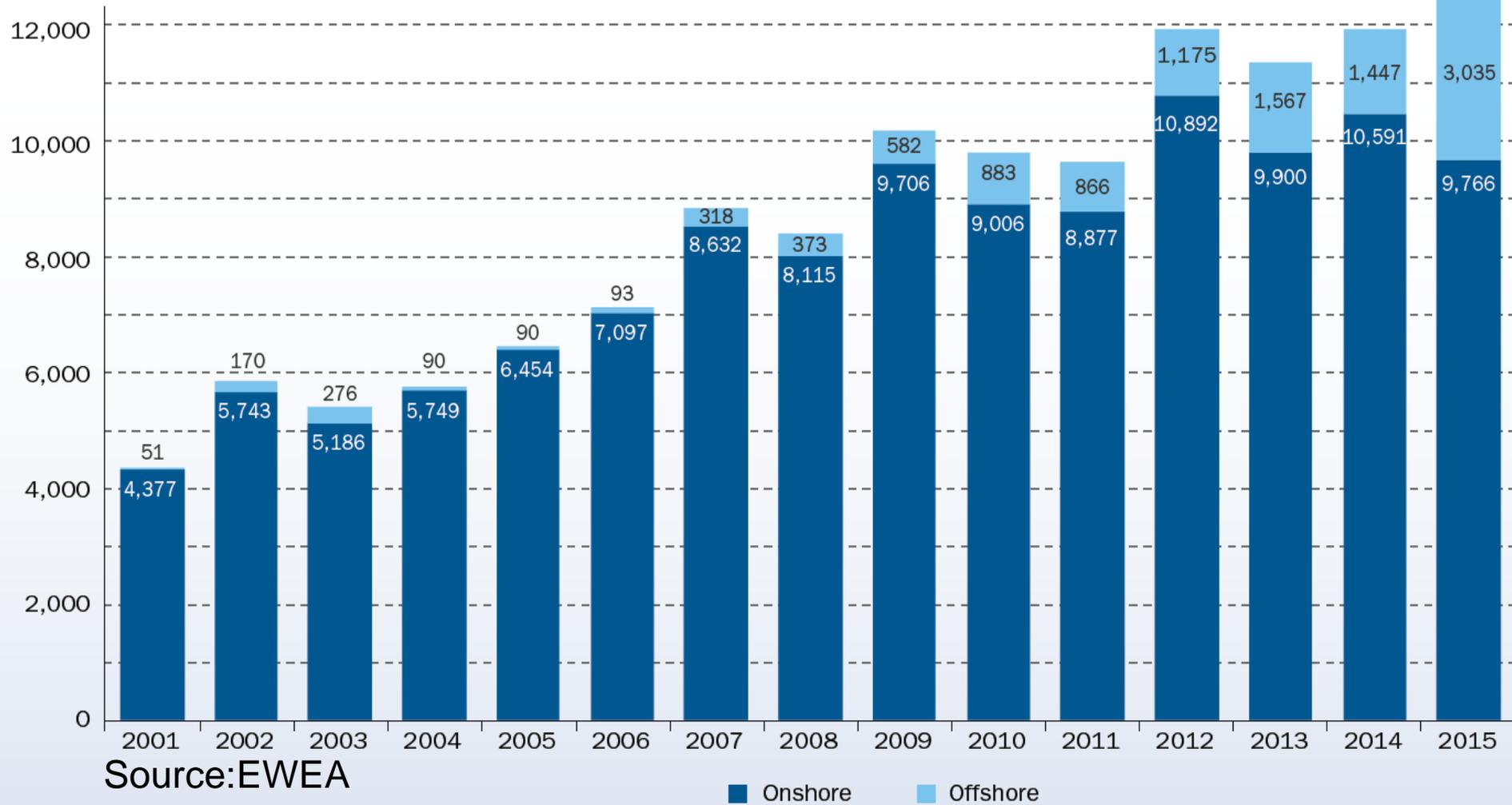
> Répartition des coûts d'un projet éolien





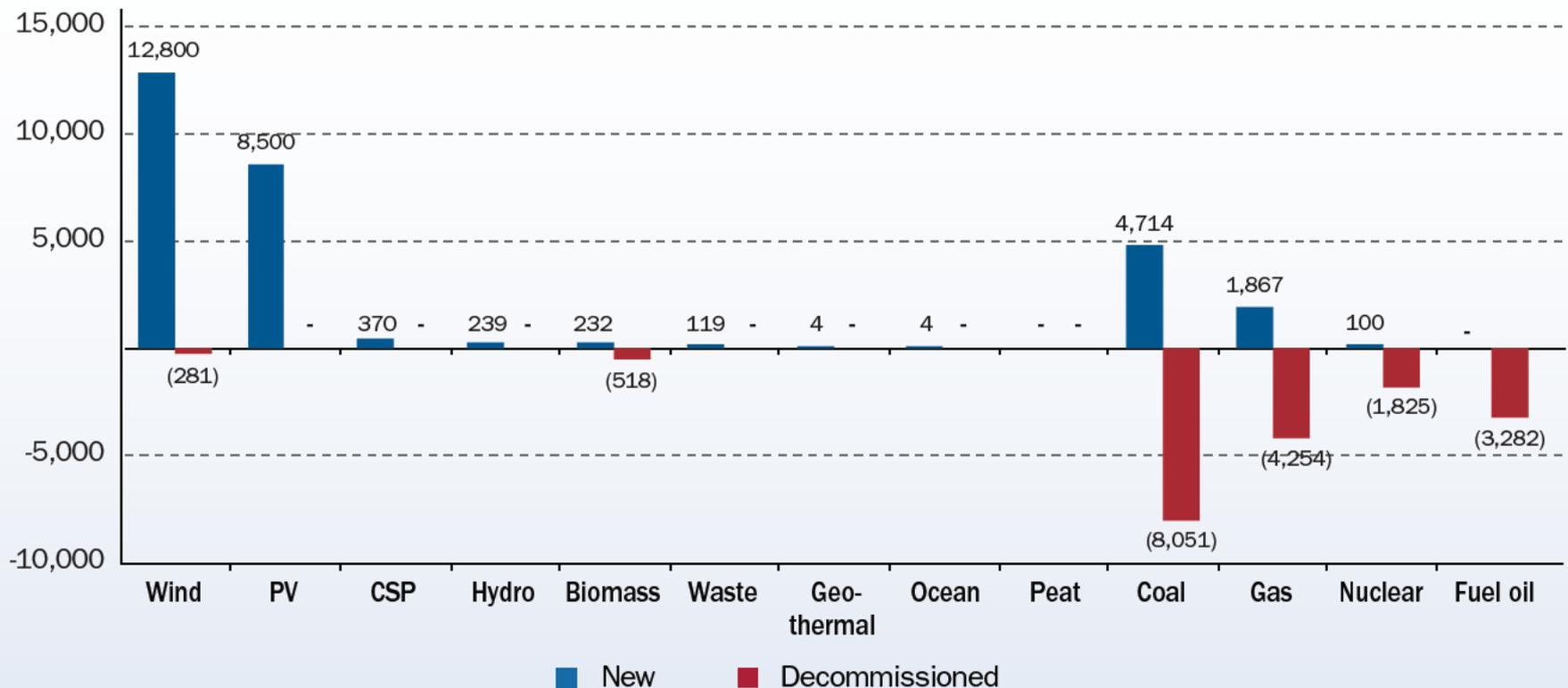
# L'énergie éolienne installée en Europe

FIGURE 11: ANNUAL ONSHORE AND OFFSHORE INSTALLATIONS (MW)



# Evolution de la production en Europe 2015

FIGURE 3: NEW INSTALLED AND DECOMMISSIONED POWER CAPACITY IN EU (MW)



Source: EWEA

# Evolution de la production en Europe

2000

2015

FIGURE 7: EU POWER MIX 2000 (MW)

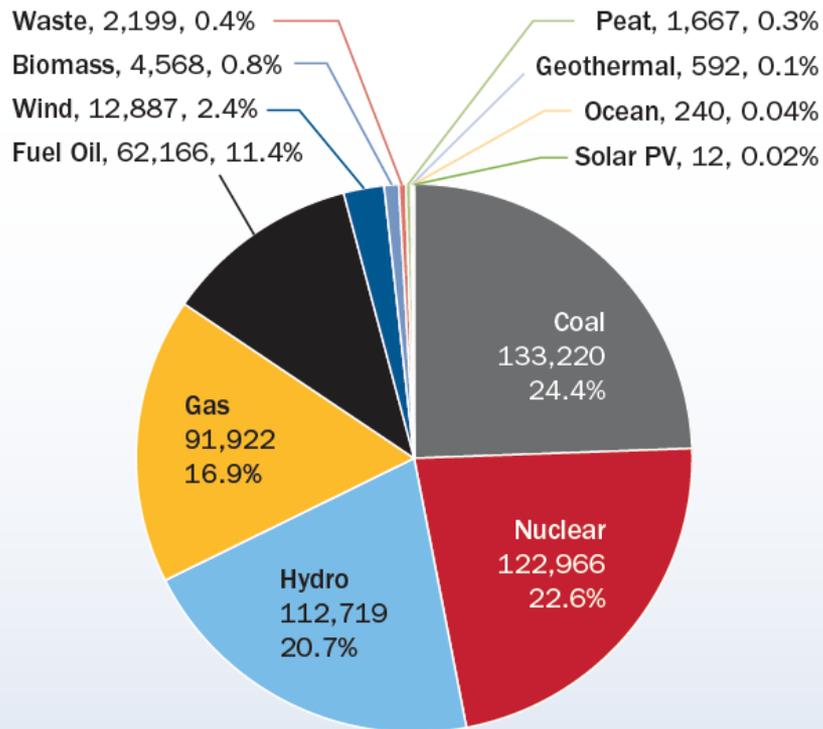
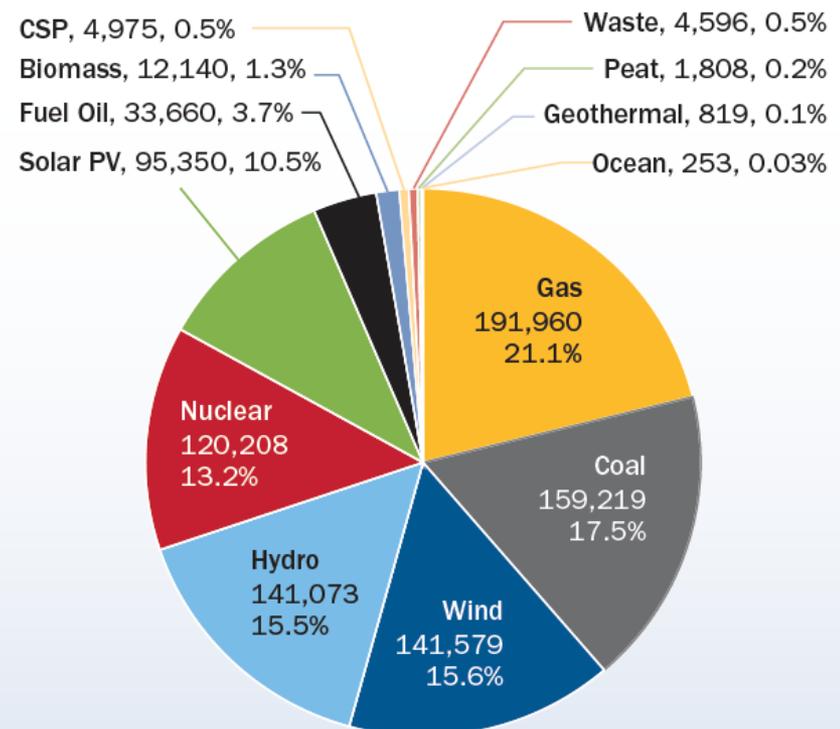


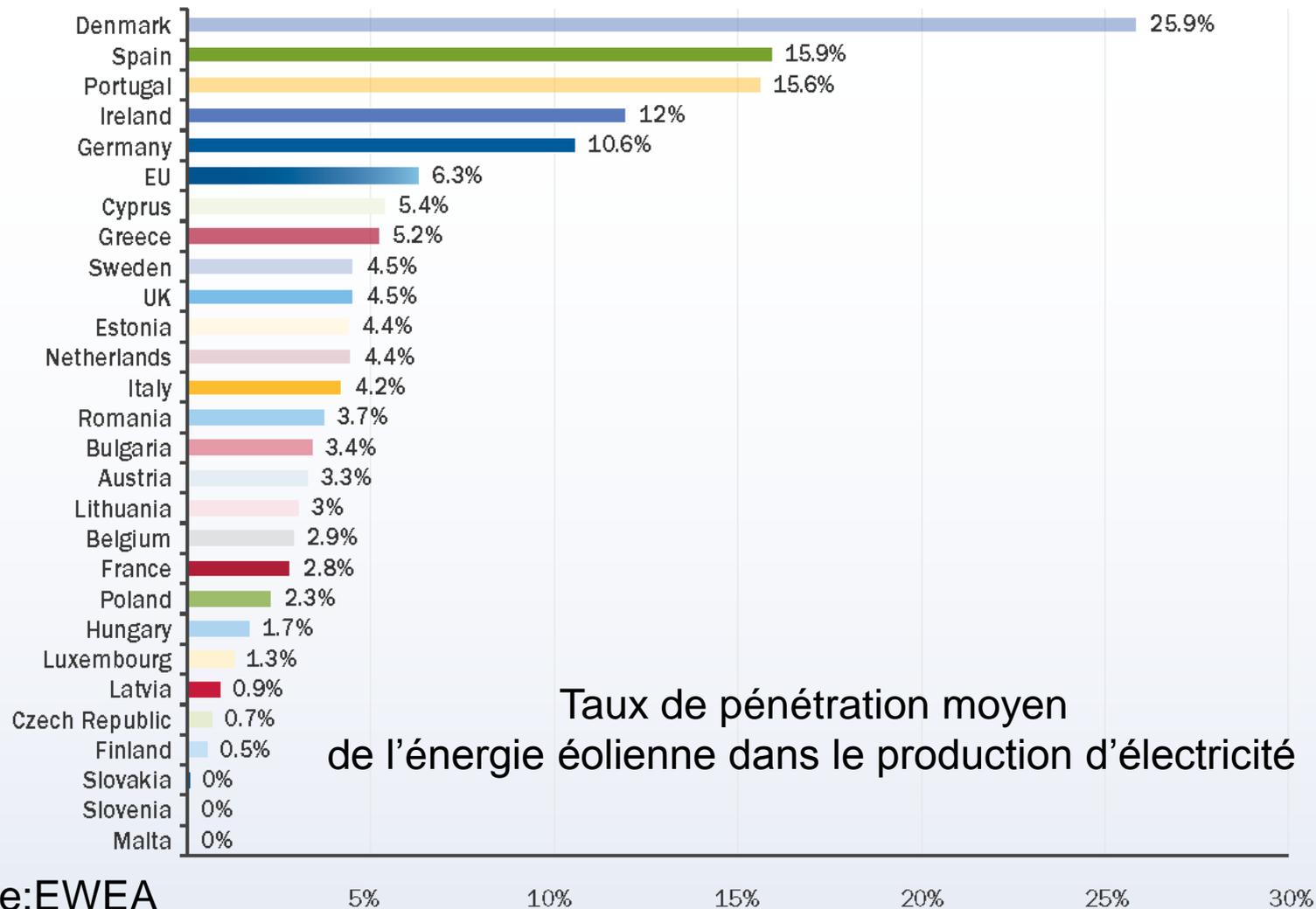
FIGURE 8: EU POWER MIX 2015 (MW)



# L'énergie éolienne en Europe

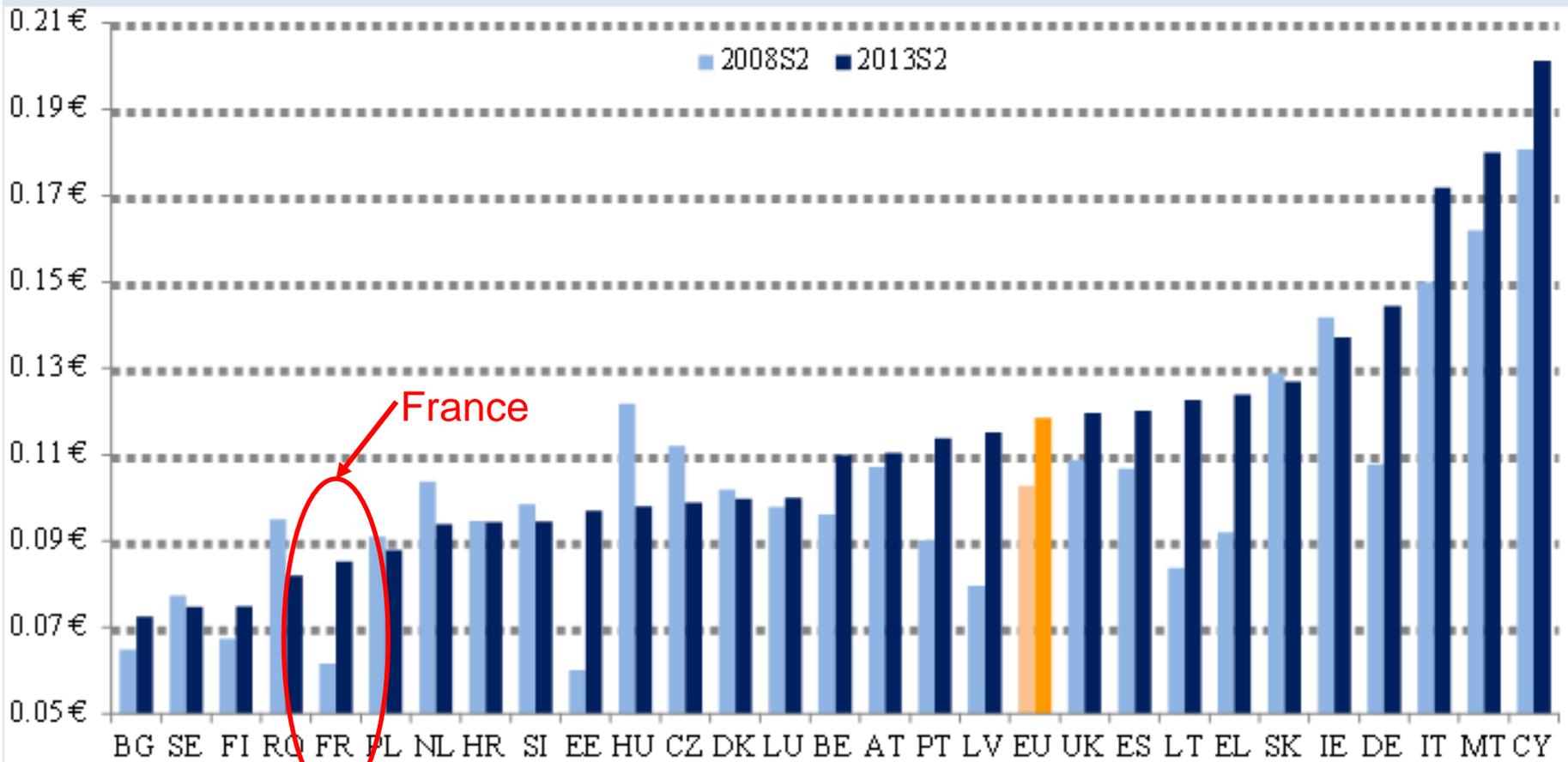
WIND SHARE OF TOTAL ELECTRICITY CONSUMPTION

FIGURE 3.6



# Prix de l'électricité en Europe

Electricity prices in the EU



Source: Eurostat

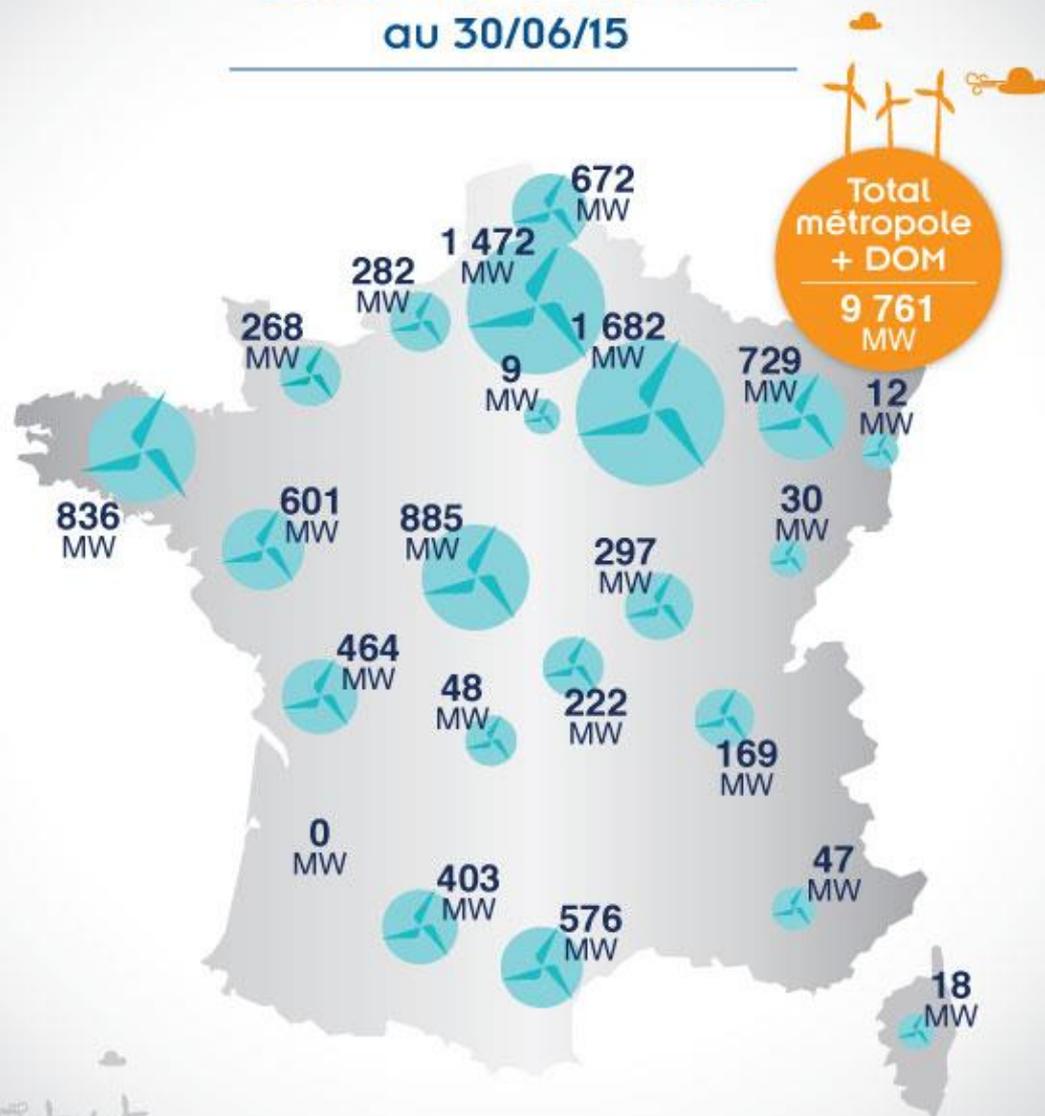
# L'énergie éolienne en France

Juin 2015

En moyenne,  
production de 2200 MW (22%)

Prévisions :  
25 000 MW en 2020

## Puissance totale éolienne raccordée au 30/06/15



Suivez-nous



sources FEE / MEDDE

<http://fee.asso.fr>

France  
Energie  
Eolienne

# L'énergie éolienne en France

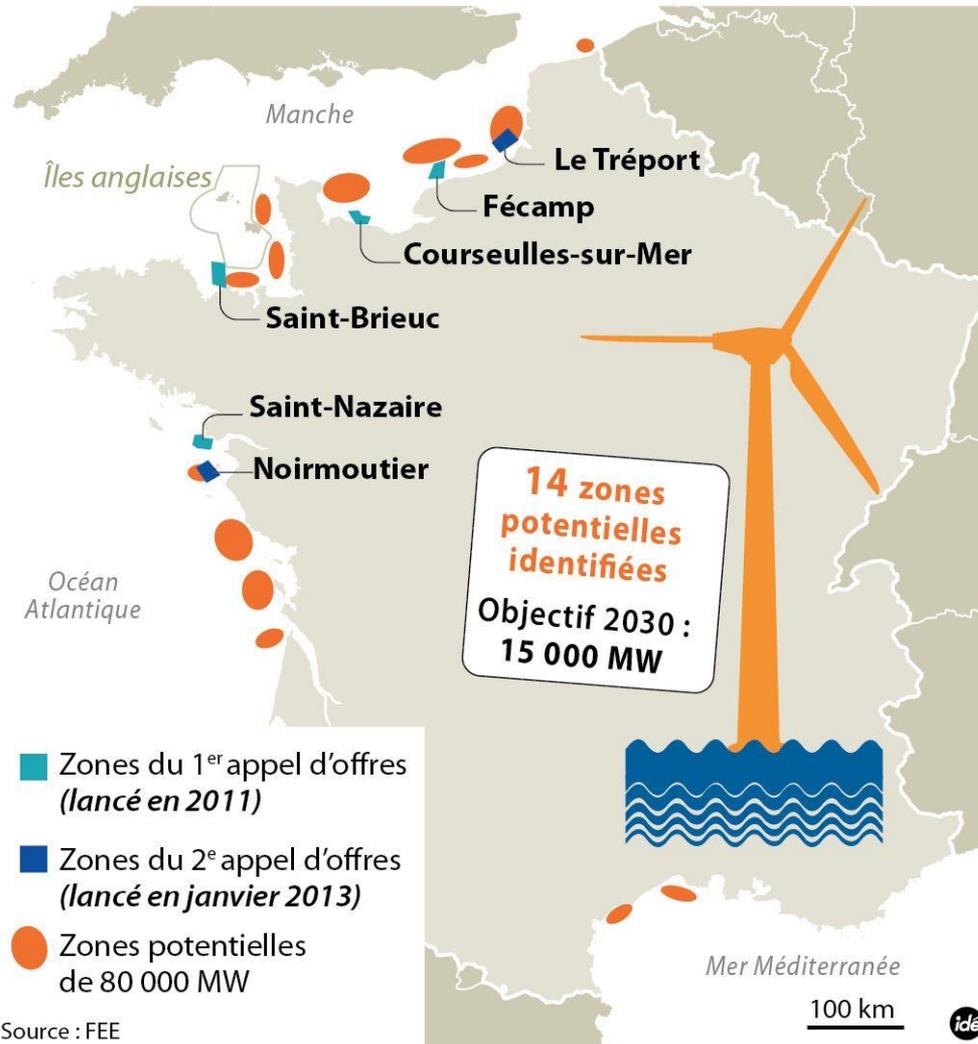
Mars 2006

0,5GW...



# Les grands projets français

## L'éolien marin en France



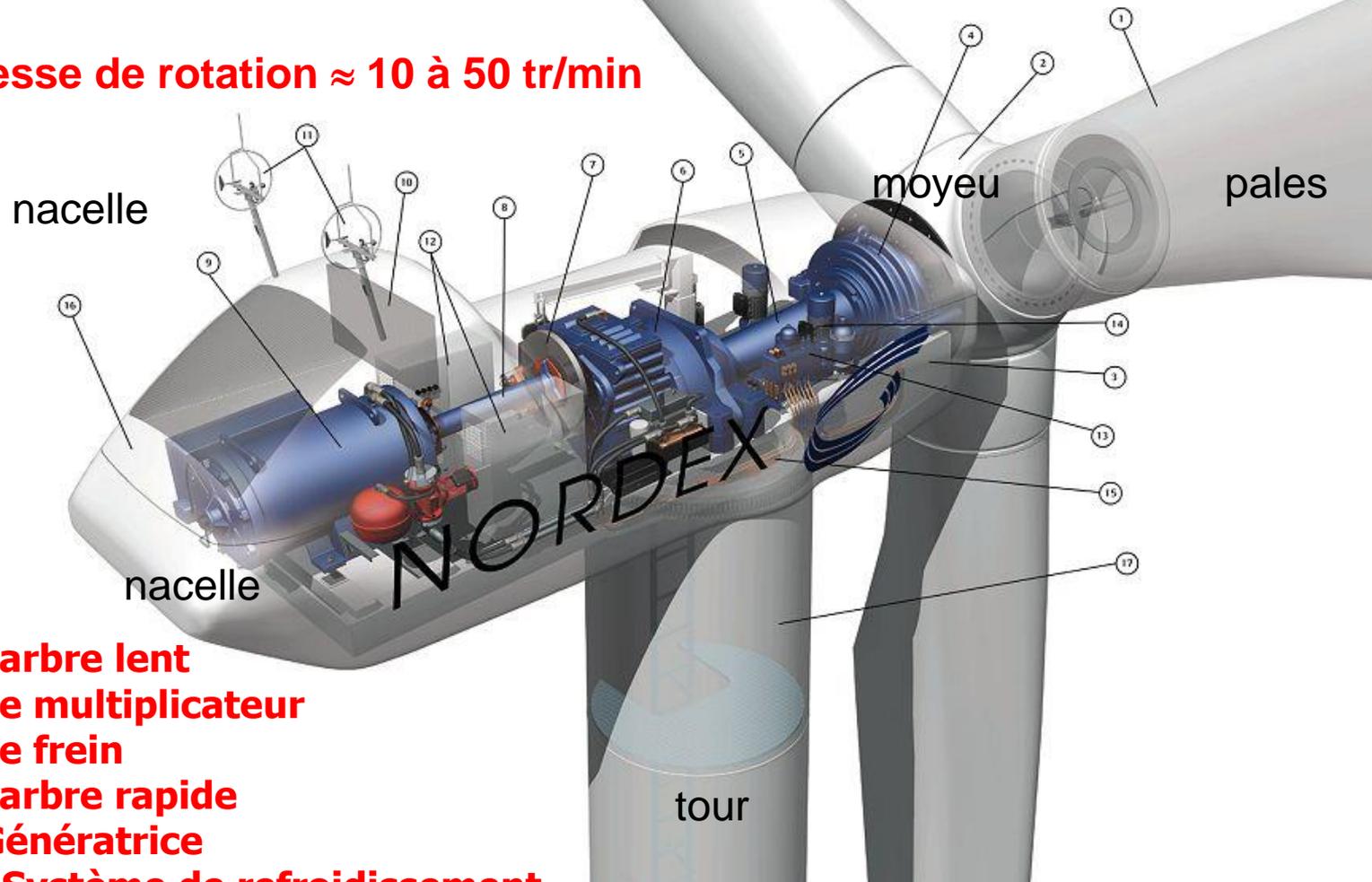
# Programme

- Quelques chiffres...
- **Comment ça marche?**
- Les grands défis
  - Vent et turbulence
  - Matériaux et structures
  - Aérodynamique
  - Contrôle
  - Conversion électromécanique
  - Intégration au réseau électrique
  - Acceptation sociale et impacts environnementaux

# Comment ça marche

Énergie cinétique  $\Rightarrow$  énergie mécanique  $\Rightarrow$  énergie électrique

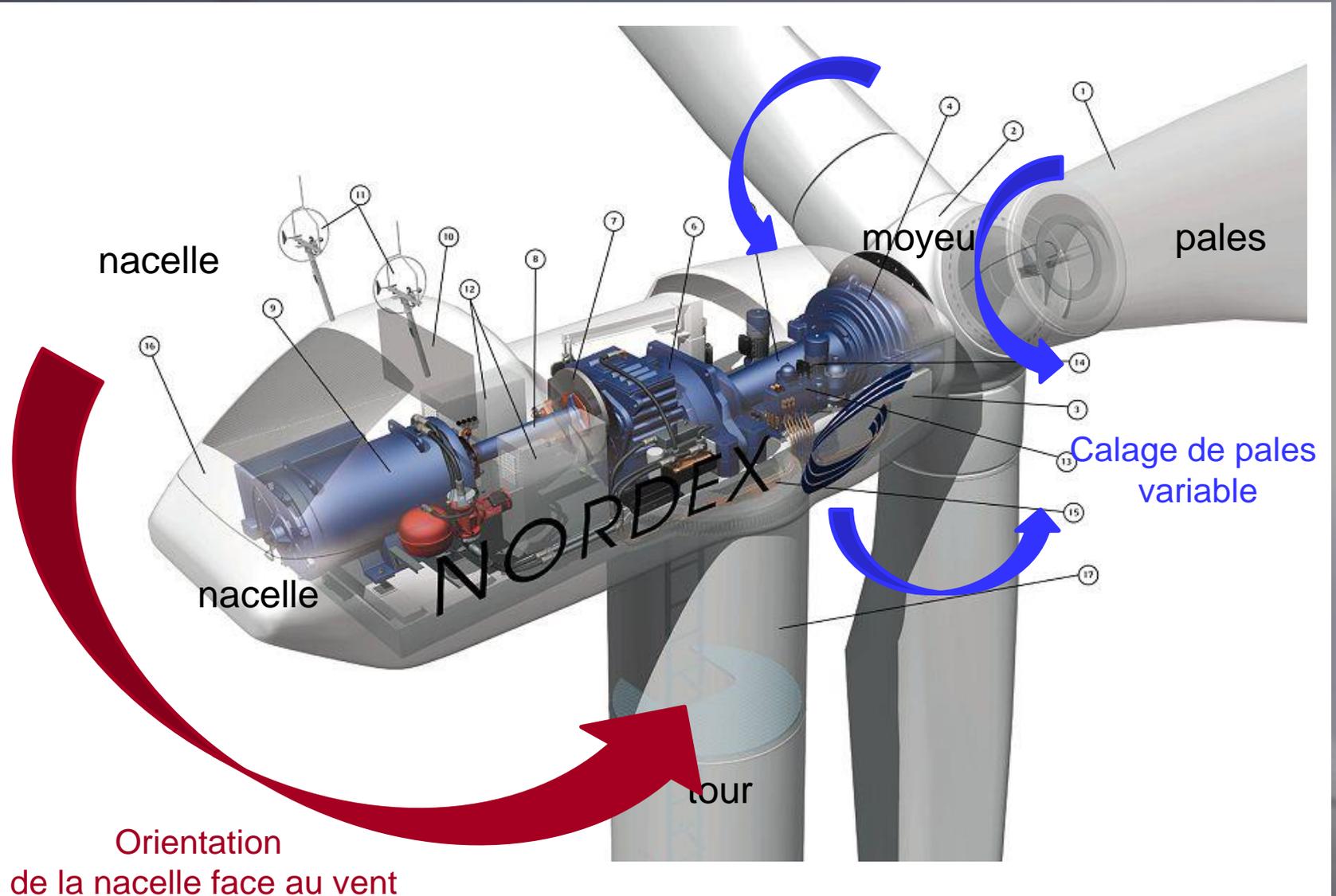
Vitesse de rotation  $\approx$  10 à 50 tr/min



- 5) l'arbre lent
- 6) Le multiplicateur
- 7) Le frein
- 8) l'arbre rapide
- 9) Génératrice
- 10) Système de refroidissement
- 11) Anémomètres et girouettes

# Comment ça marche

Énergie cinétique  $\Rightarrow$  énergie mécanique  $\Rightarrow$  énergie électrique



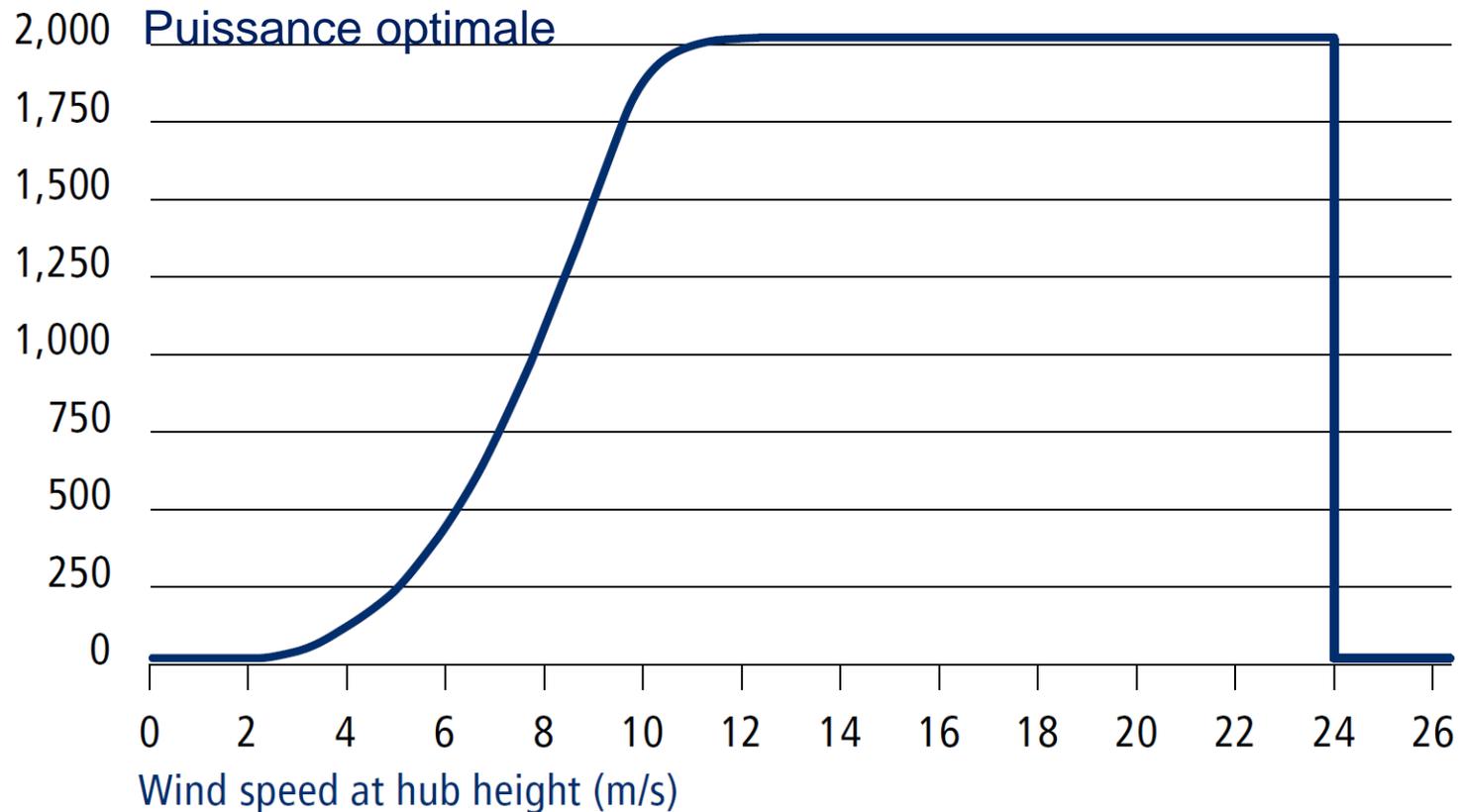
# Comment ça marche

## Courbe de puissance électrique

### Power curve

Senvion MM92

Electrical power (kW)



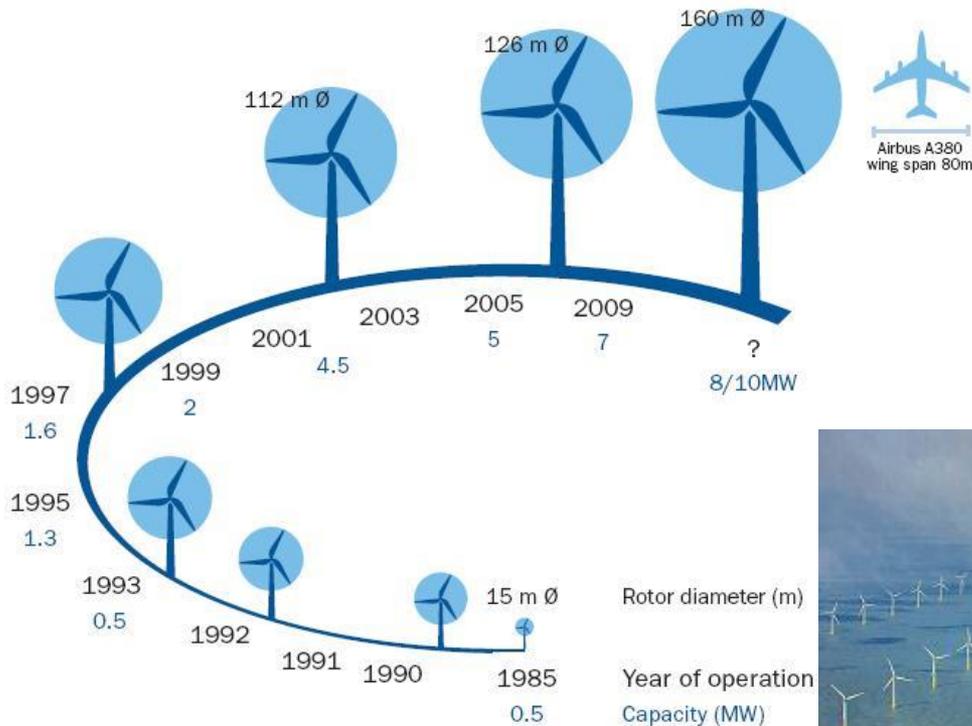
# Programme

- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
  - Vent et turbulence
  - Matériaux et structures
  - Aérodynamique
  - Contrôle
  - Conversion électromécanique
  - Intégration au réseau électrique
  - Acceptation sociale et impacts environnementaux

# Les grands défis

- Taille des éoliennes
- Installations off-shore

Size evolution of wind turbines over time



# Programme

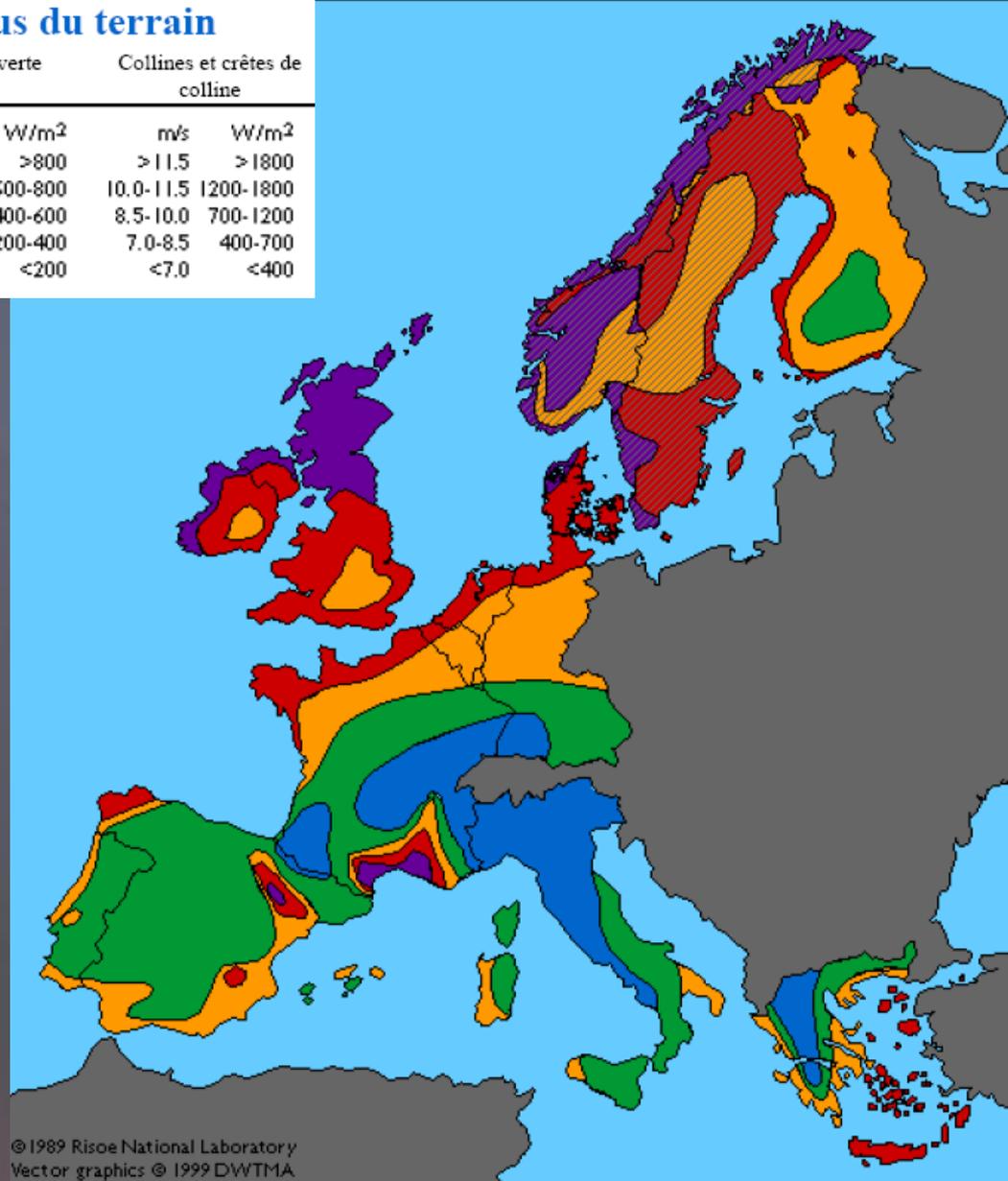
- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
  - **Vent et turbulence**
  - Matériaux et structures
  - Aérodynamique
  - Contrôle
  - Conversion électromécanique
  - Intégration au réseau électrique
  - Acceptation sociale et impacts environnementaux

# Vent et turbulence

## Ressources éoliennes à 50 (45) m au-dessus du terrain

Couleur	Terrains avec obstacles		Terrains dégagés		Au bord de la mer		Mer ouverte		Collines et crêtes de colline	
	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	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

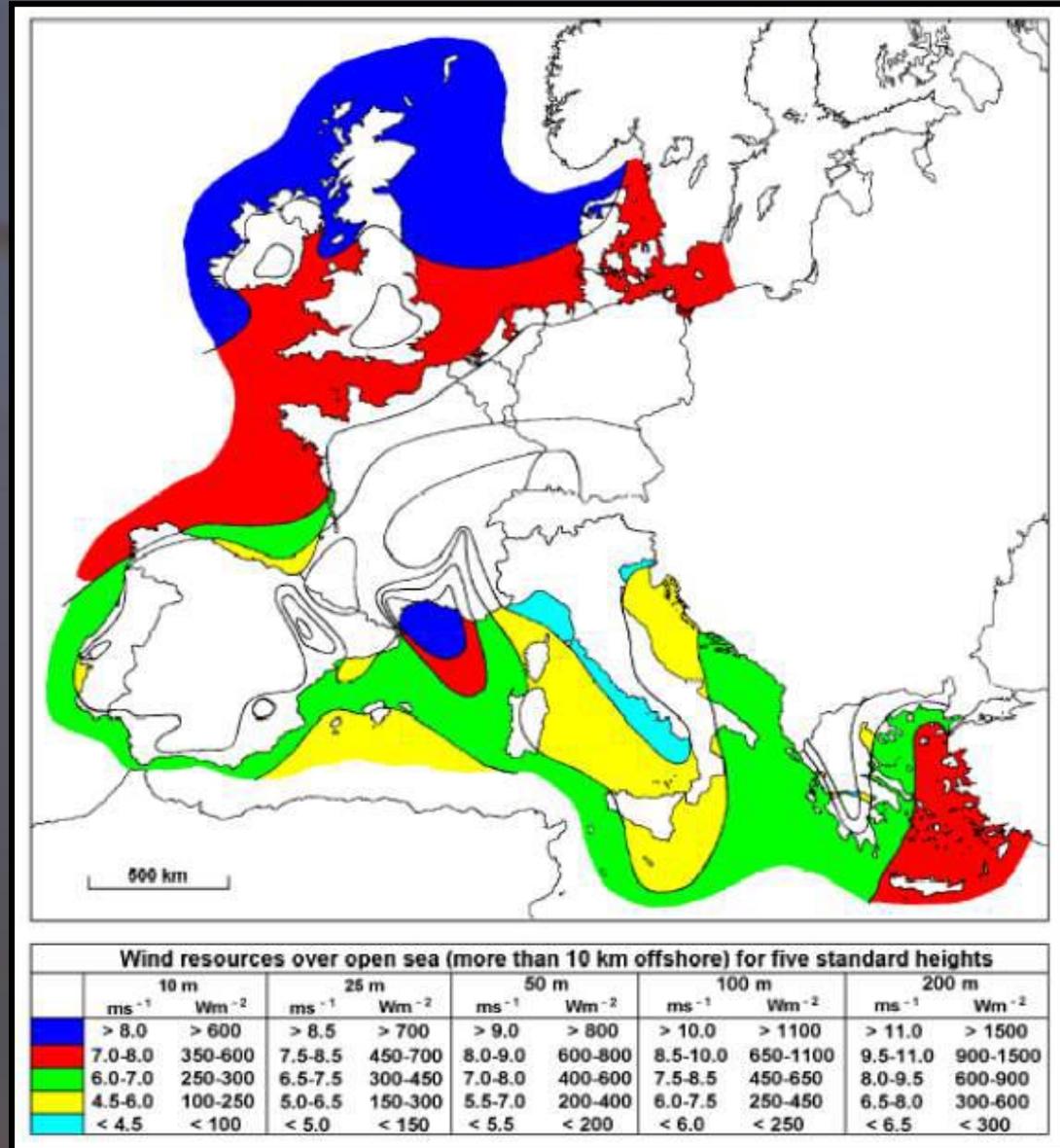
Atlas des vents  
en Europe



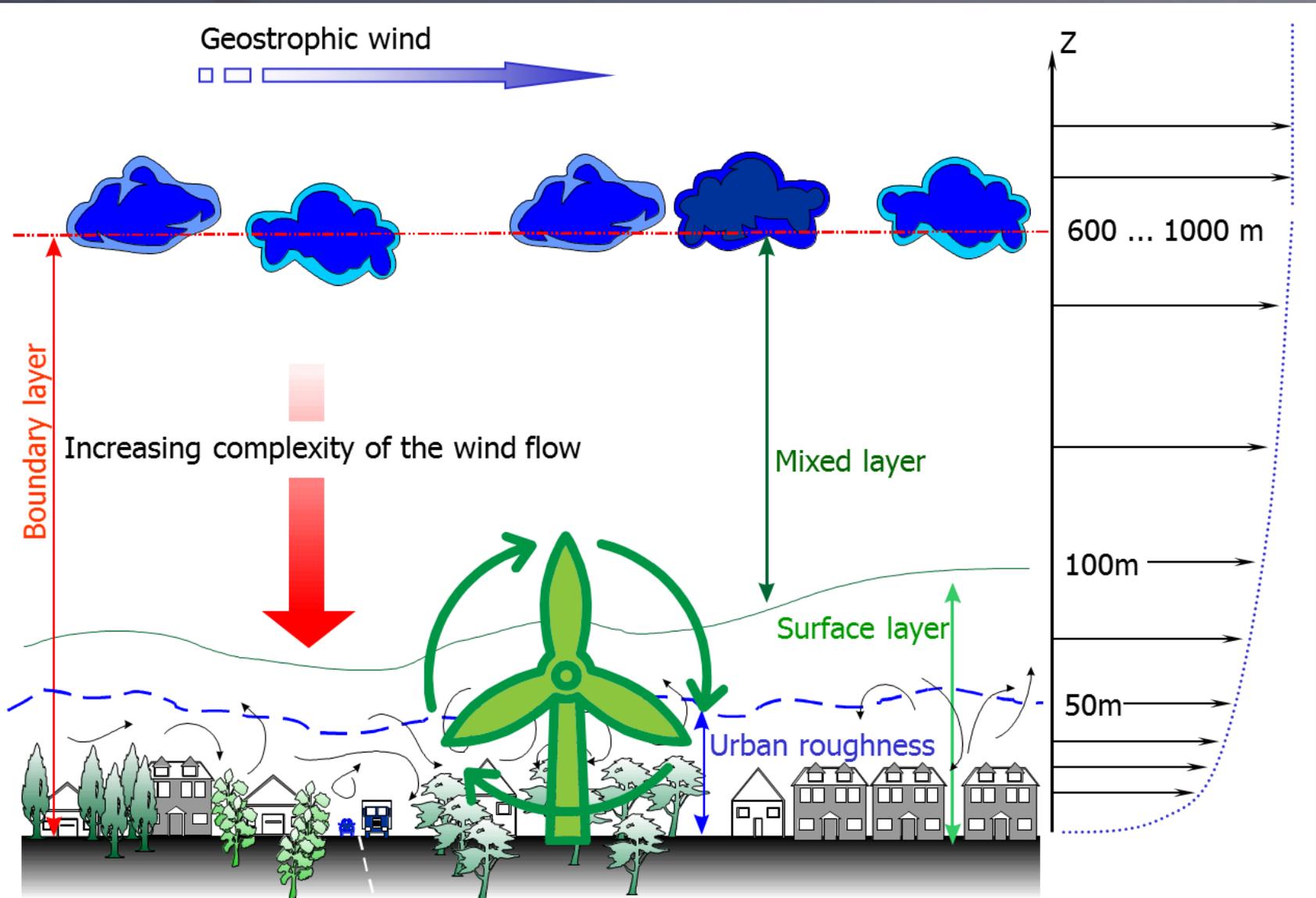
# Vent et turbulence

*Les zones où la ressource est la plus forte n'ont pas été encore exploitées*

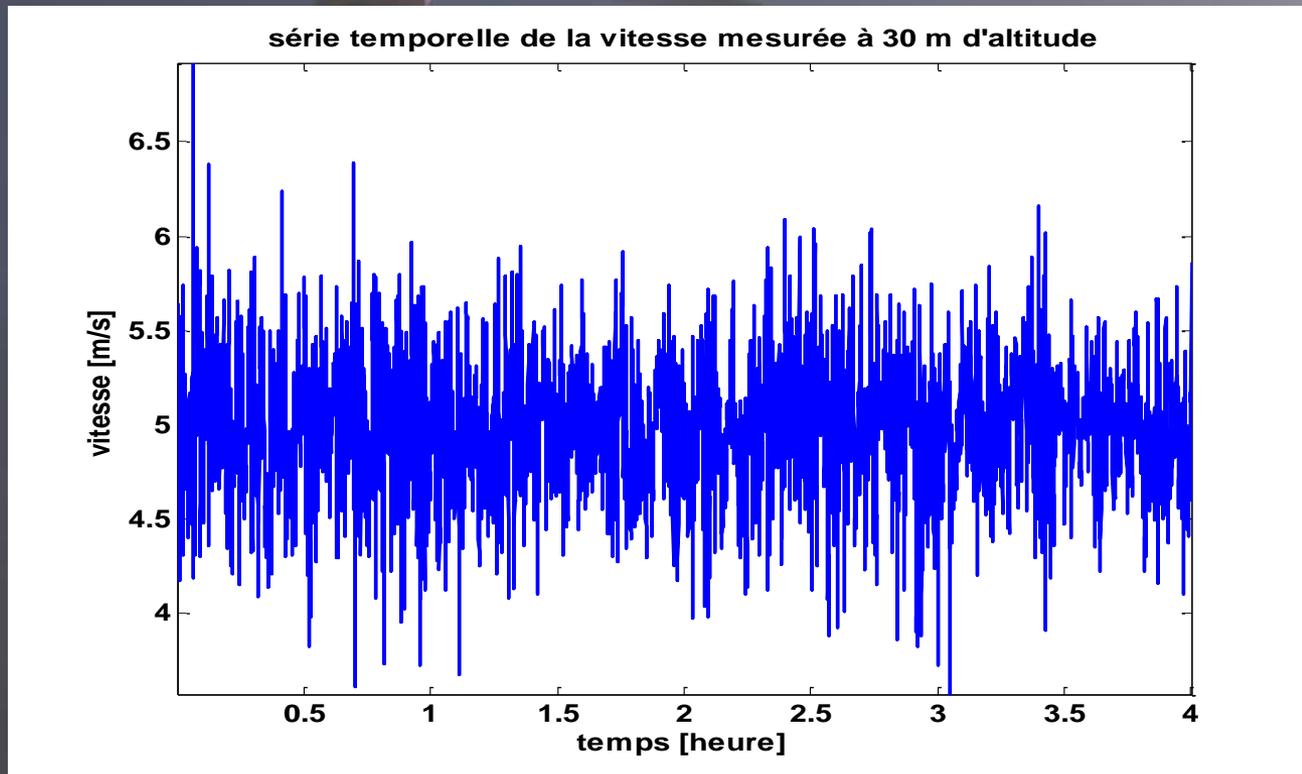
## Atlas des vents en Europe



# Vent et turbulence



# Vent et turbulence



# Les types de terrain

**Terrain peu rugueux**



**Terrain modérément rugueux**



**Terrain rugueux**



**Terrain très rugueux**



# Cas idéal (potentiel éolien)

Terrain peu rugueux

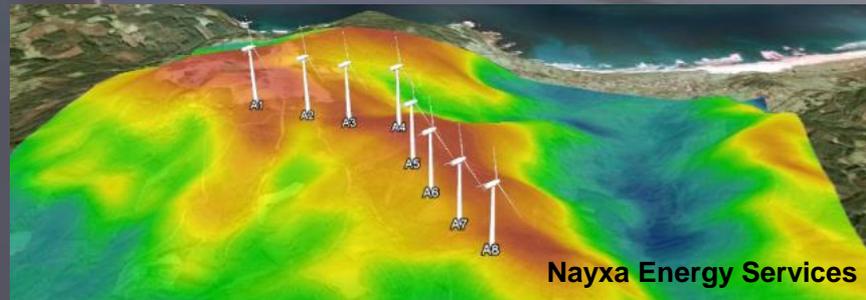


# Installations offshore

- Solution miracle
  - Vent constant et peu turbulent
  - Grande étendue : ferme d'éoliennes
  - Pas de population
  - Peu visible du continent
- Difficultés technologiques
  - Raccordement au réseau continental
  - Fondations des éoliennes
  - Salinité et corrosion
  - construction

# Estimation du potentiel éolien

- Incertitude de prévision sur le potentiel éolien
  - Spatiales (terrains complexes: relief, couverts forestiers)



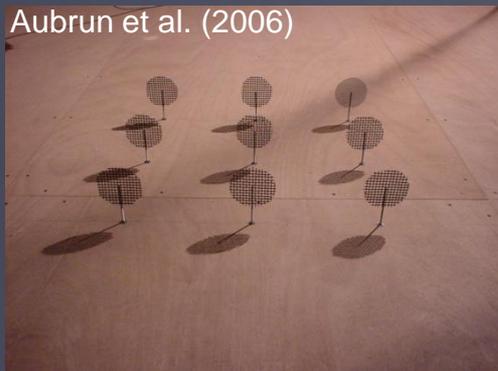
- Temporelles (de 10 secondes à 20 ans)
- Intermittence

=> Augmente le cout de l'éolien car prise de risque forte (investisseurs, exploitants, opérateurs)

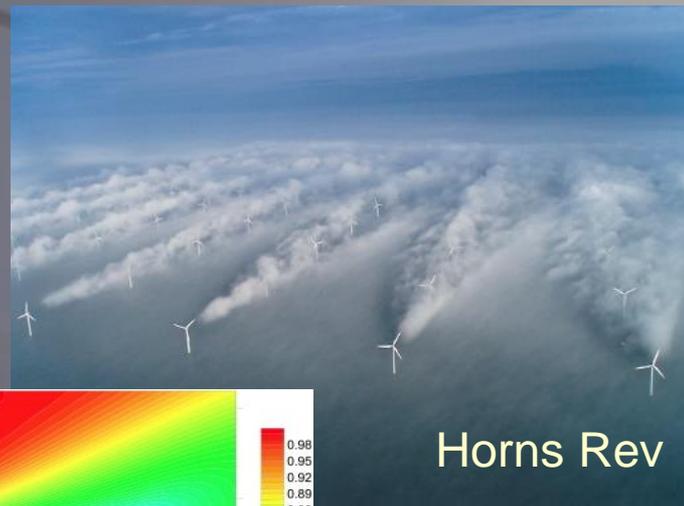
# Interactions de sillages

Pertes de production par interactions mal estimées dans les fermes éoliennes ou en terrains complexes

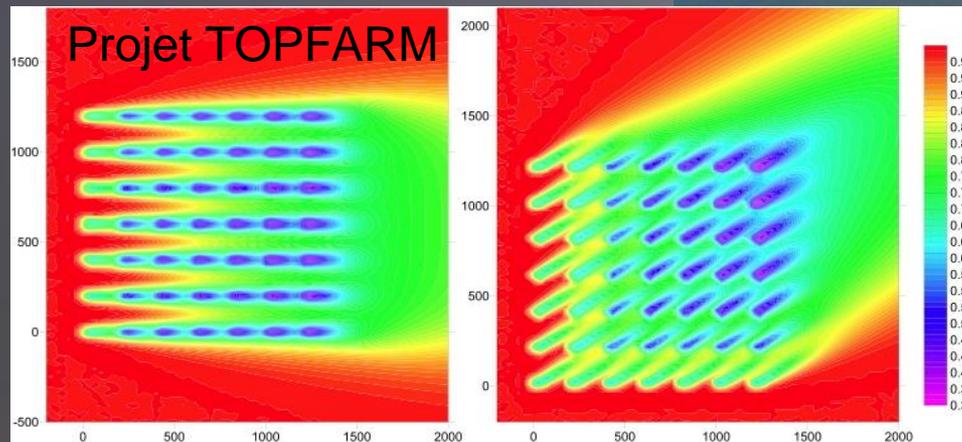
Aubrun et al. (2006)



Corten et al. (2004)



Horns Rev



# Programme

- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
  - Vent et turbulence
  - **Matériaux et structures**
  - Aérodynamique
  - Contrôle
  - Conversion électromécanique
  - Intégration au réseau électrique
  - Acceptation sociale et impacts environnementaux

# Matériaux et structures

Mat en acier ou en béton



Pales en matériaux composites (fibres de verre)

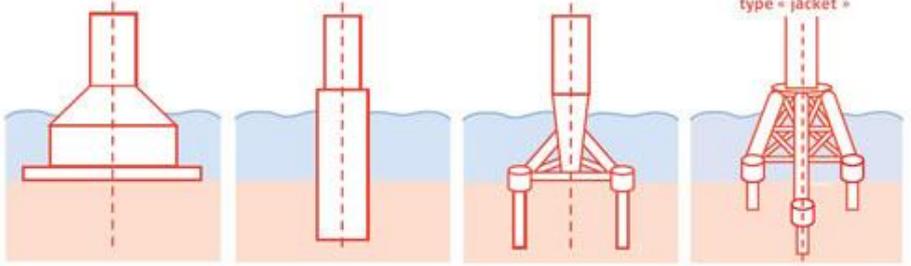


Fondation gravitaire

Fondation monopieu

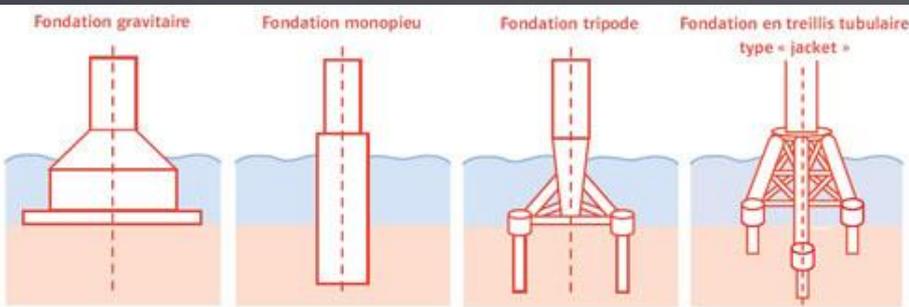
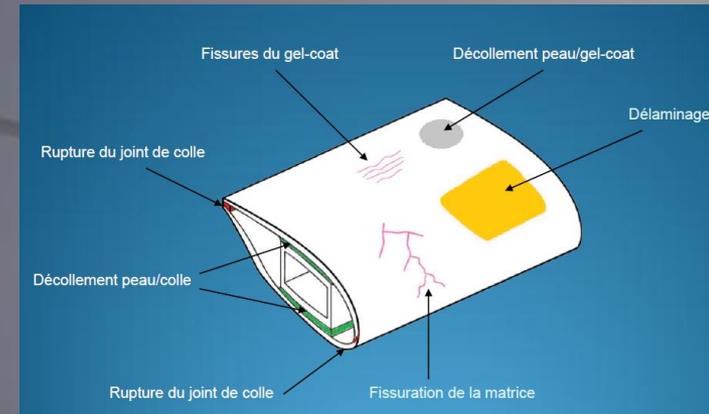
Fondation tripode

Fondation en treillis tubulaire type « jacket »



# Matériaux et structures

- Efforts aérodynamiques instationnaires
- Procédés de fabrication des pales
- Défaut de vieillissement des pales
- Recyclage matériaux composites
- Fondations offshore
- Sollicitations, couplage vent / houle

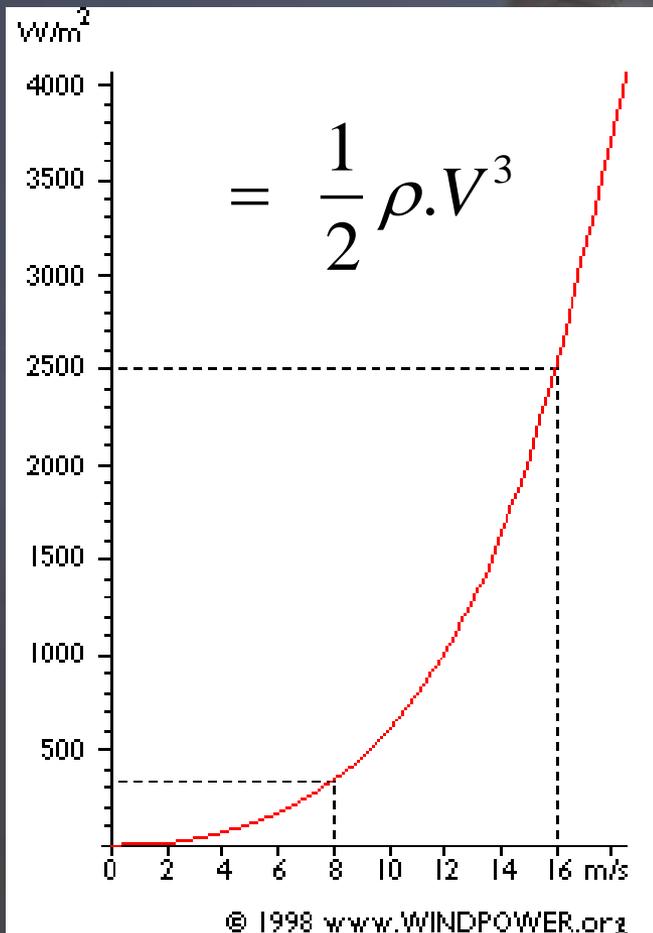


# Programme

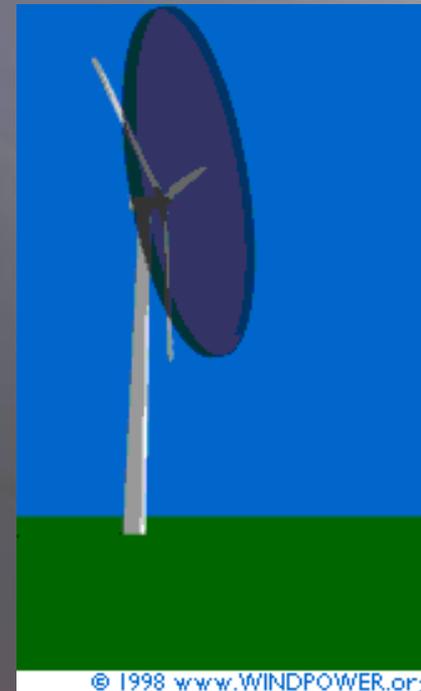
- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
  - Vent et turbulence
  - Matériaux et structures
  - **Aérodynamique**
  - Contrôle
  - Conversion électromécanique
  - Intégration au réseau électrique
  - Acceptation sociale et impacts environnementaux

# Le fonctionnement

## La puissance du vent



$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot R^2$$



# Le fonctionnement

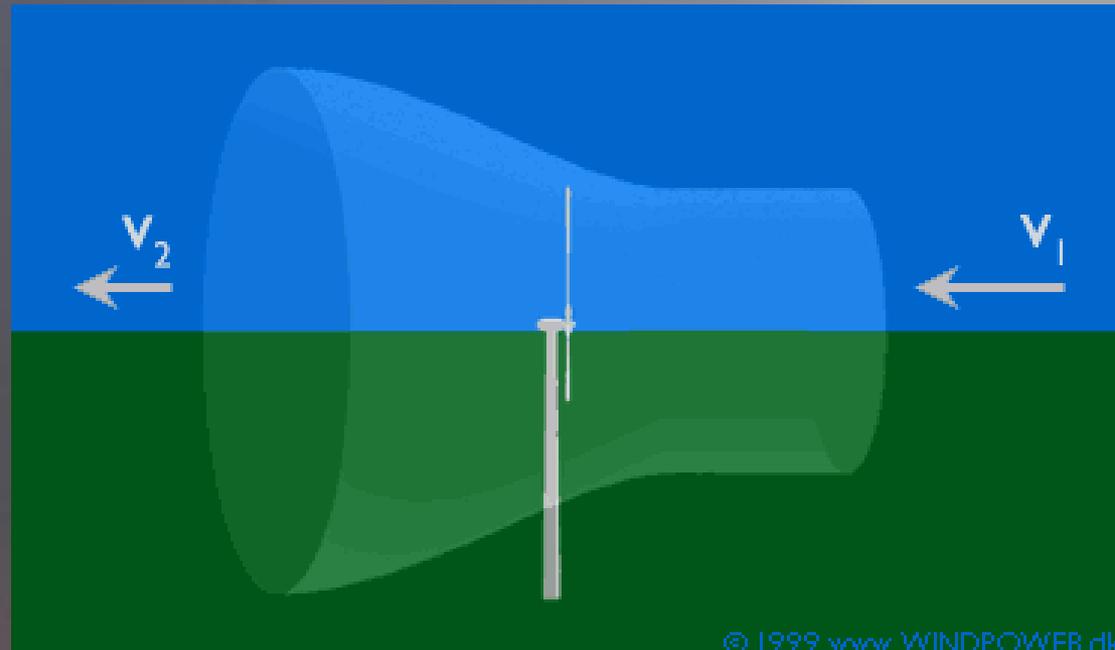
## Extraction d'énergie cinétique de l'écoulement

$$\Rightarrow \frac{1}{2} \rho V_2^2 < \frac{1}{2} \rho V_1^2 \Rightarrow V_2 < V_1$$

⇒ distorsion des lignes de courant

⇒ Puissance extraite

$$\Rightarrow f(V_1 - V_2)$$



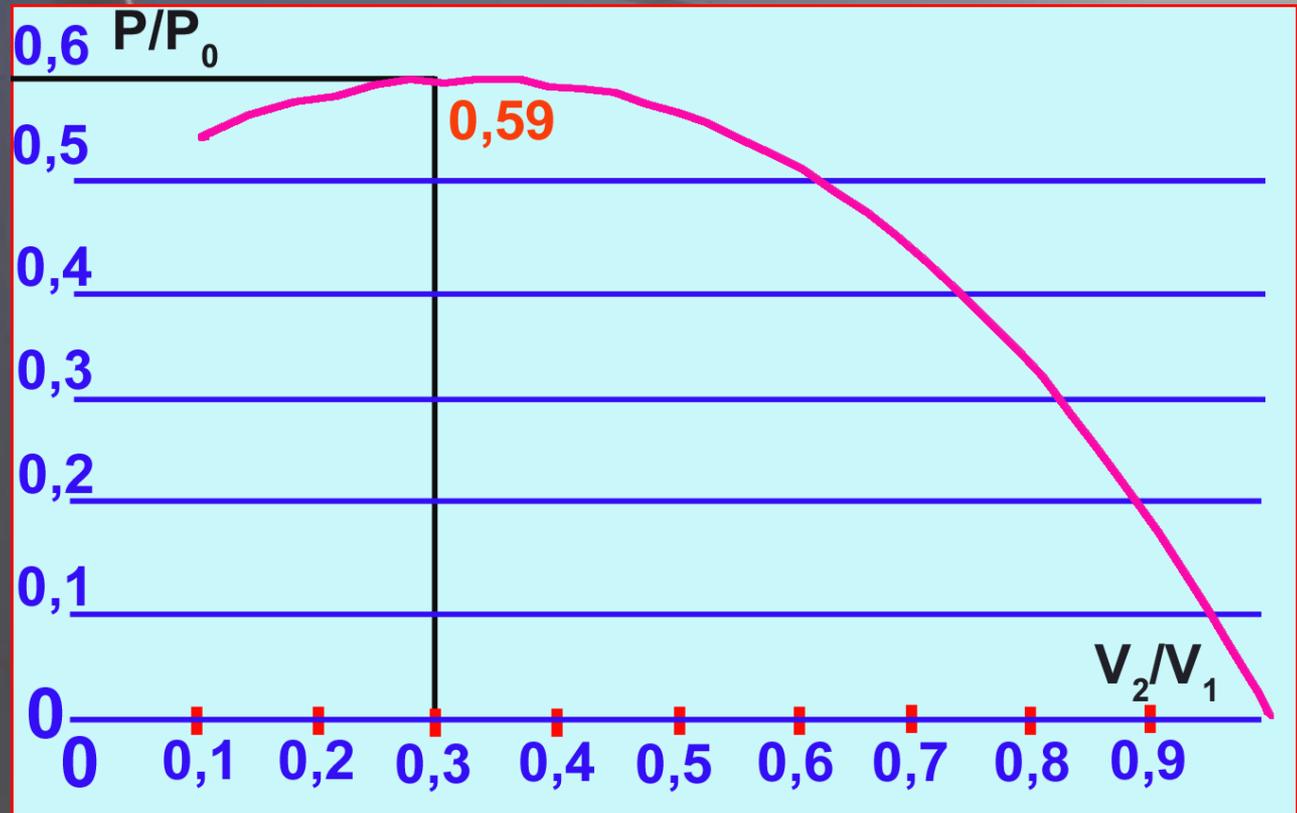
# La loi de Betz (1919)

Leistung, welche wir mit einem Windrade von  $D$  m Durchmesser bei einer Windgeschwindigkeit  $v$  m/sec dem Winde entziehen können, ist demnach

$$L_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} v^3 \cdot \frac{D^2 \pi}{4} \text{ mkg/sec}$$

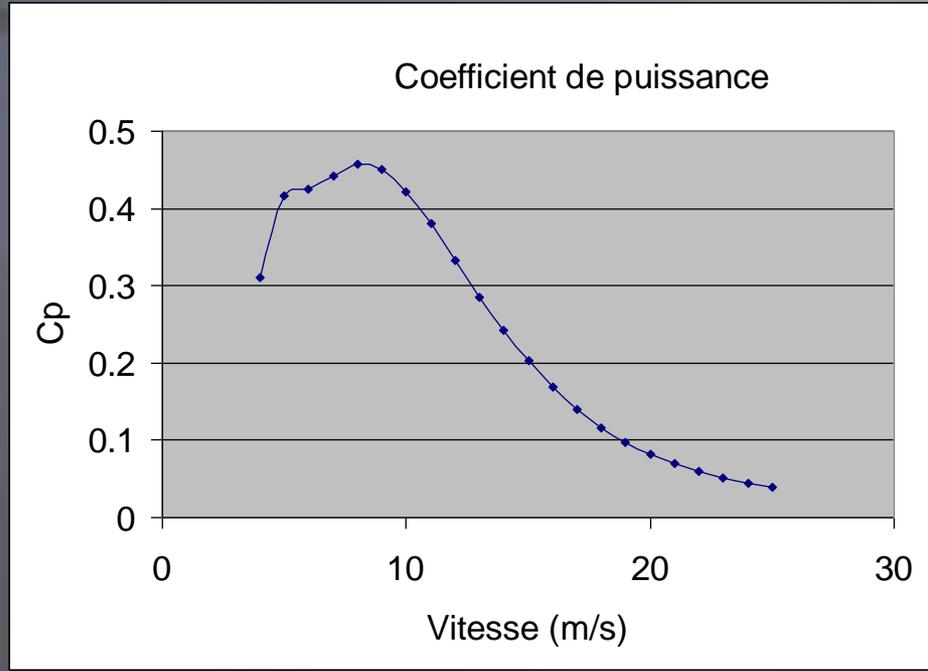
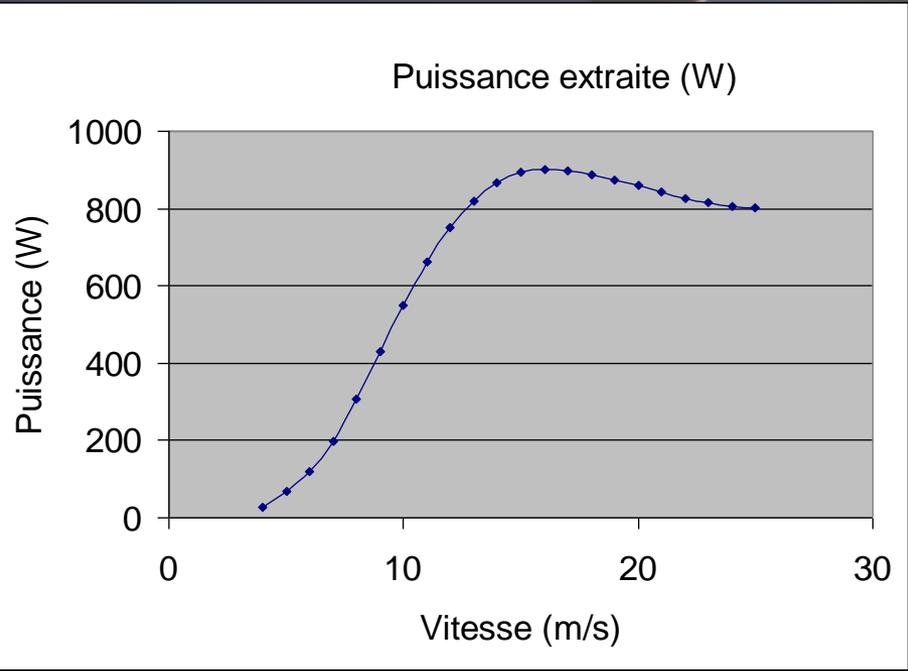
$$\frac{dC_P}{da} = 0 \text{ pour } a = \frac{1}{3}$$

$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} = 59\%$$



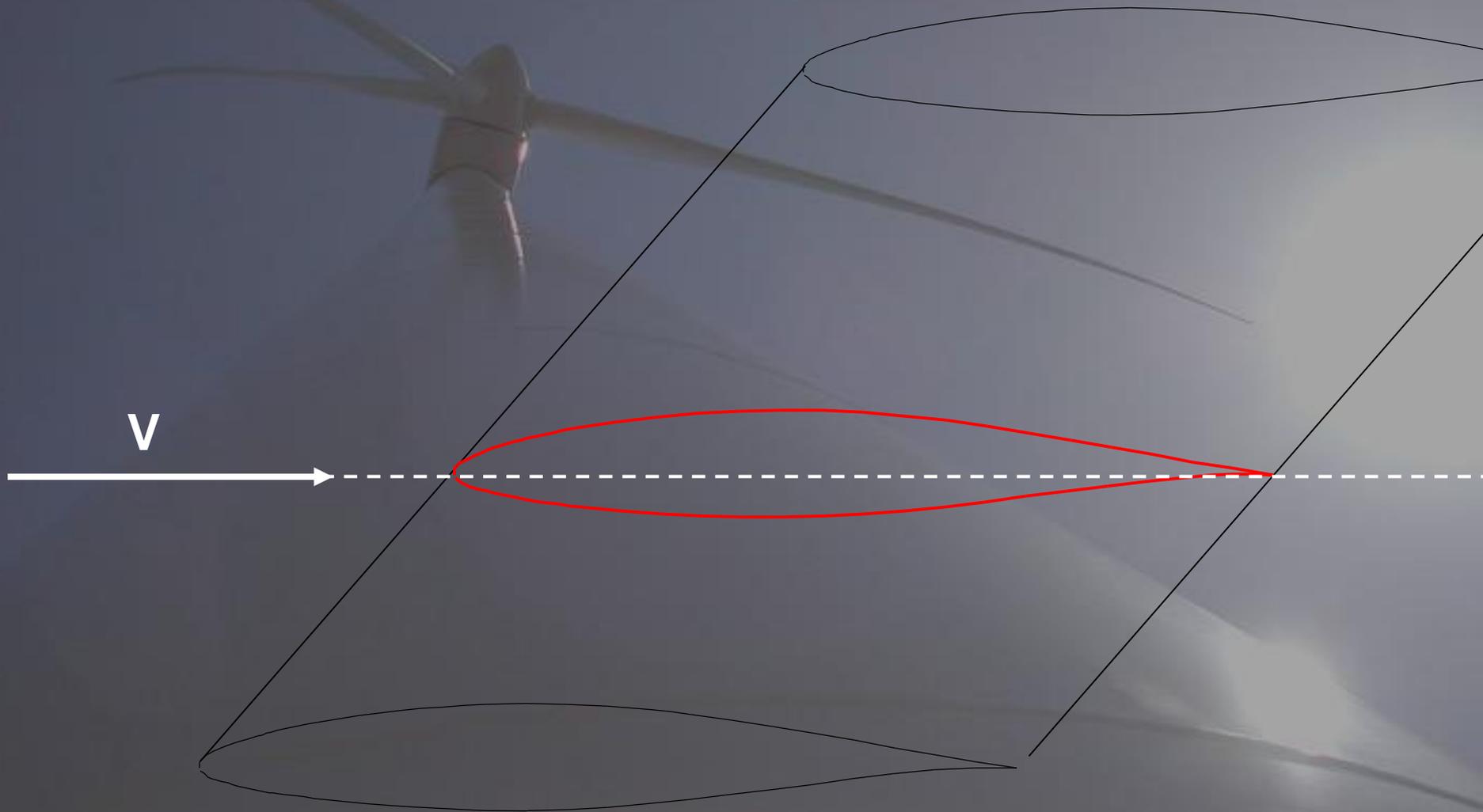
# Puissance extraite

Coefficient de puissance  
= Puissance extraite/  
Puissance du vent

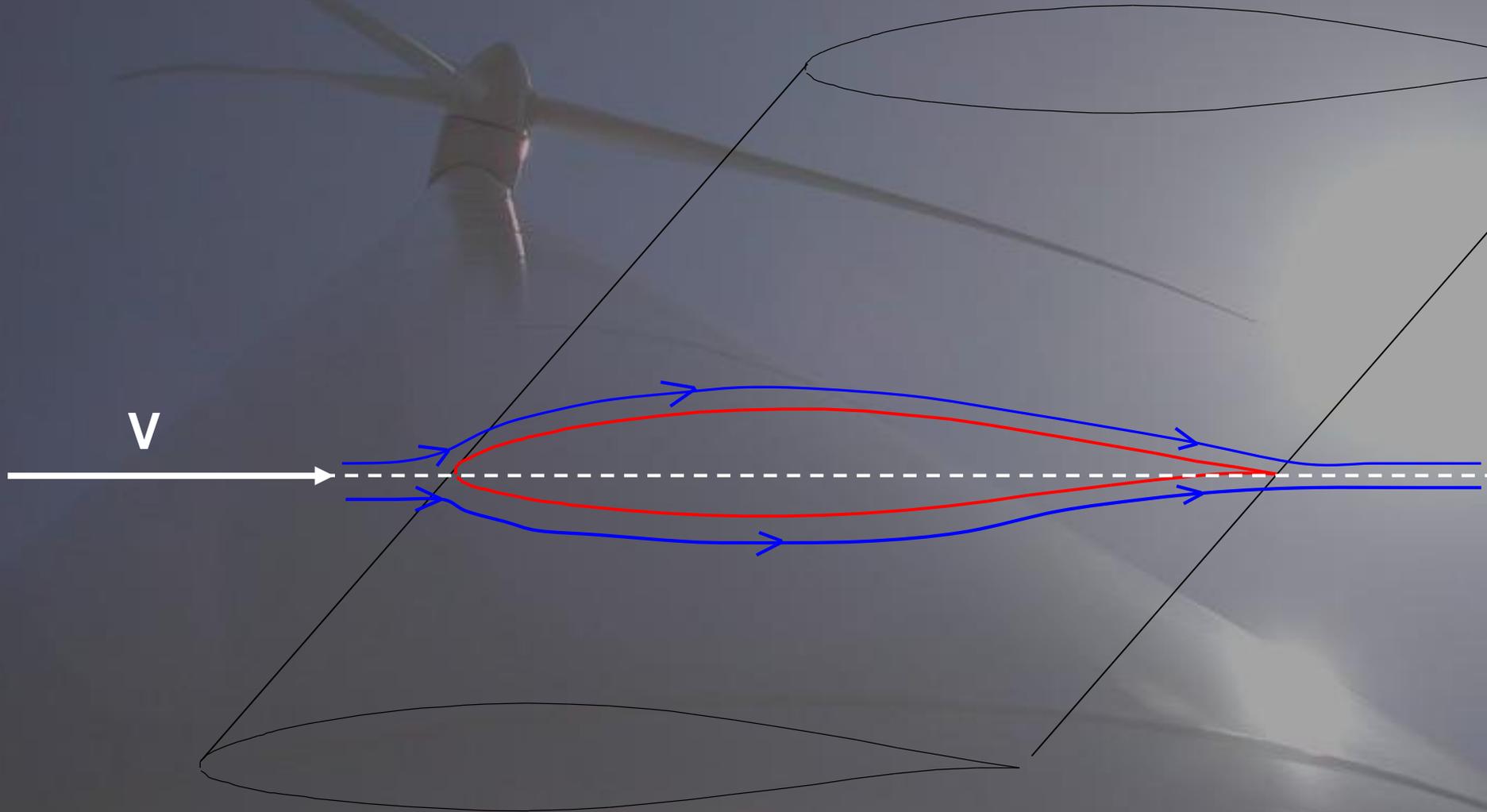


Exemple de l'éolienne Neg Micon NM52/900

# Aérodynamique de pales

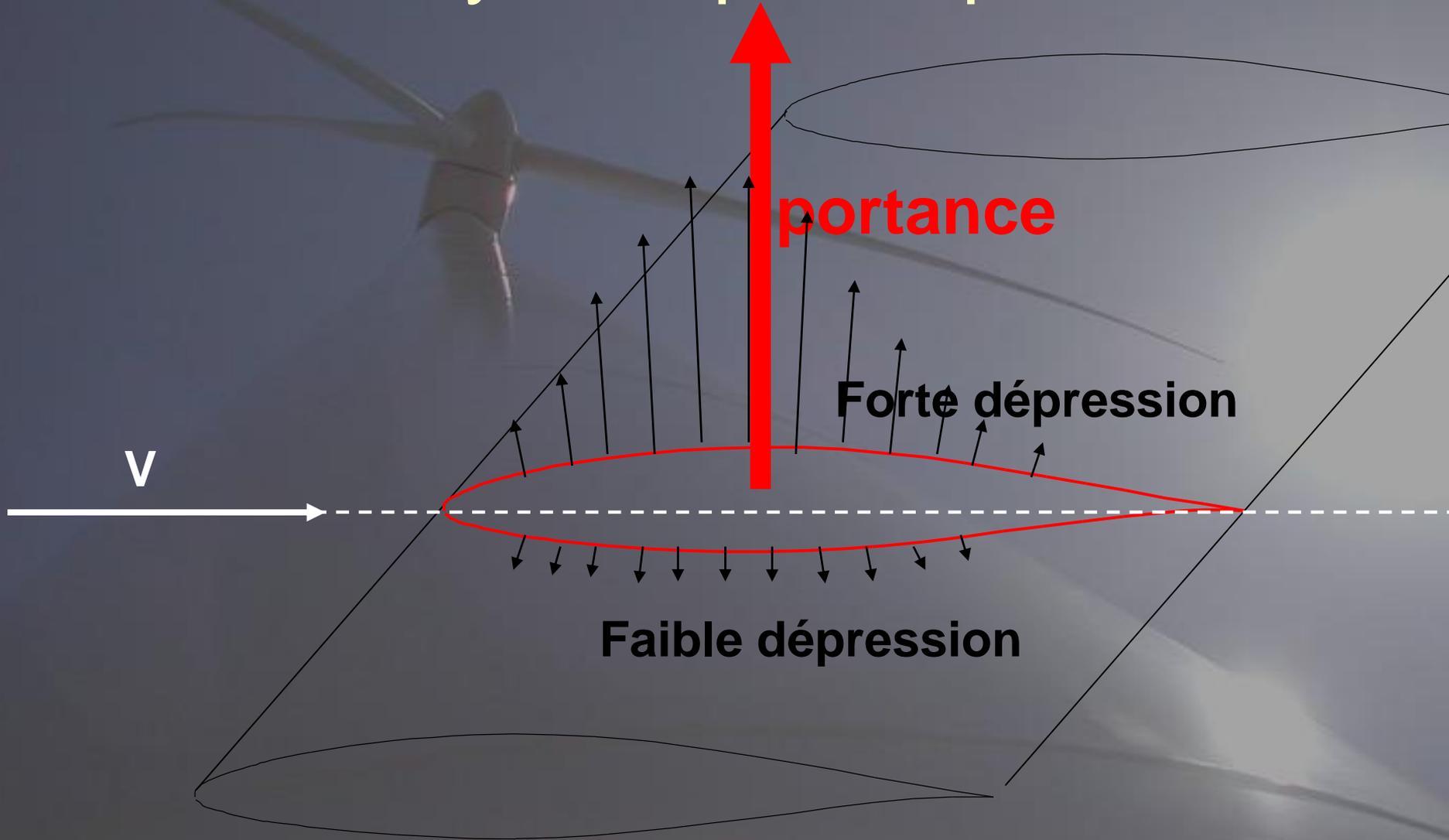


# Aérodynamique de pales



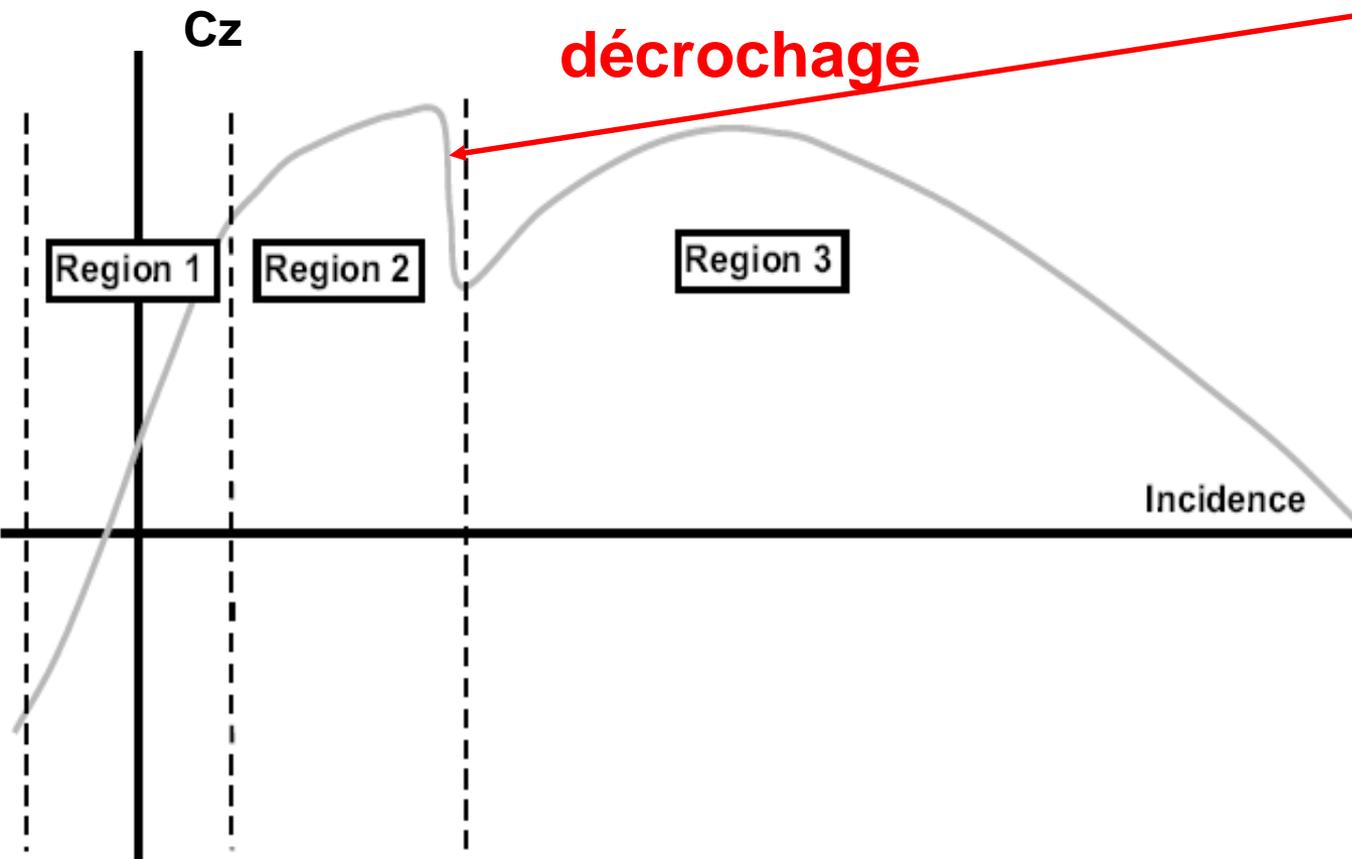
**Bernoulli** : le long d'une ligne de courant, si la vitesse augmente, la pression diminue

# Aérodynamique de pales

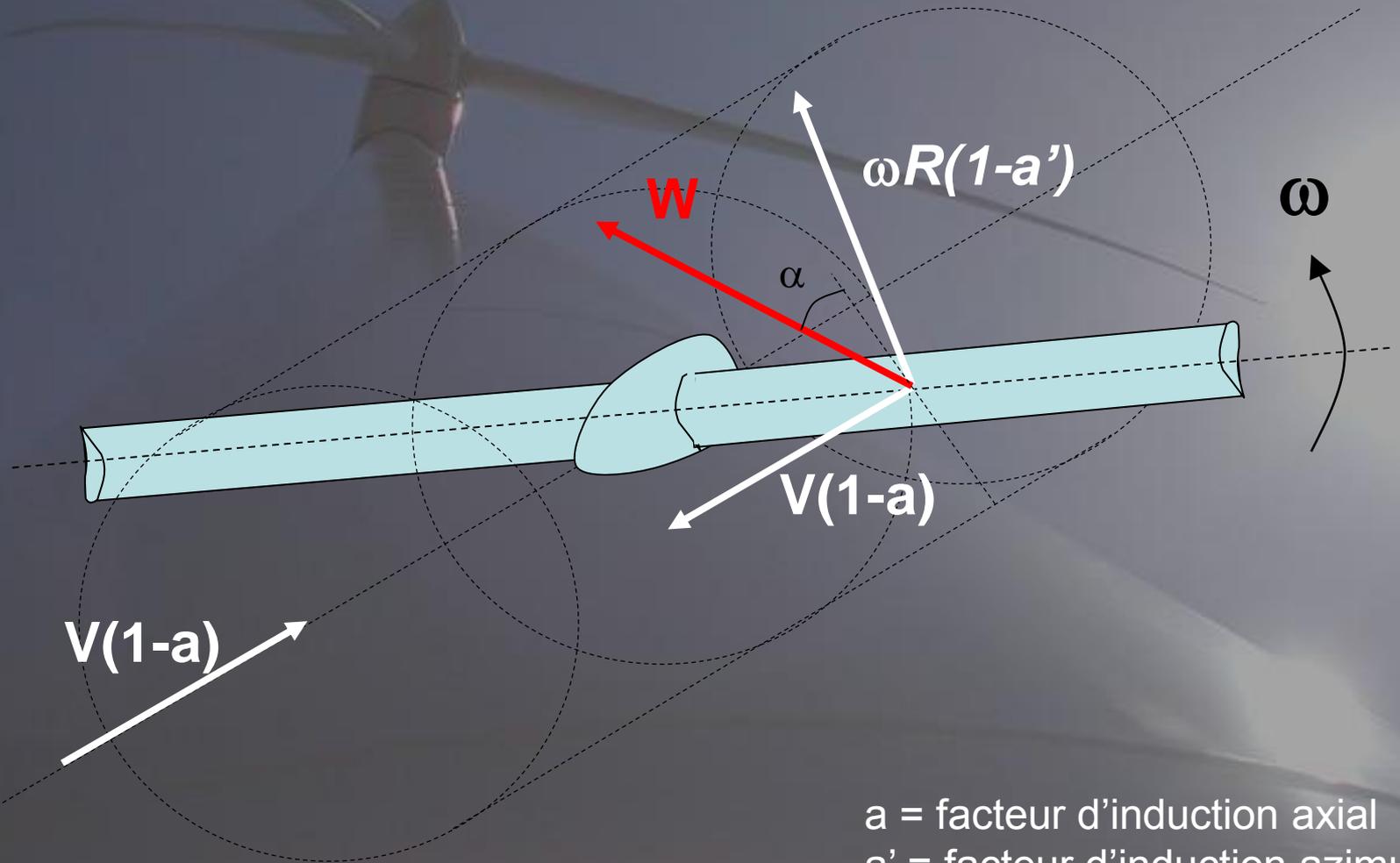


**Bernoulli** : le long d'une ligne de courant, si la vitesse augmente, la pression diminue

# La portance

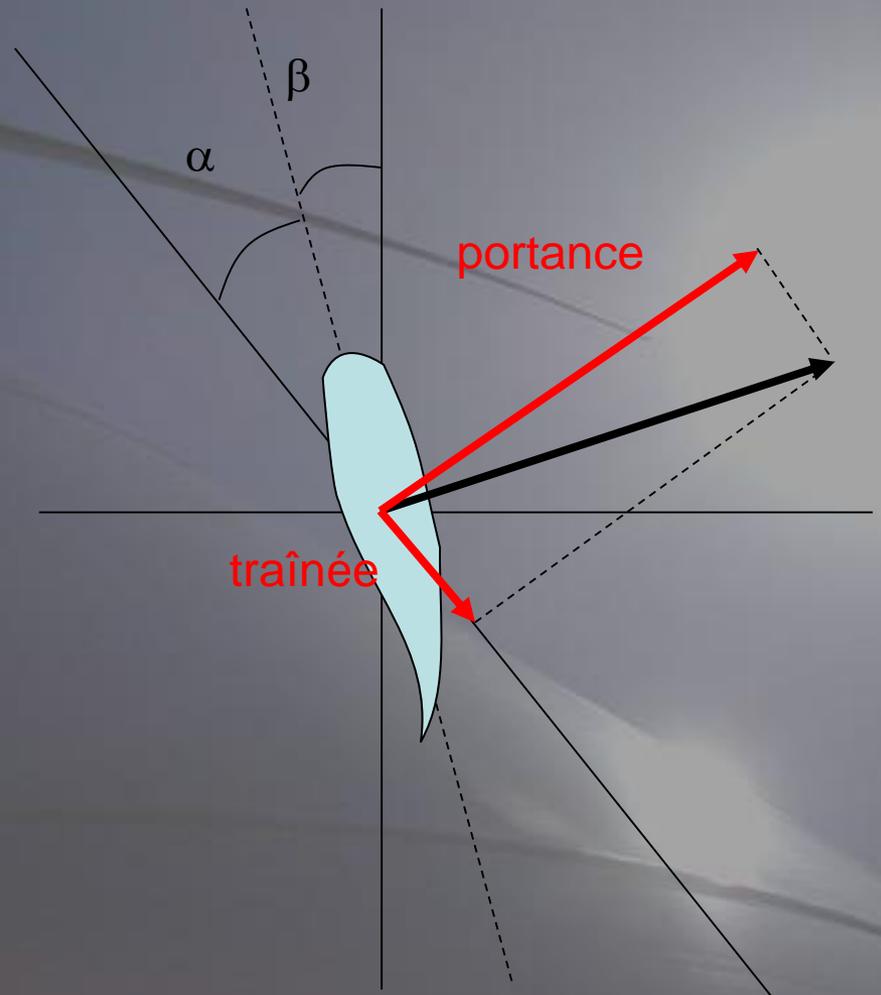
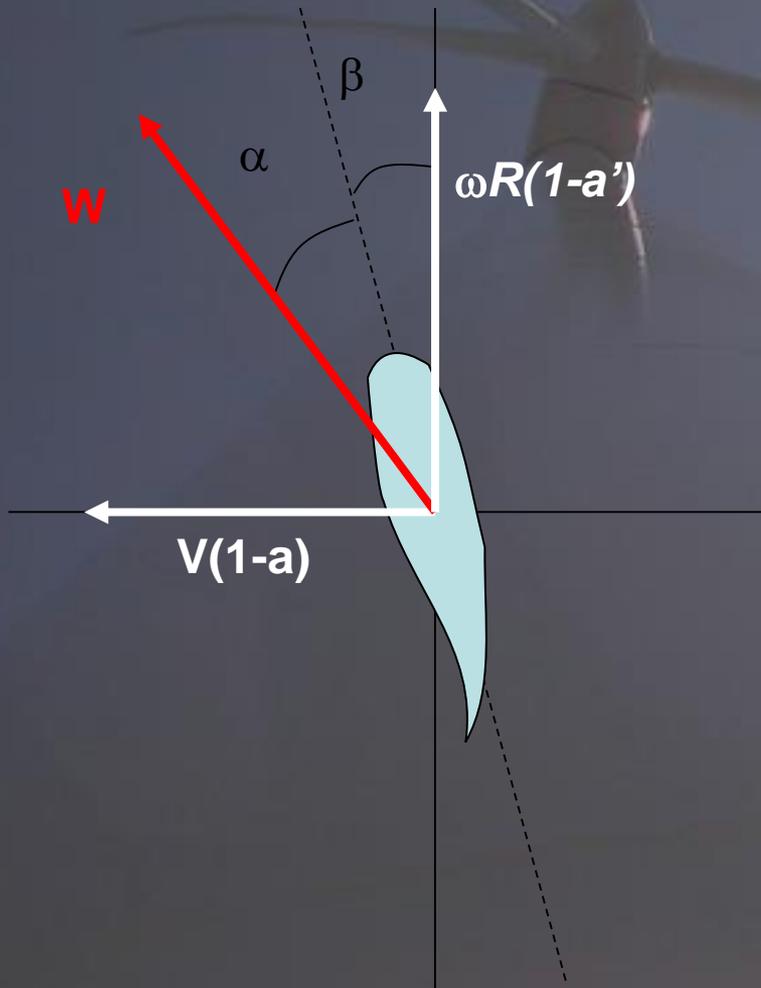


# Aérodynamique des pales en rotation

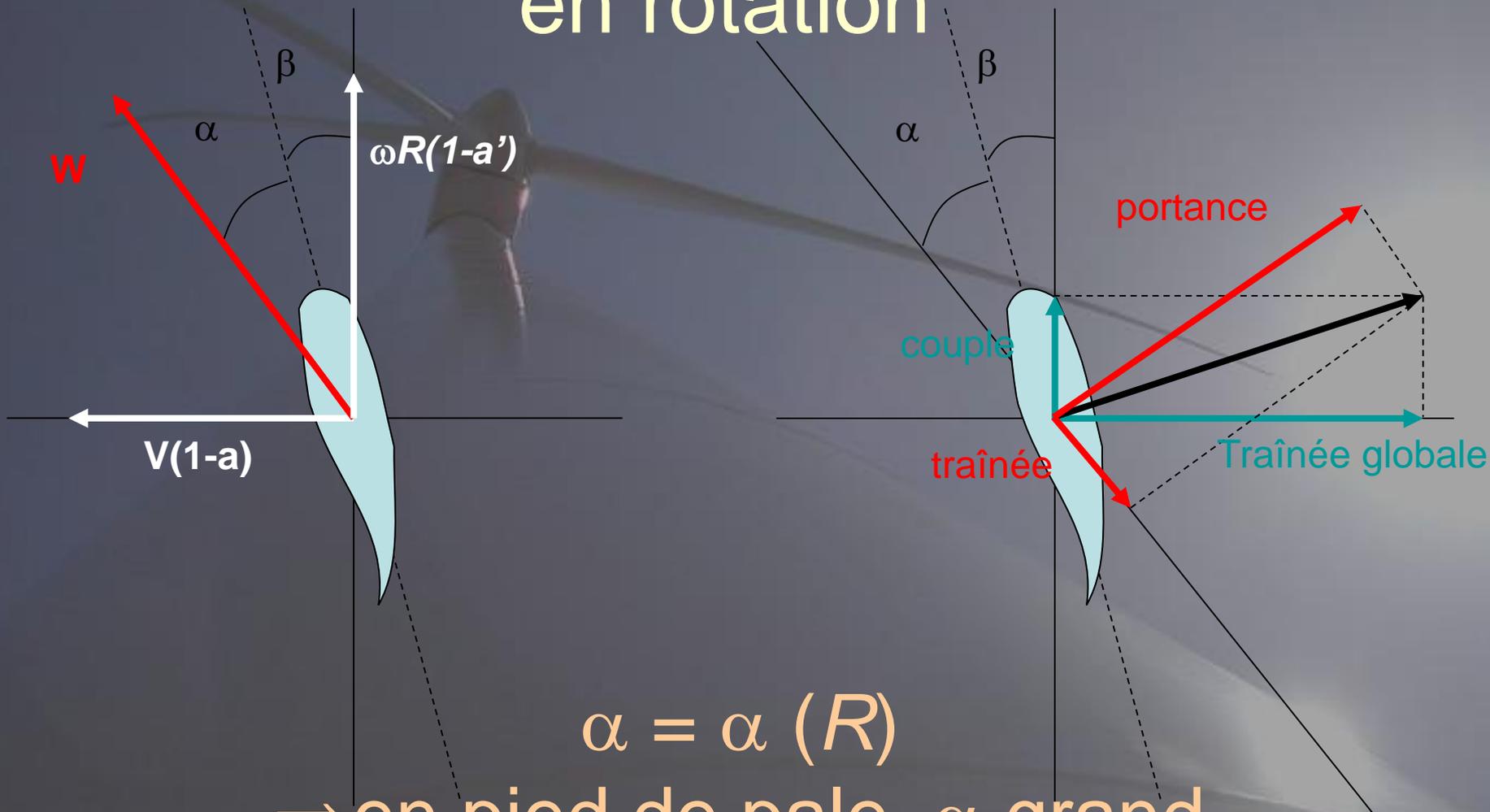


$a$  = facteur d'induction axial  
 $a'$  = facteur d'induction azimuthal

# Aérodynamique des pales en rotation



# Aérodynamique des pales en rotation



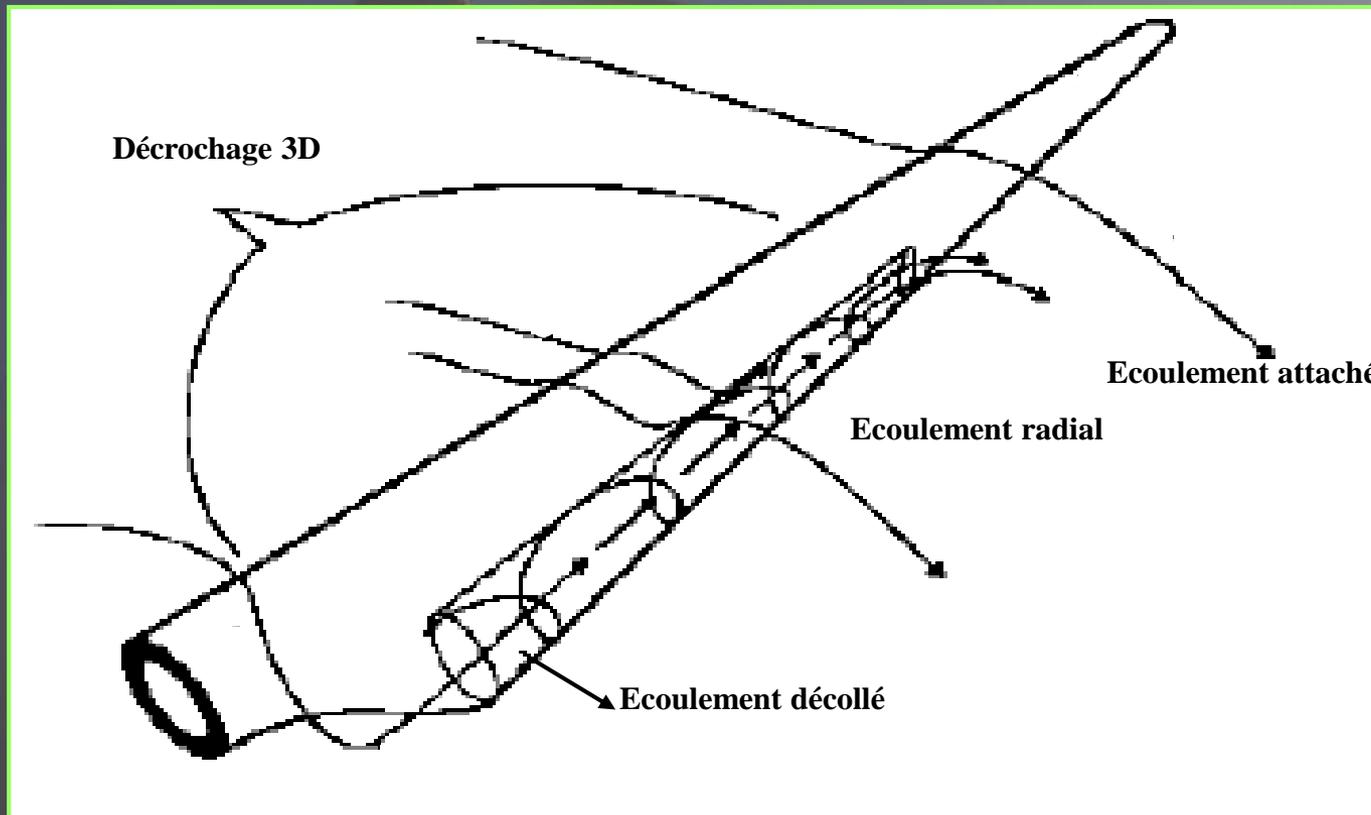
$$\alpha = \alpha (R)$$

⇒ en pied de pale,  $\alpha$  grand

⇒ En bout de pale,  $\alpha$  petit

# Aérodynamique des pales en rotation

La corde des pales n'est pas constante



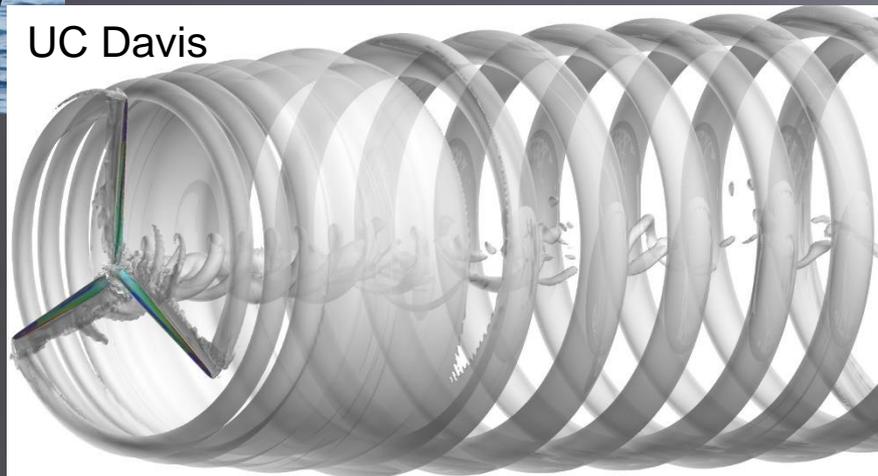
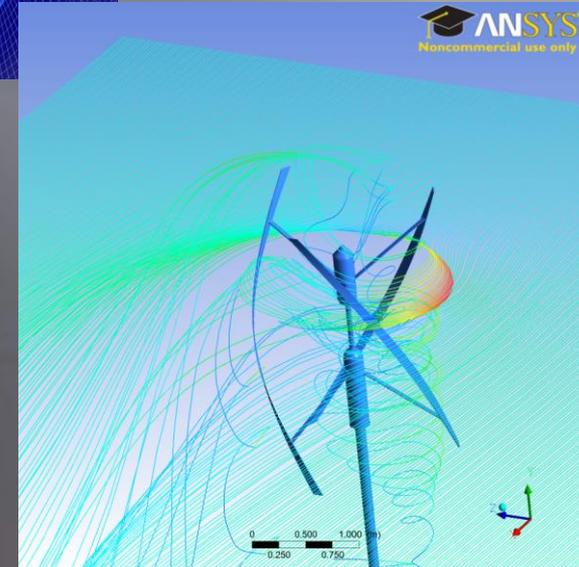
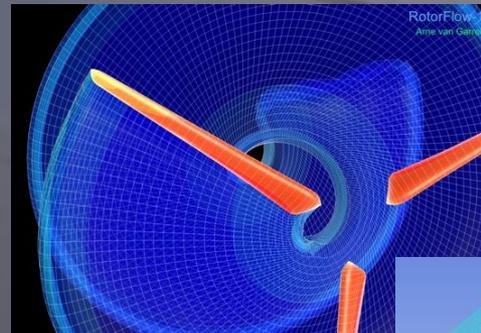
# Aérodynamique des pales

La corde des pales n'est pas constante



# Aérodynamique

- Amélioration de la production globale
- Réduction des efforts aérodynamiques
- Réduction du bruit
- Concepts innovants



# EOLIENNES MARINES FLOTTANTES : VAWTs are Back !



**Spinfloat**



**Nova**



**Deepwind**

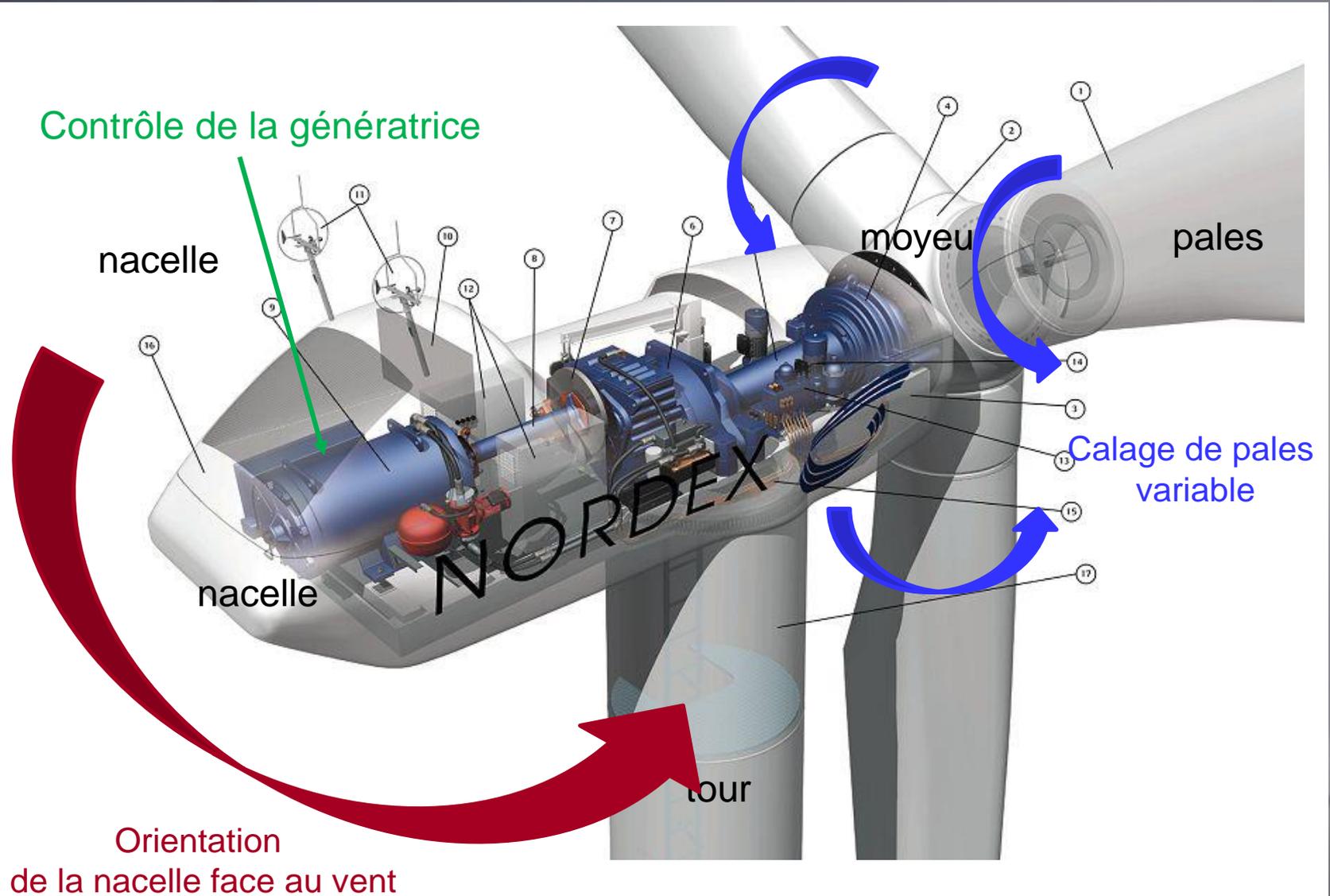


**Twin Flow**

# Programme

- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
  - Vent et turbulence
  - Matériaux et structures
  - Aérodynamique
  - **Contrôle**
  - Conversion électromécanique
  - Intégration au réseau électrique
  - Acceptation sociale et impacts environnementaux

# Contrôle (automatique)



# Contrôle de la puissance

- Vitesse optimale de fonctionnement 15 m/s
- Si  $V > 15$  m/s, il faut perdre de l'énergie
  - Contrôle à calage variable de pales
    - = contrôle actif (éolienne à pas variable)
    - Ingénierie complexe
  - Régulation par décrochage aérodynamique
    - = contrôle passif (éolienne à pas fixe)
    - Si  $V$  augmente,  $\alpha$  augmente
    - ⇒ décrochage local
    - ⇒ perte de portance

# Contrôle (automatique)

- Contrôle à multiples entrées/sorties
- Beaucoup d'arrêt intempestifs
- Optimisation des stratégies de contrôle
  - Contrôle des pales, du rotor, des fermes...
- Concepts innovants de contrôle

# Contrôle assisté par LiDAR

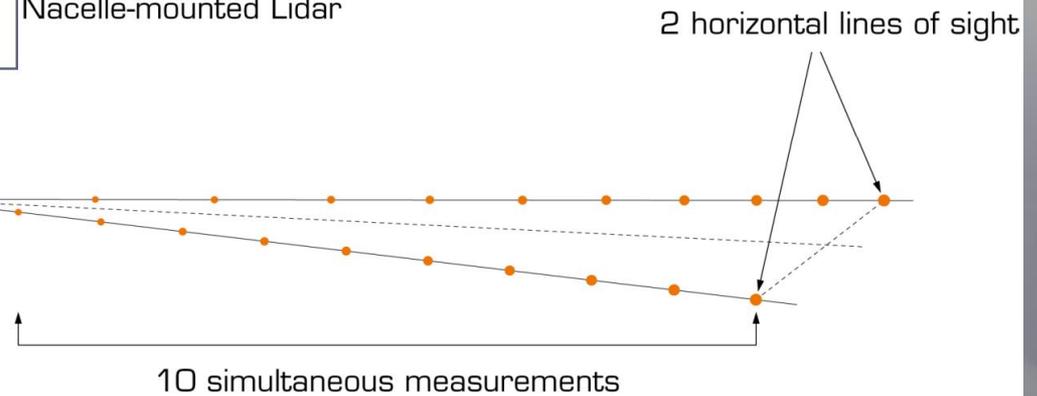
Du contrôle de réaction au contrôle d'anticipation



Nacelle-mounted Lidar



Mesure anticipée du vent qui va impacter le rotor

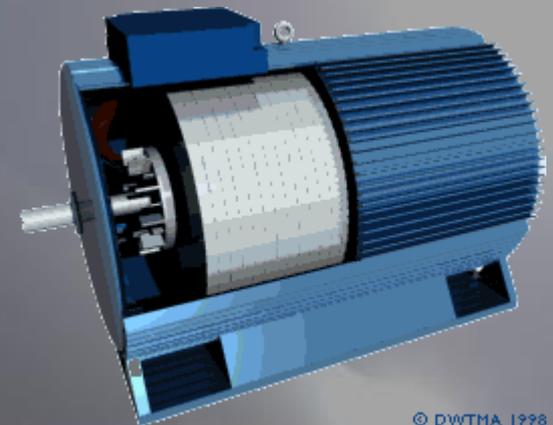


# Programme

- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
  - Vent et turbulence
  - Matériaux et structures
  - Aérodynamique
  - Contrôle
  - **Conversion électromécanique**
  - Intégration au réseau électrique
  - Acceptation sociale et impacts environnementaux

# Conversion électromécanique

- Transforme l'énergie mécanique en énergie électrique
- Génère un courant alternatif triphasé de 680V
- Transformé en 10 ou 30 kV pour être raccordé au réseau
- Signal électrique en 50 Hz
- Entraînement indirect (75%)
- Génératrices synchrone ou asynchrone



# Conversion électromécanique

- Multiplicateur, défauts des roulements
  - Nouveaux concepts : systèmes hydrauliques
- Conversion conventionnelle optimisée
  - Nouveaux concepts: supraconducteurs
- Réduction de taille et de poids
- Réduction de l'utilisation des terres rares

# Programme

- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
  - Vent et turbulence
  - Matériaux et structures
  - Aérodynamique
  - Contrôle
  - Conversion électromécanique
  - **Intégration au réseau électrique**
  - Acceptation sociale et impacts environnementaux

# Intégration au réseau

- Raccordement au réseau de transport électrique
- Production intermittente
- Atténuée par une production distribuée
- « Smartgrid » (de la production centralisée vers la production distribuée)

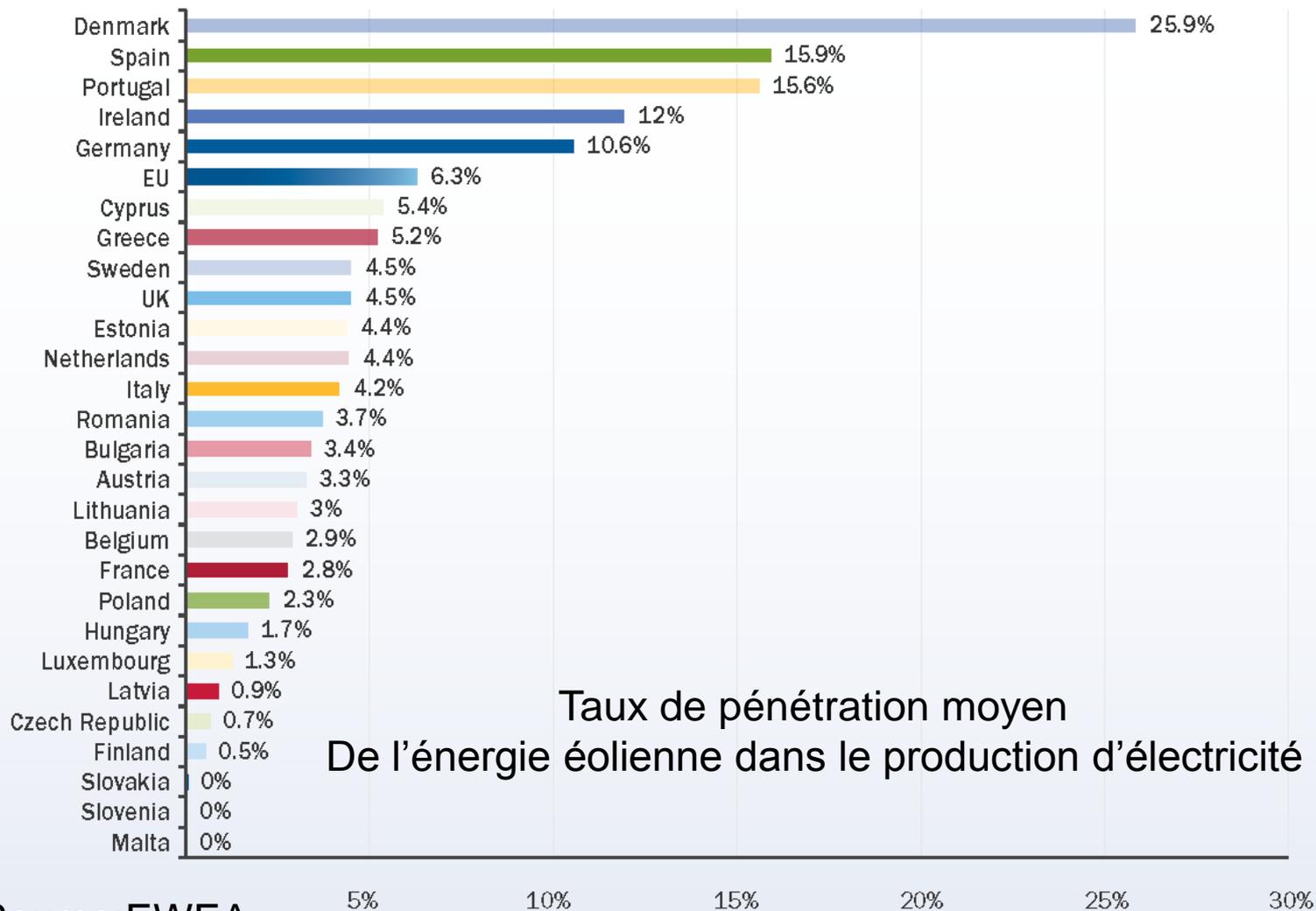
Projet européen SENSIBLE



# Intégration au réseau

WIND SHARE OF TOTAL ELECTRICITY CONSUMPTION

FIGURE 3.6



Source: EWEA

# Programme

- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
  - Vent et turbulence
  - Matériaux et structures
  - Aérodynamique
  - Contrôle
  - Conversion électromécanique
  - Intégration au réseau électrique
  - **Acceptation sociale et impacts environnementaux**

# Acceptabilité sociale

- Nuisance visuelle très subjective
  - de « C'est affreux... » à ... « c'est superbe!! »
  - Etude d'impact et insertion paysagère par géographes et sociologues
- Nuisance sonore
  - 1 éolienne : 45dB à 100m
  - 30 éoliennes : 45dB à 500 m
  - Bridage si niveau de bruit dépassé
- Syndrome « Not in my back yard » (pas chez moi !)...

# Acceptabilité sociale

- Aspects souvent sous-estimés traités à posteriori
- Expériences positives:
  - Projets participatifs
  - Soutien des entreprises à des projets d'intérêts collectifs locaux

# Impacts environnementaux

- Eoliennes et oiseaux

- Oiseaux migrateurs
- Oiseaux locaux et chauve-souris (suivant les études: 0,1 à 4 oiseaux tués / éolienne / an)
- entre 1.4 et 3 milliards oiseaux tués par les chats au USA /an\*

contre ~1 million pour 300000 éoliennes installées dans le monde...

- Eoliennes et recyclage

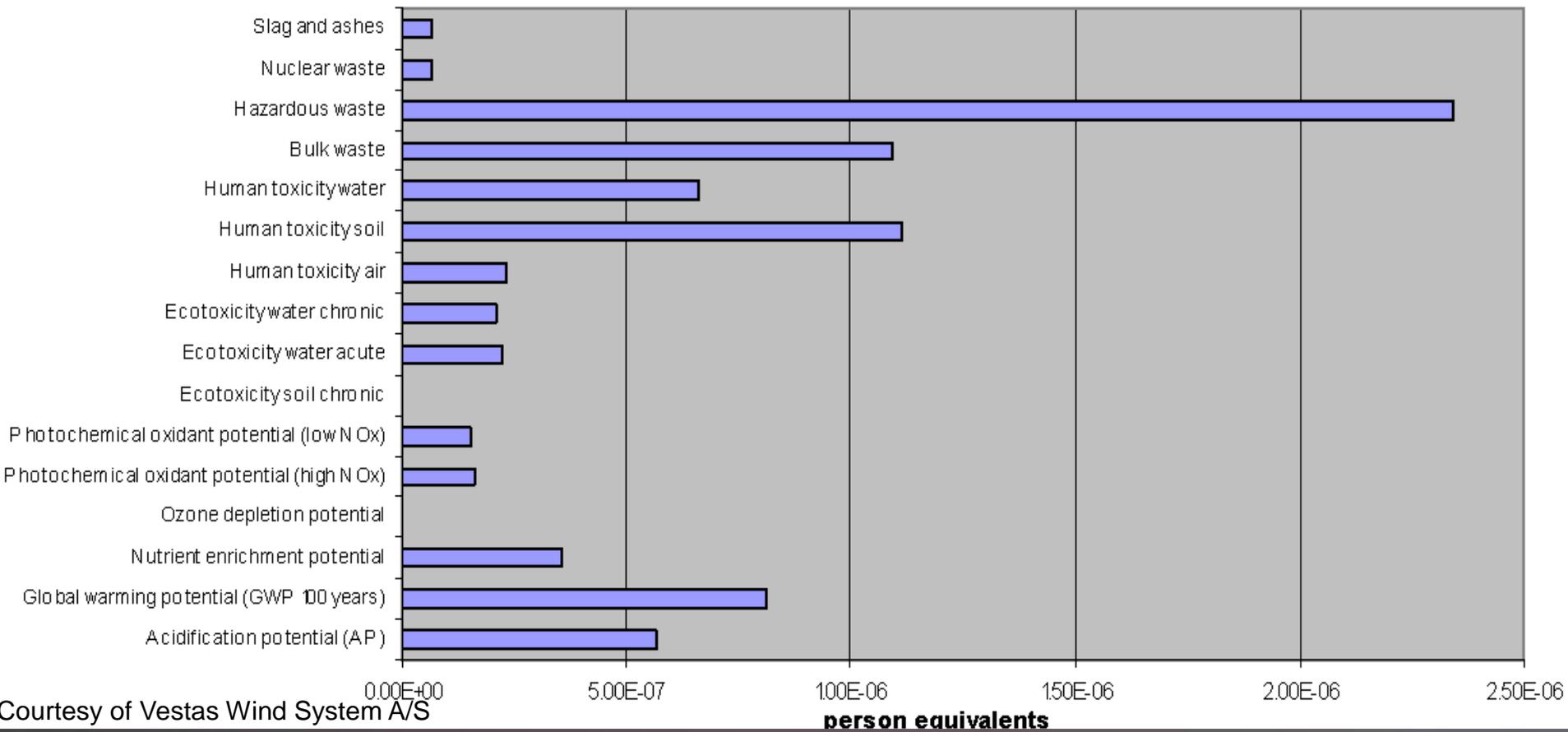
- Clauses de démantèlement
- Pales non recyclables (matériaux composites)
- Analyse du Cycle de Vie (ACV)

\*<http://www.nature.com/articles/ncomms2380>

# Analyse du cycle de vie

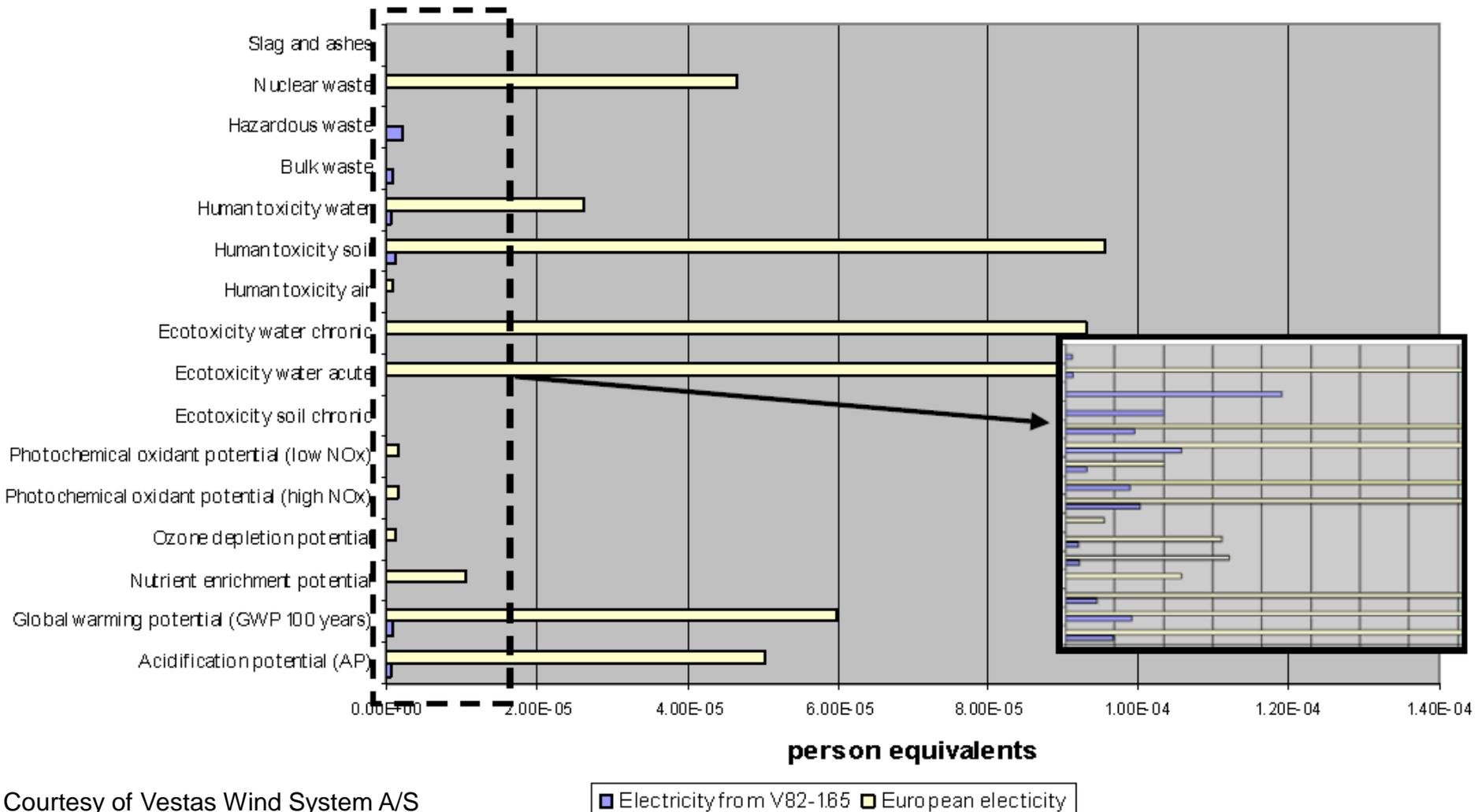
## Exemple : éolienne Vestas V82-1.65MW

Impact environnemental pour 1kWh fourni



# Analyse du cycle de vie

## Exemple : éolienne Vestas V82-1.65MW



# Conclusions

- Source d'énergie à technologie mature
- Doit réduire son cout de production
- Doit réduire l'incertitude sur la production
  
- Des scénarios 100% Energies Renouvelables à l'horizon 2050 apparaissent (ADEME, NREL, etc)

**Eolien + solaire** + hydro + géothermie + marine

# Bibliographie

## ■ Sites internet

- <http://www.wind-energ-sci.net/1/1/2016/> Long-term research challenges in wind energy – a research agenda by the European Academy of Wind Energy
- <https://windeurope.org/> (WindEurope Association)
- [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr) (ADEME)
- [www.windpower.org](http://www.windpower.org) (association danoise)
- [www.meteo.fr](http://www.meteo.fr) (Meteofrance)
- [www.eole.org](http://www.eole.org)
- [www.suivi-eolien.com](http://www.suivi-eolien.com)

## ■ Livres

- Wind Energy Handbook (Wiley & Sons)
- Guide de l'énergie éolienne (Coll. Etudes et filières)