

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



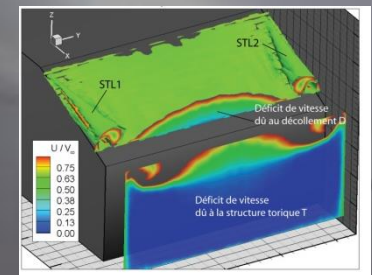
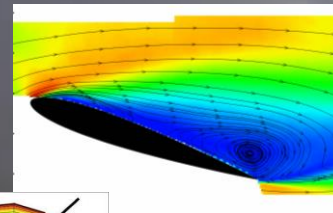
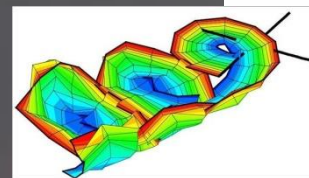
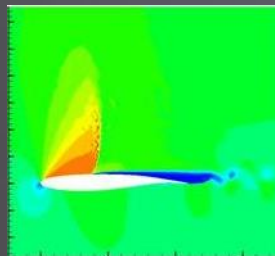
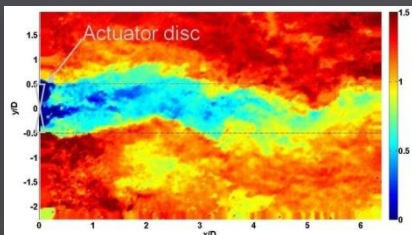
Écoulements et Systèmes Aérodynamiques

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)

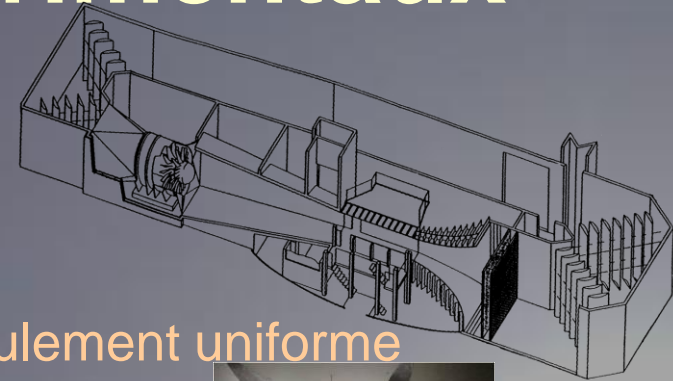
- Veine principale pour les essais en écoulement uniforme

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)

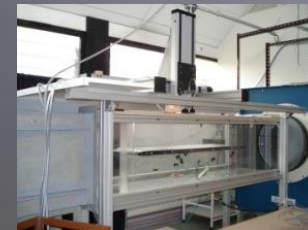
- Soufflerie à Couche Limite Atmosphérique 3m × 5m × 16m
 $V_{\max} = 15 \text{ m/s}$



- 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 400m³
- Coute environ 3,5M€
- Obligation de rachat par EDF à 0,083€/kWh...

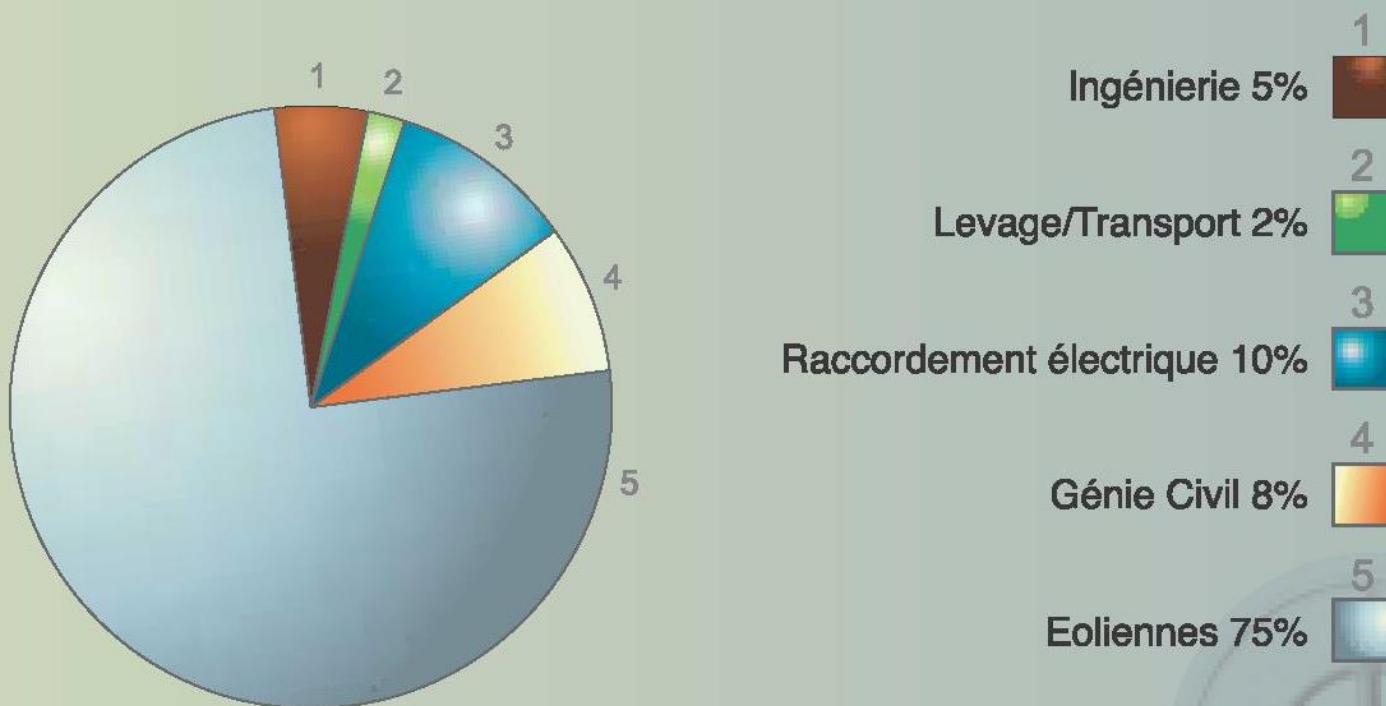


Coûts d'un projet éolien

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



Wind power installed in Europe by end of 2015 (cumulative, GW)

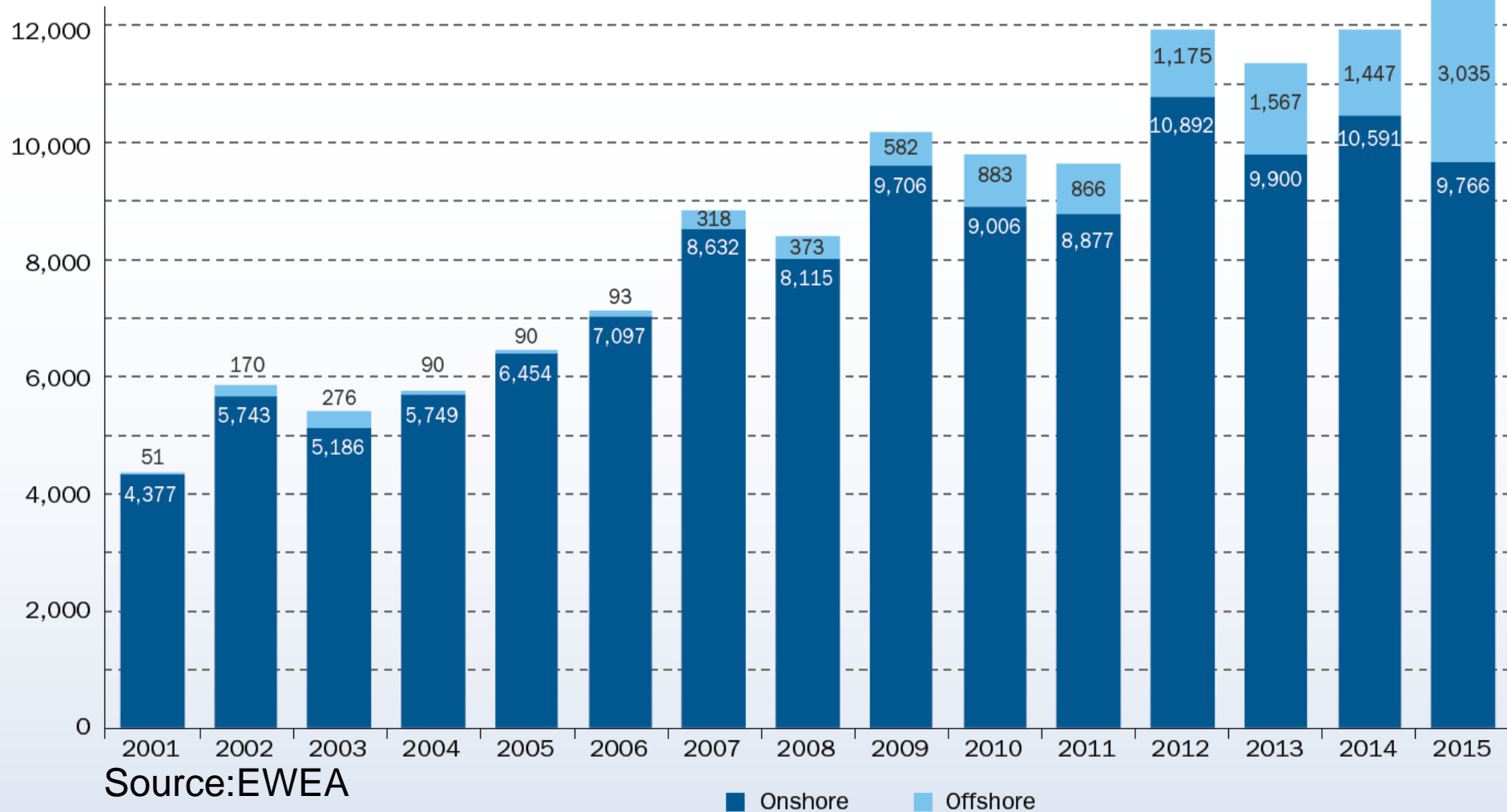
FAROE ISLANDS*
0.02



Source: EWEA

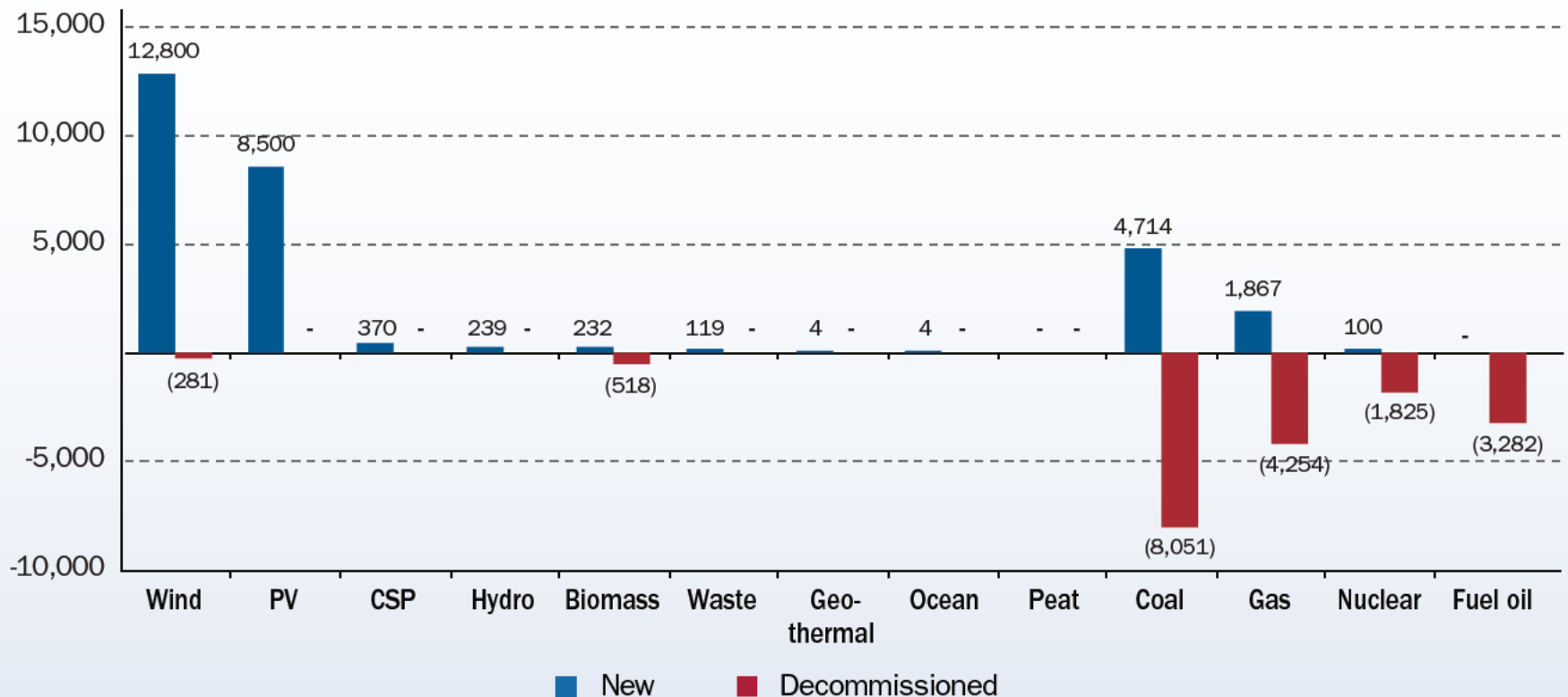
L'énergie éolienne installée en Europe

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)



Evolution de la production en Europe

2000

2015

FIGURE 7: EU POWER MIX 2000 (MW)

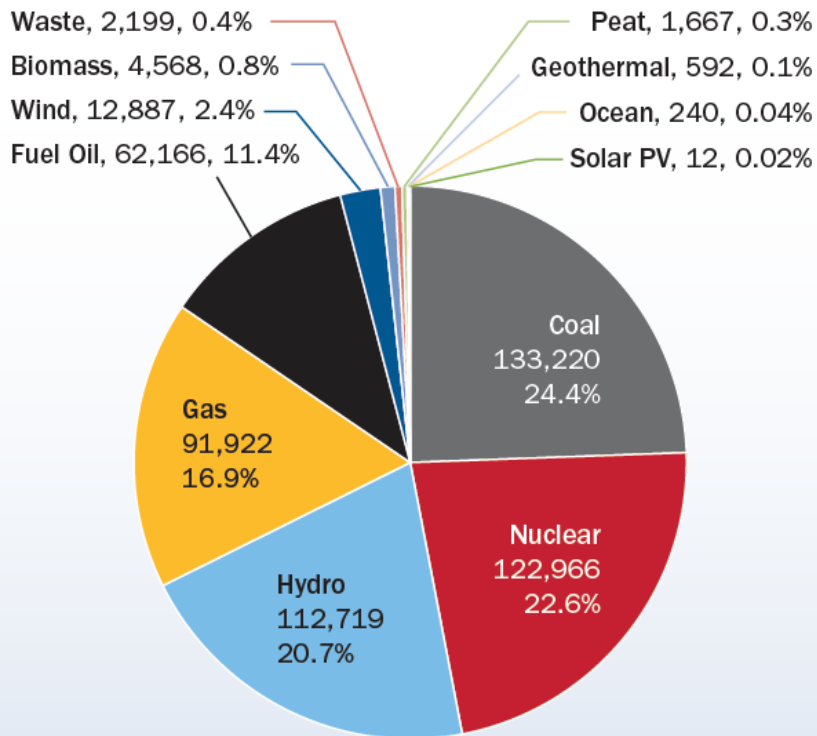
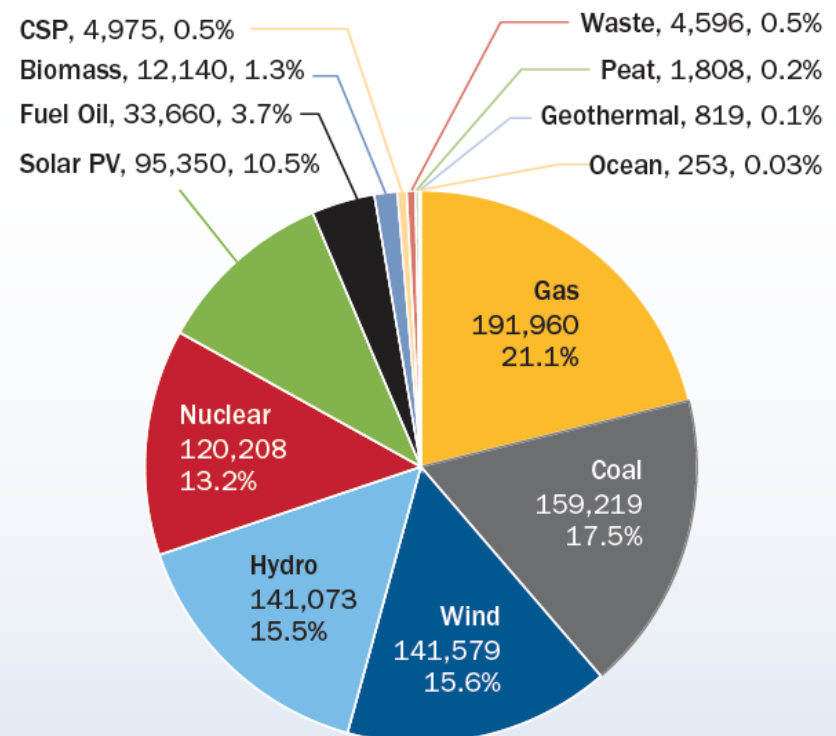


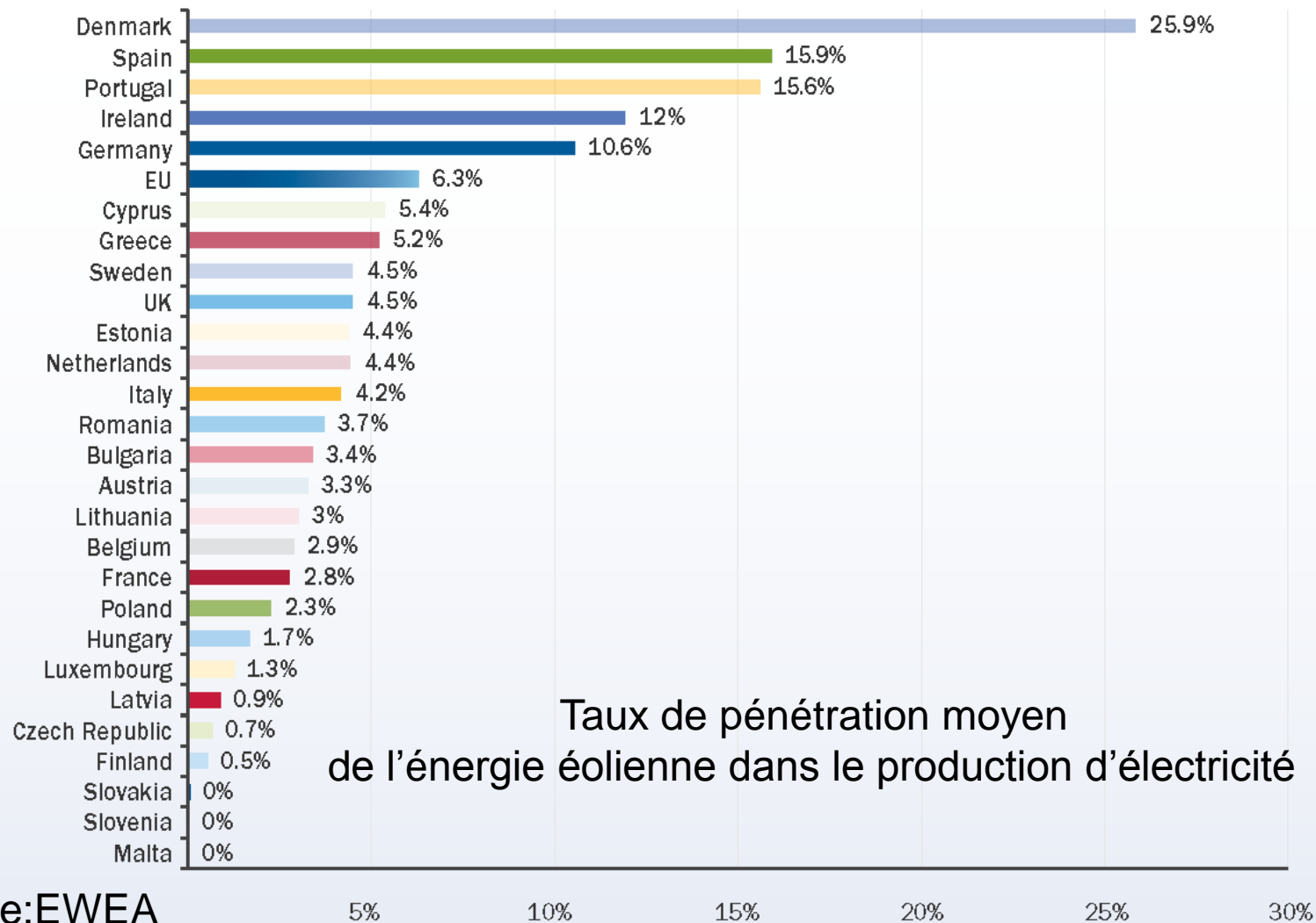
FIGURE 8: EU POWER MIX 2015 (MW)



L'énergie éolienne en Europe

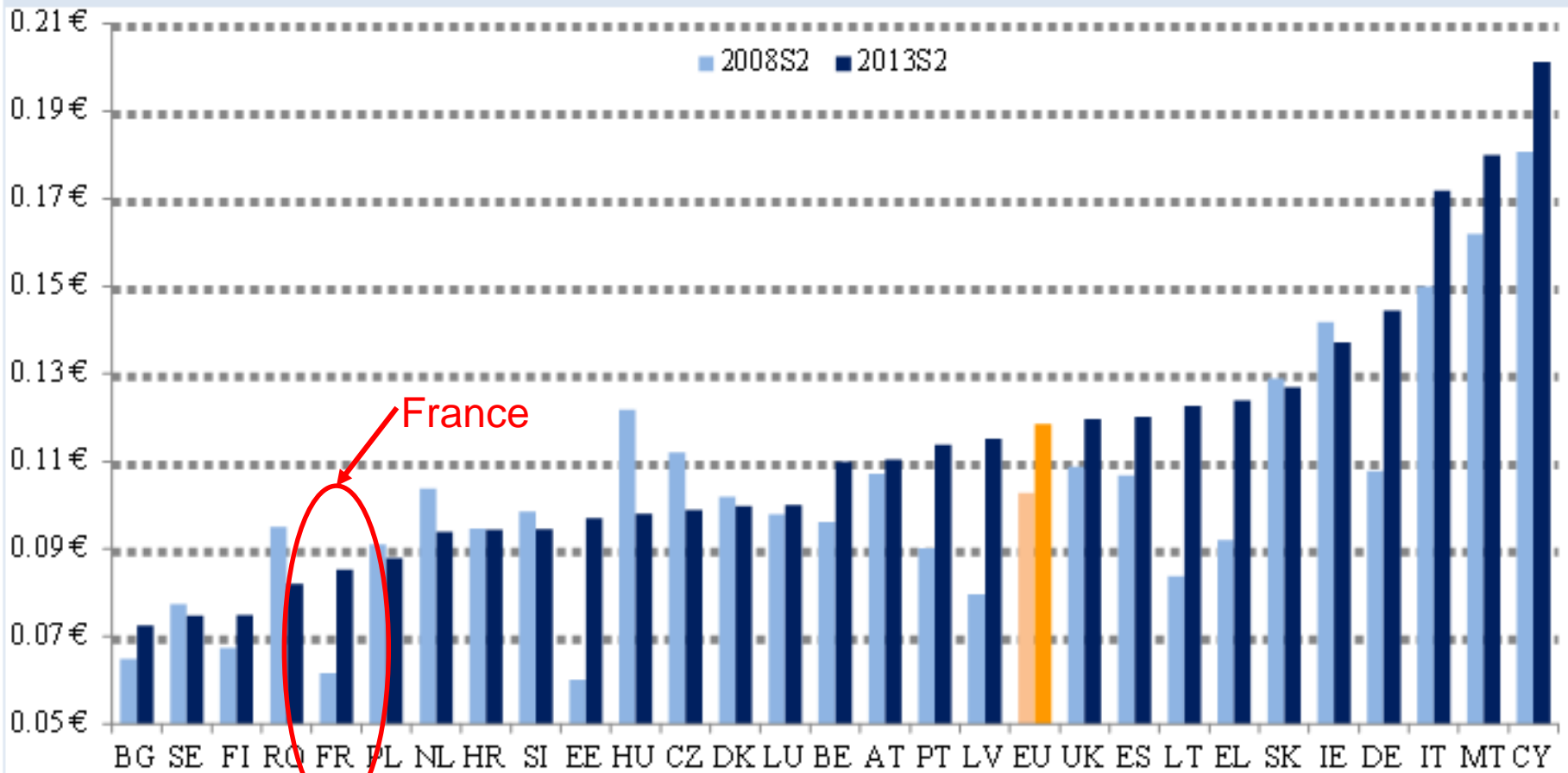
WIND SHARE OF TOTAL ELECTRICITY CONSUMPTION

FIGURE 3.6



Prix de l'électricité en Europe

Electricity prices in the EU



Source: Eurostat

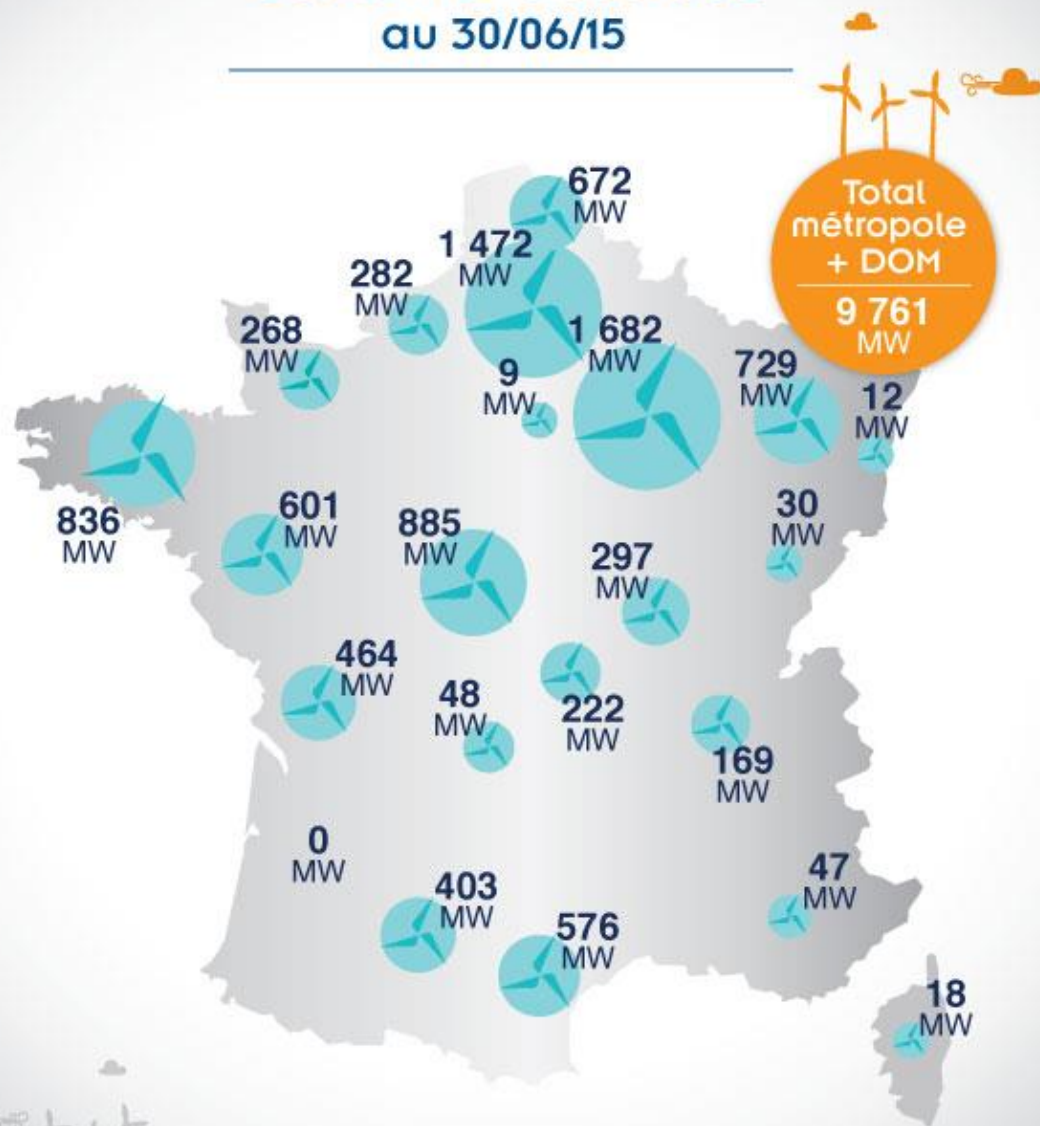
L'énergie éolienne en France

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



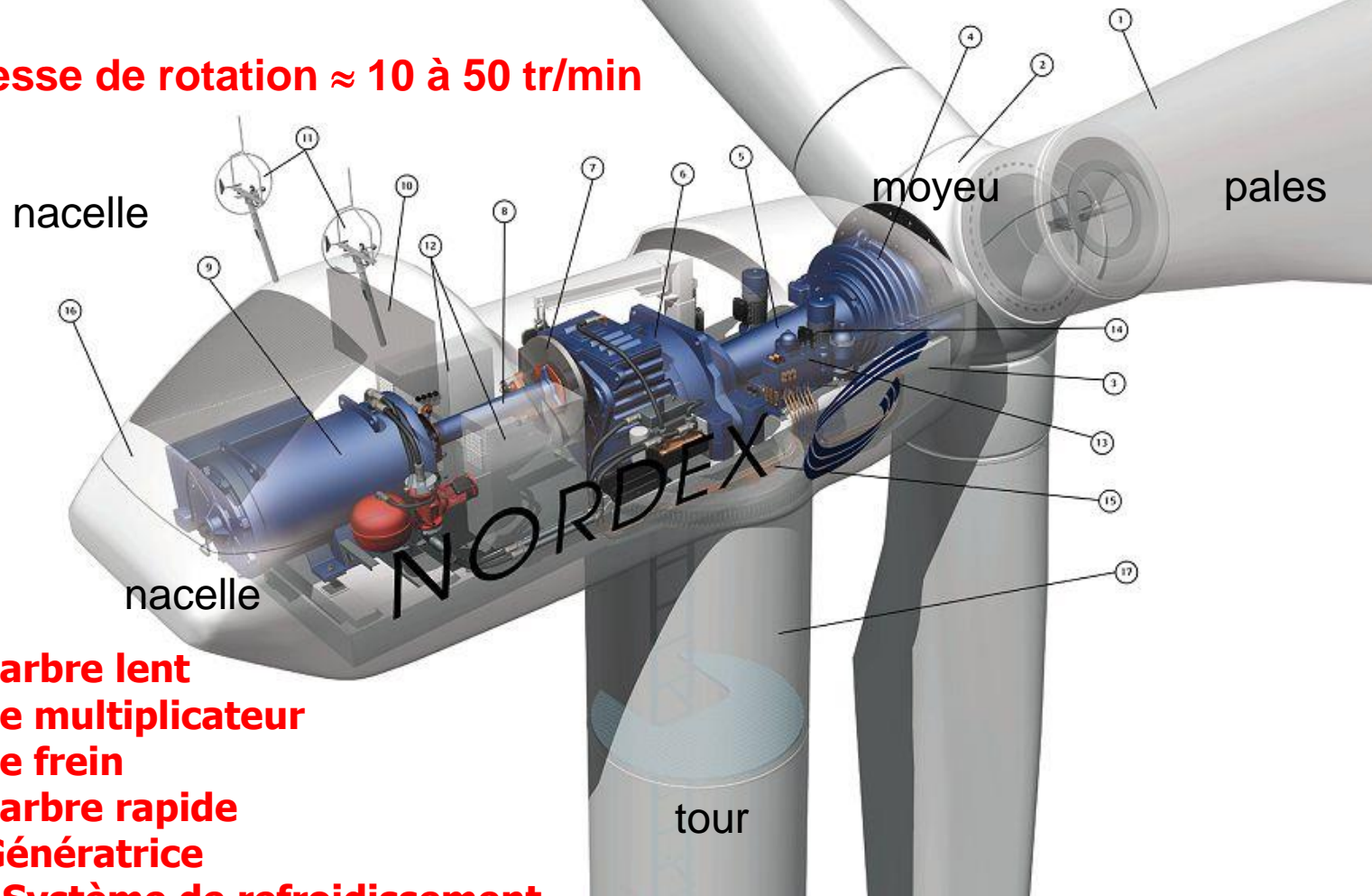
Programme

- 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

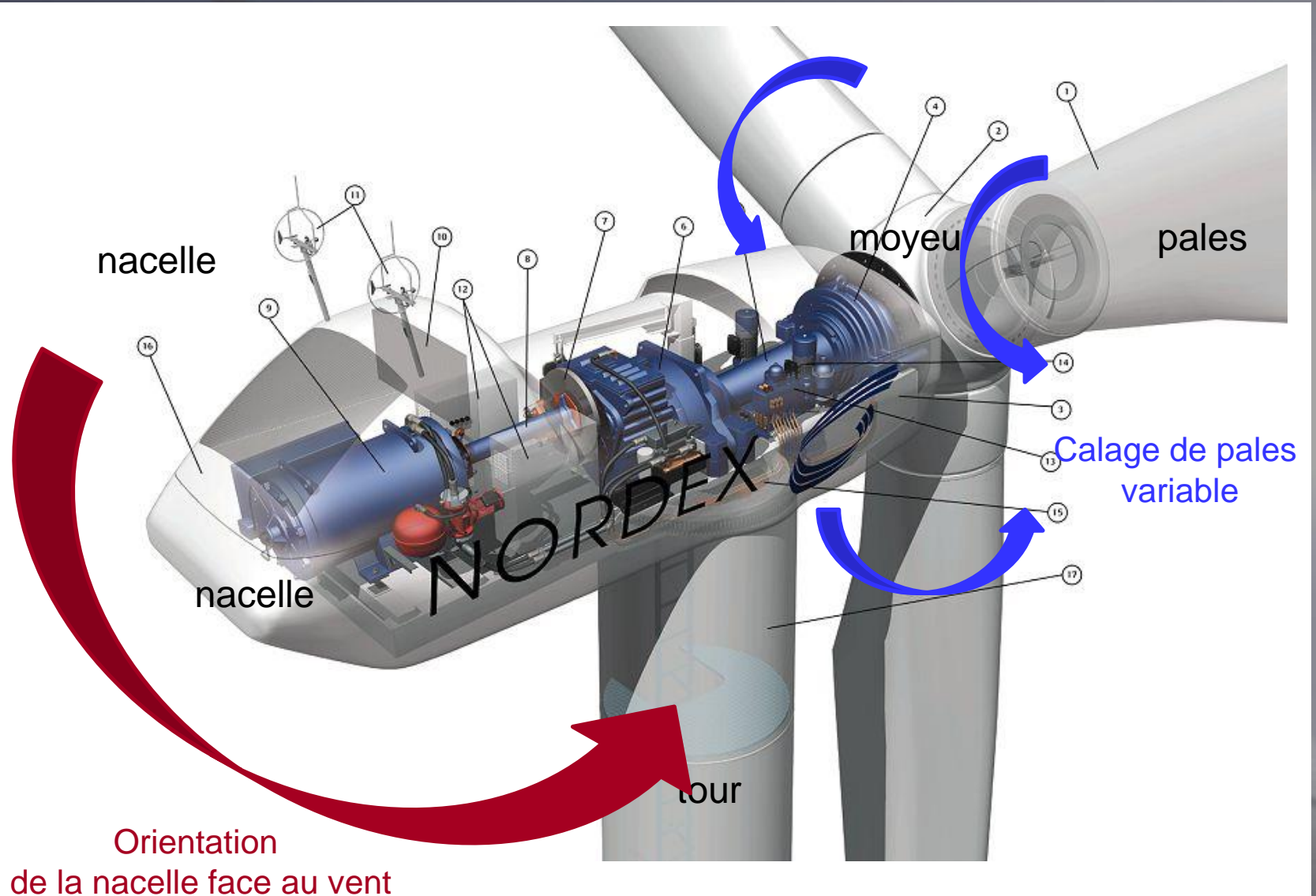
Vitesse de rotation ≈ 10 à 50 tr/min



- 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



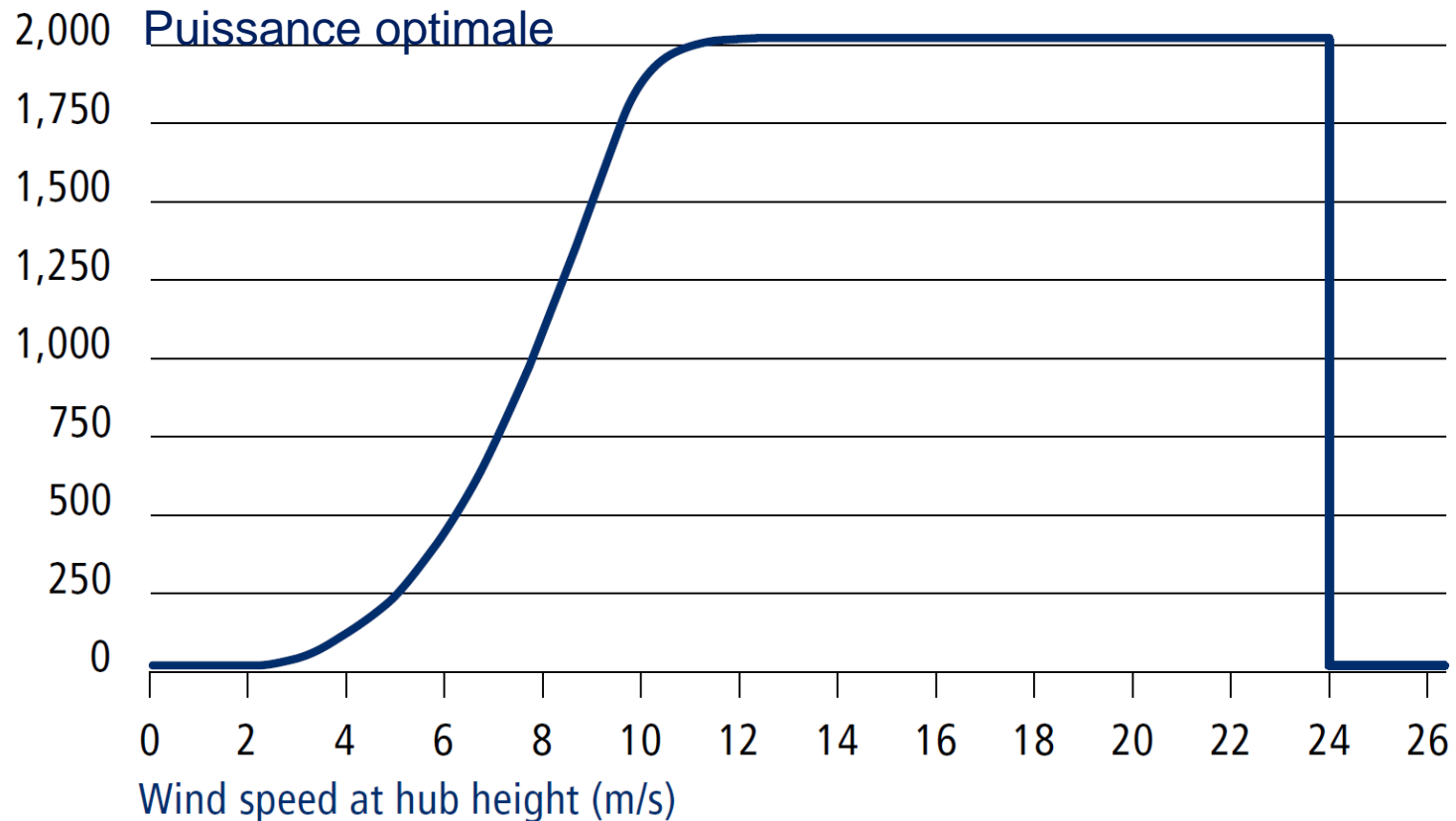
Comment ça marche

Courbe de puissance électrique

Power curve

Senvion MM92

Electrical power (kW)



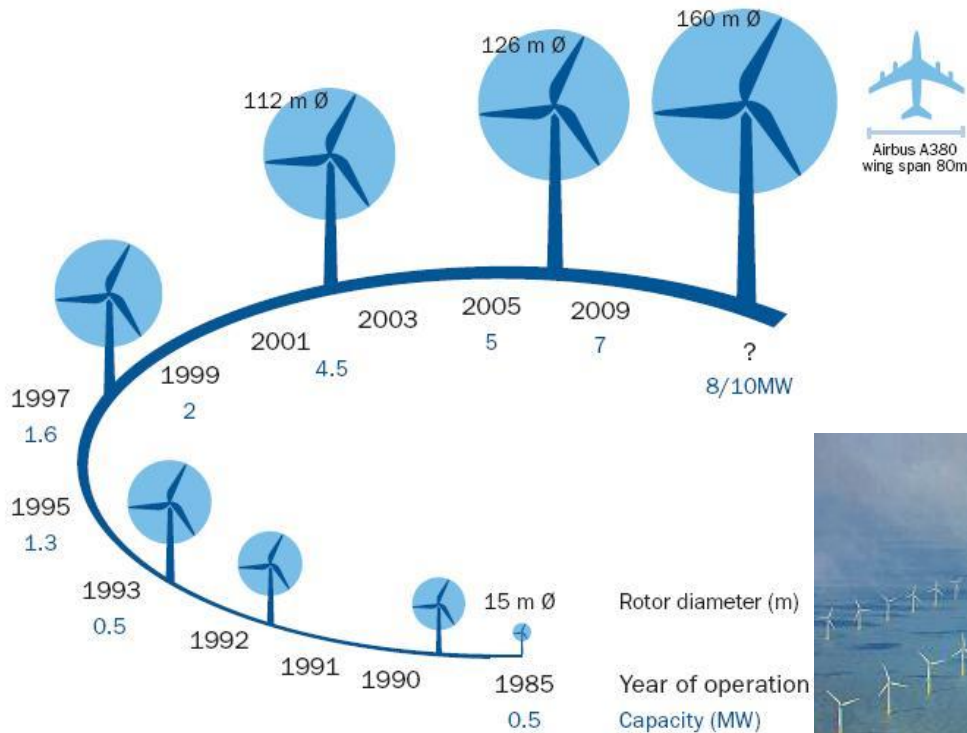
Programme

- 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

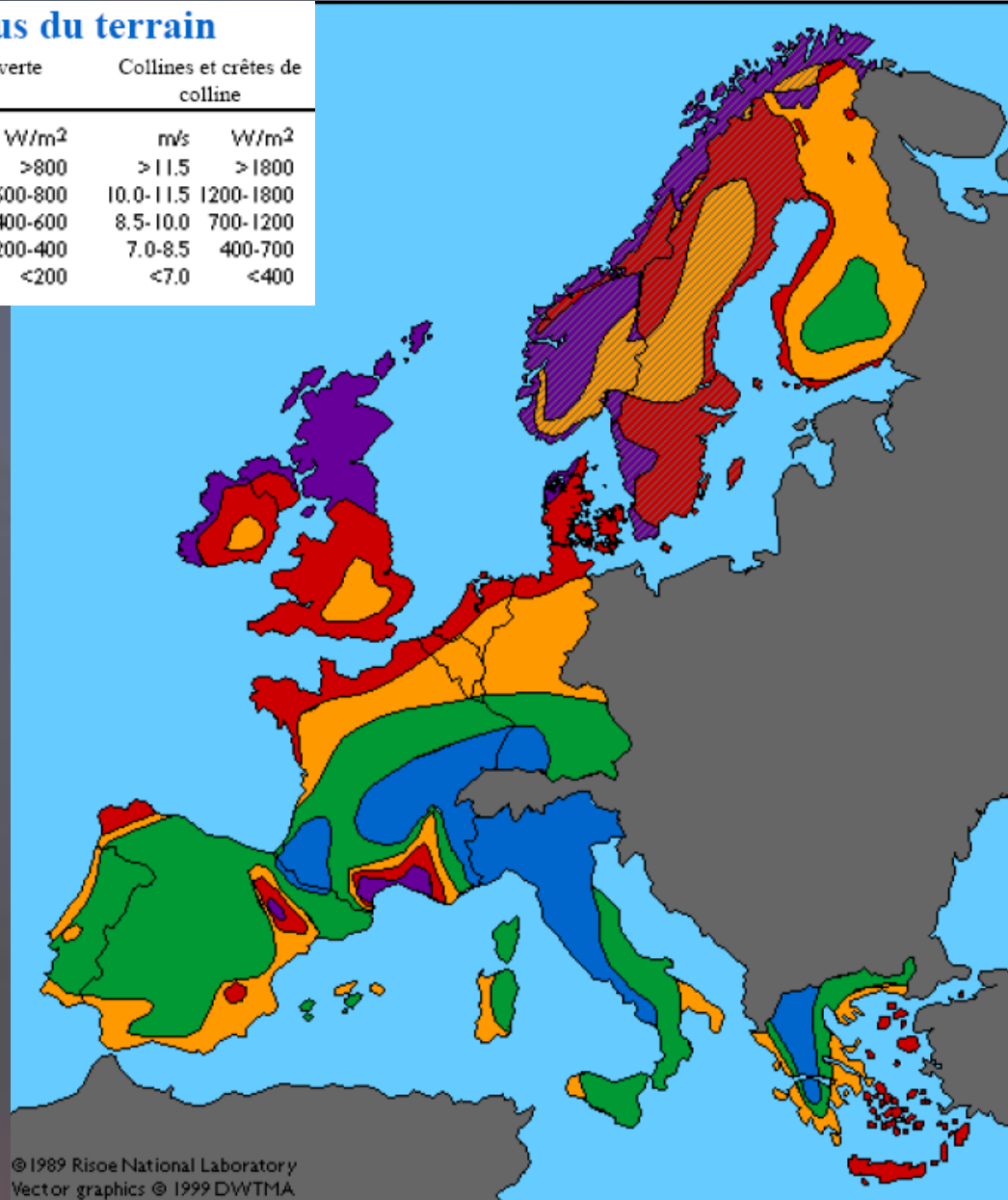
- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
 - **Vent et turbulence**
 - Matériaux et structures
 - Aérodynamique
 - Contrôle
 - Conversion électromécanique
 - Intégration au réseau électrique
 - Acceptation sociale et impacts environnementaux

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 ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
■	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
■	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
■	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
■	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
■	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400

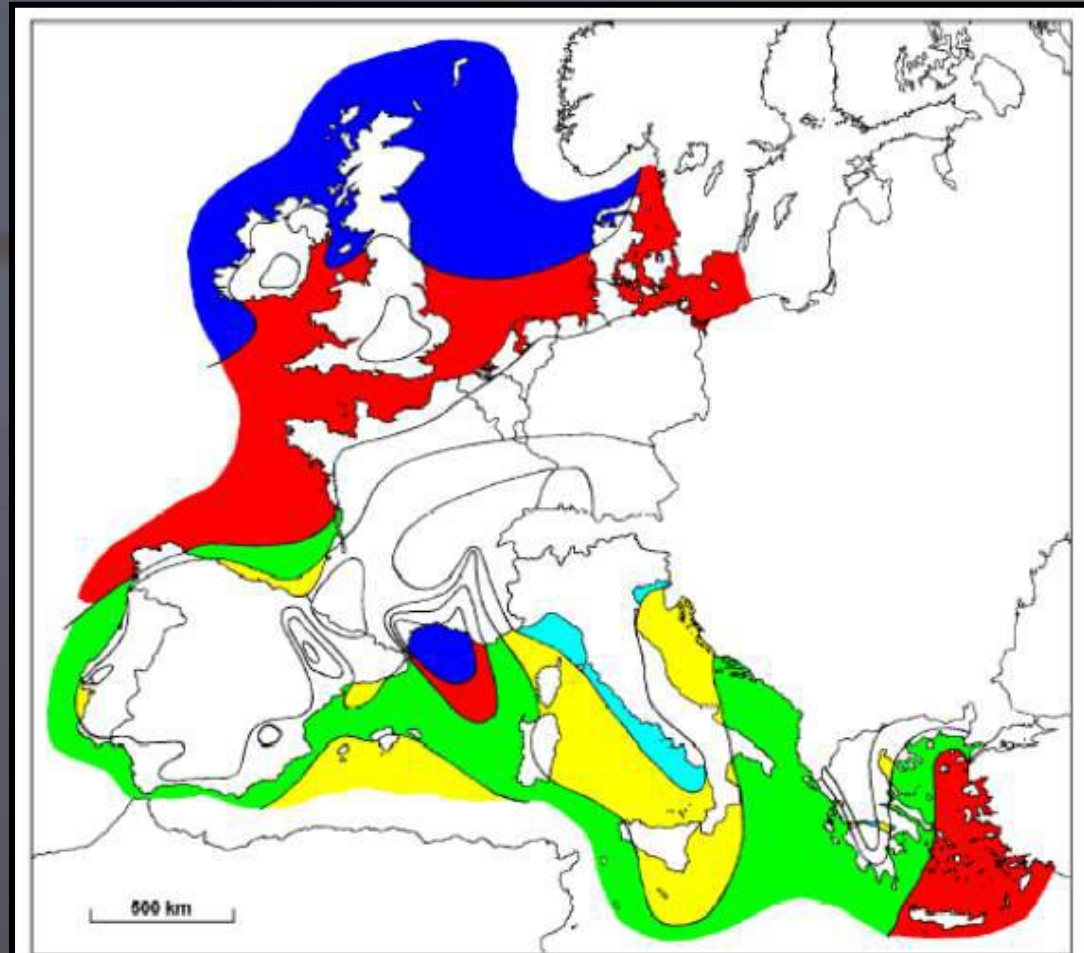
Atlas des vents
en Europe



Vent et turbulence

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

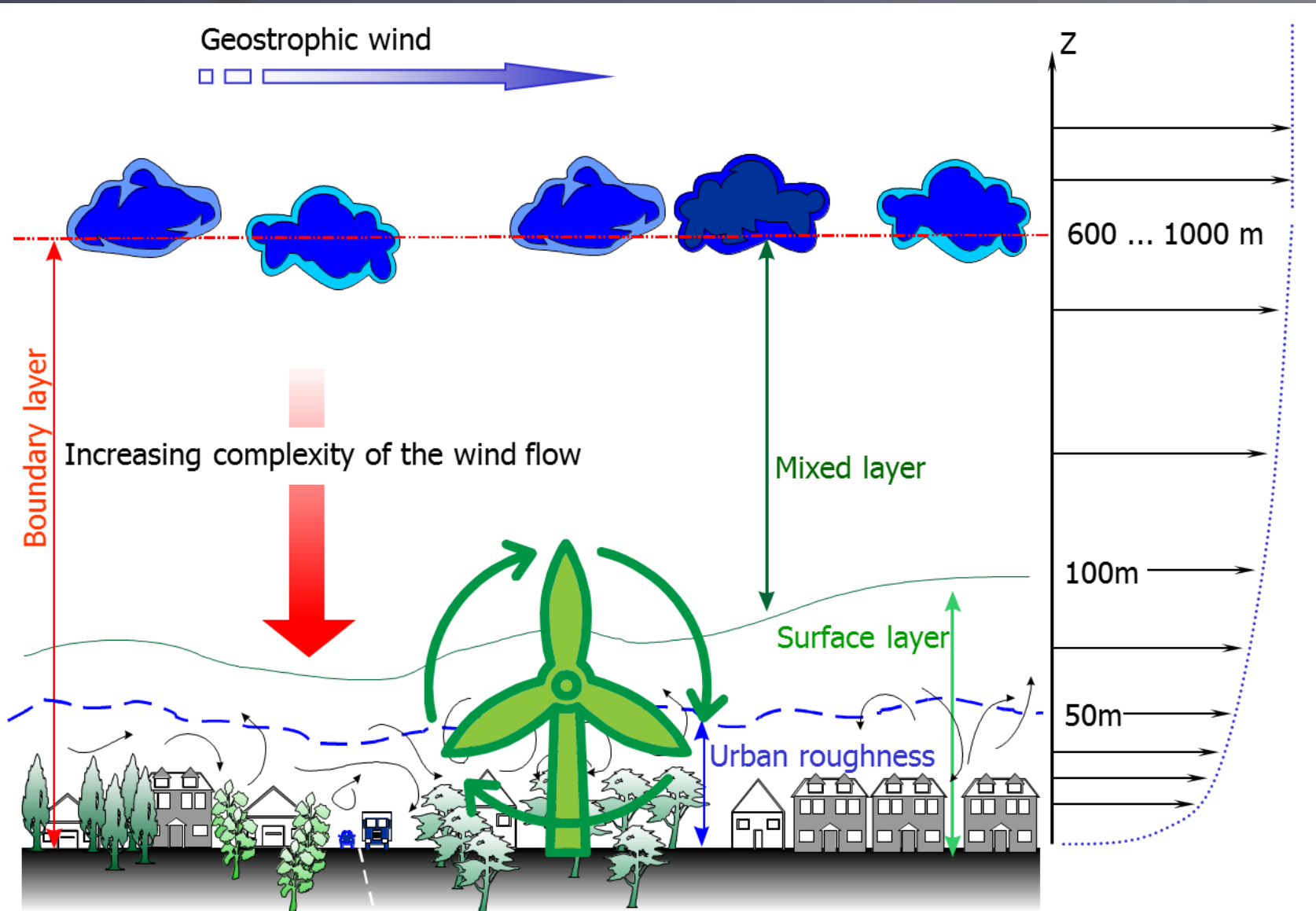
Atlas des vents en Europe



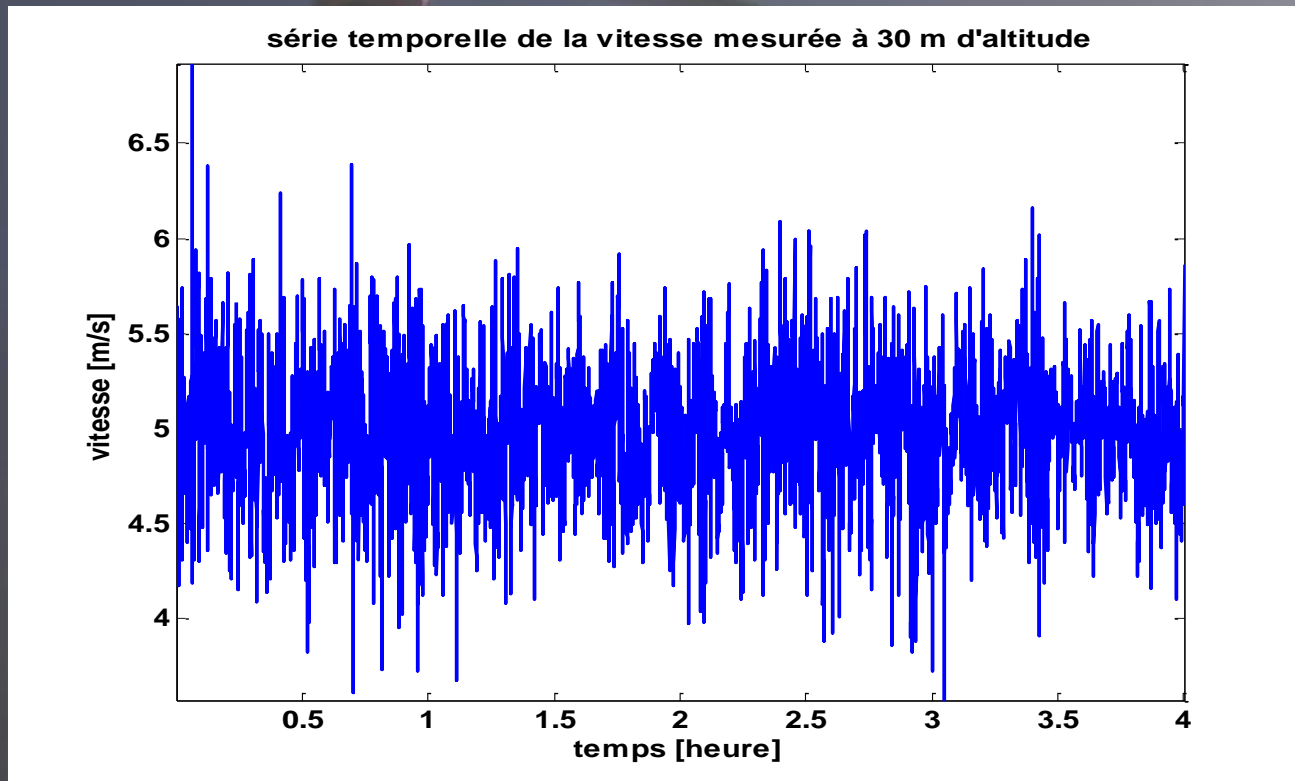
Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights

	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²	ms ⁻¹	Wm ⁻²
Blue	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
Red	7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100	9.5-11.0	900-1500
Green	6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5-8.5	450-650	8.0-9.5	600-900
Yellow	4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0-7.5	250-450	6.5-8.0	300-600
Cyan	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

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

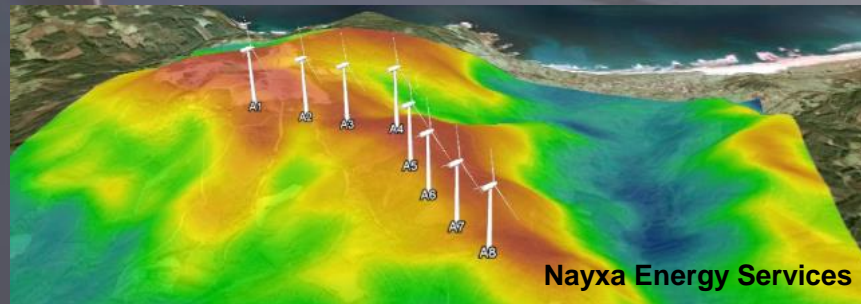


Installations offshore

- 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)



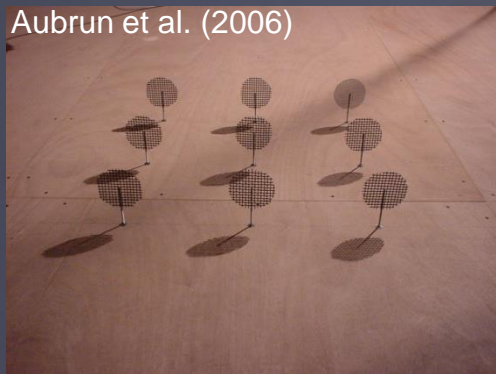
- Temporelles (de 10 secondes à 20 ans)
- Intermittence

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

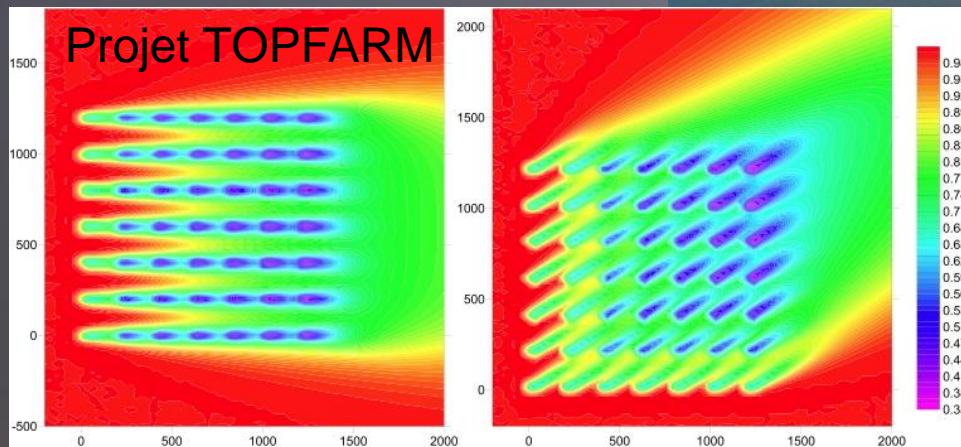
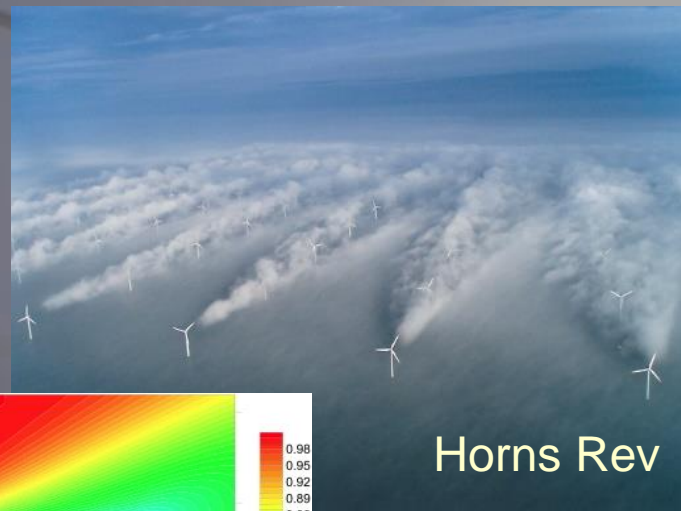
Interactions de sillages

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

Aubrun et al. (2006)



Corten et al. (2004)



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)

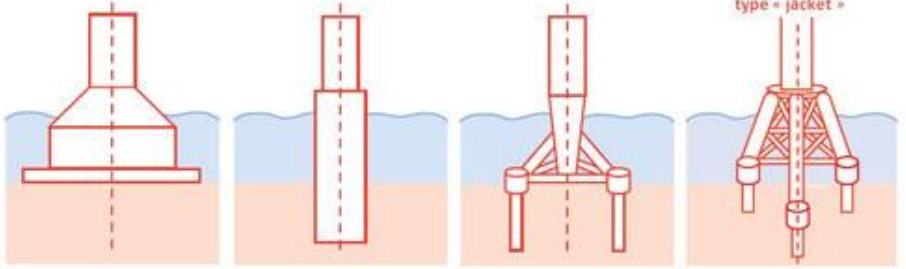


Fondation gravitaire

Fondation monopieu

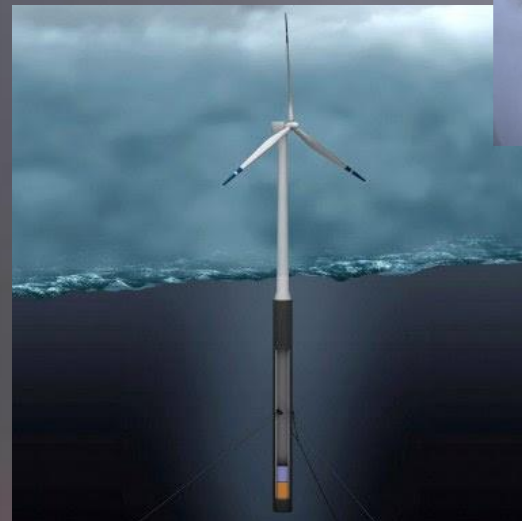
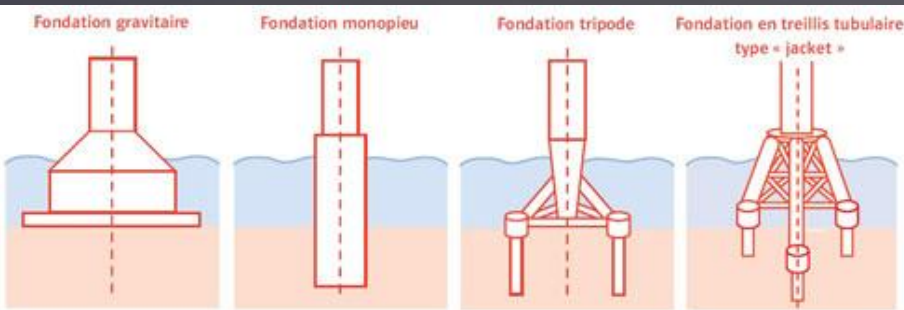
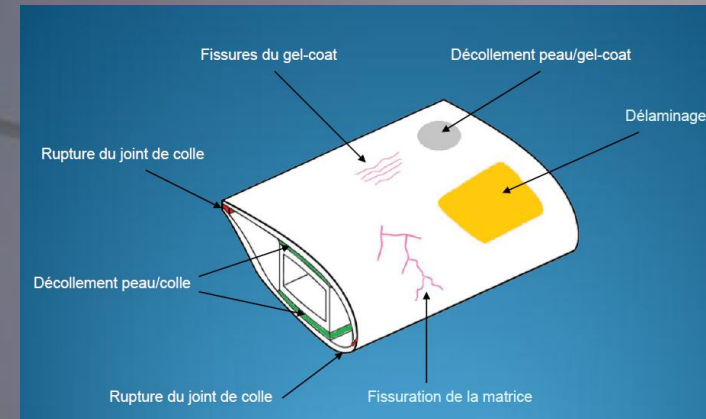
Fondation tripode

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

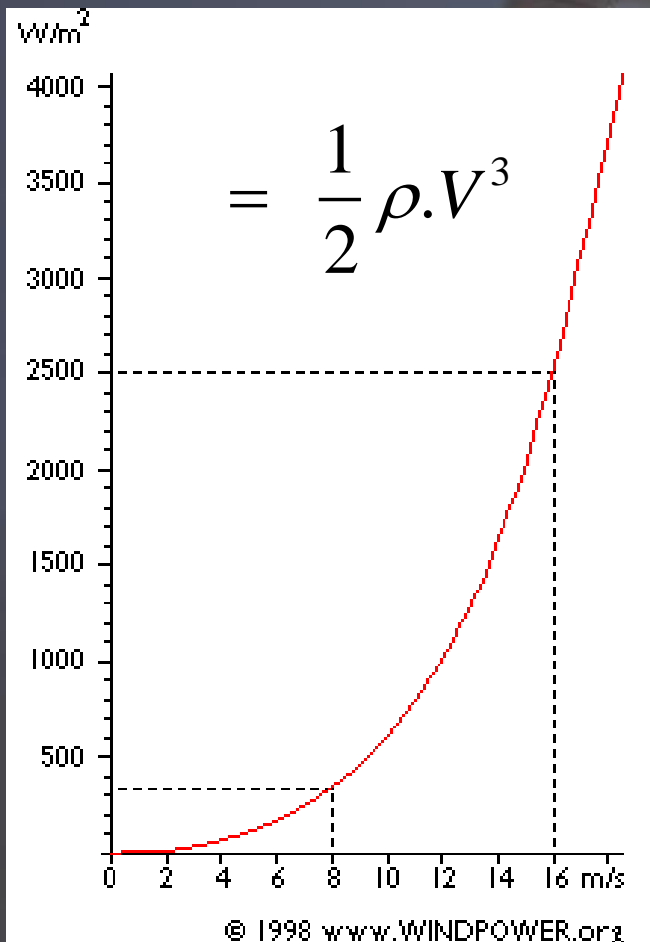


Programme

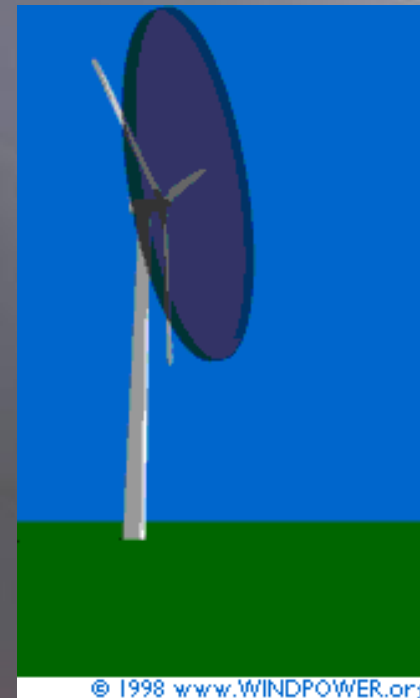
- Quelques chiffres...
- Comment ça marche?
- **Les grands défis**
 - Vent et turbulence
 - Matériaux et structures
 - **Aérodynamique**
 - Contrôle
 - Conversion électromécanique
 - Intégration au réseau électrique
 - Acceptation sociale et impacts environnementaux

Le fonctionnement

La puissance du vent



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



Le fonctionnement

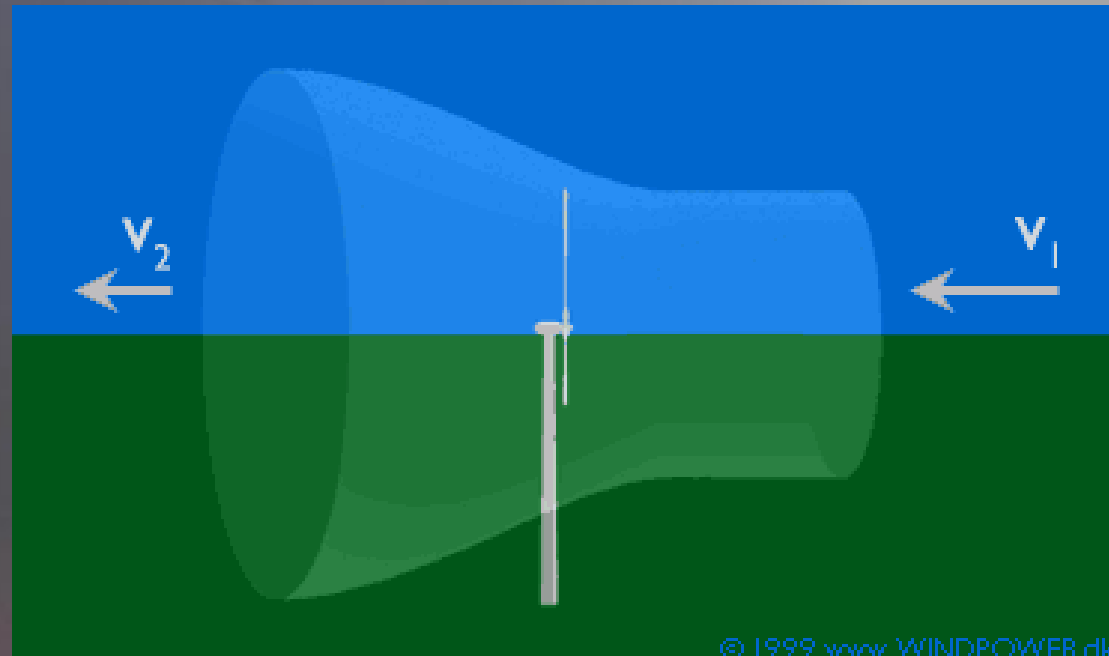
Extraction d'énergie cinétique de l'écoulement

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

⇒ distorsion des lignes de courant

⇒ Puissance extraite

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



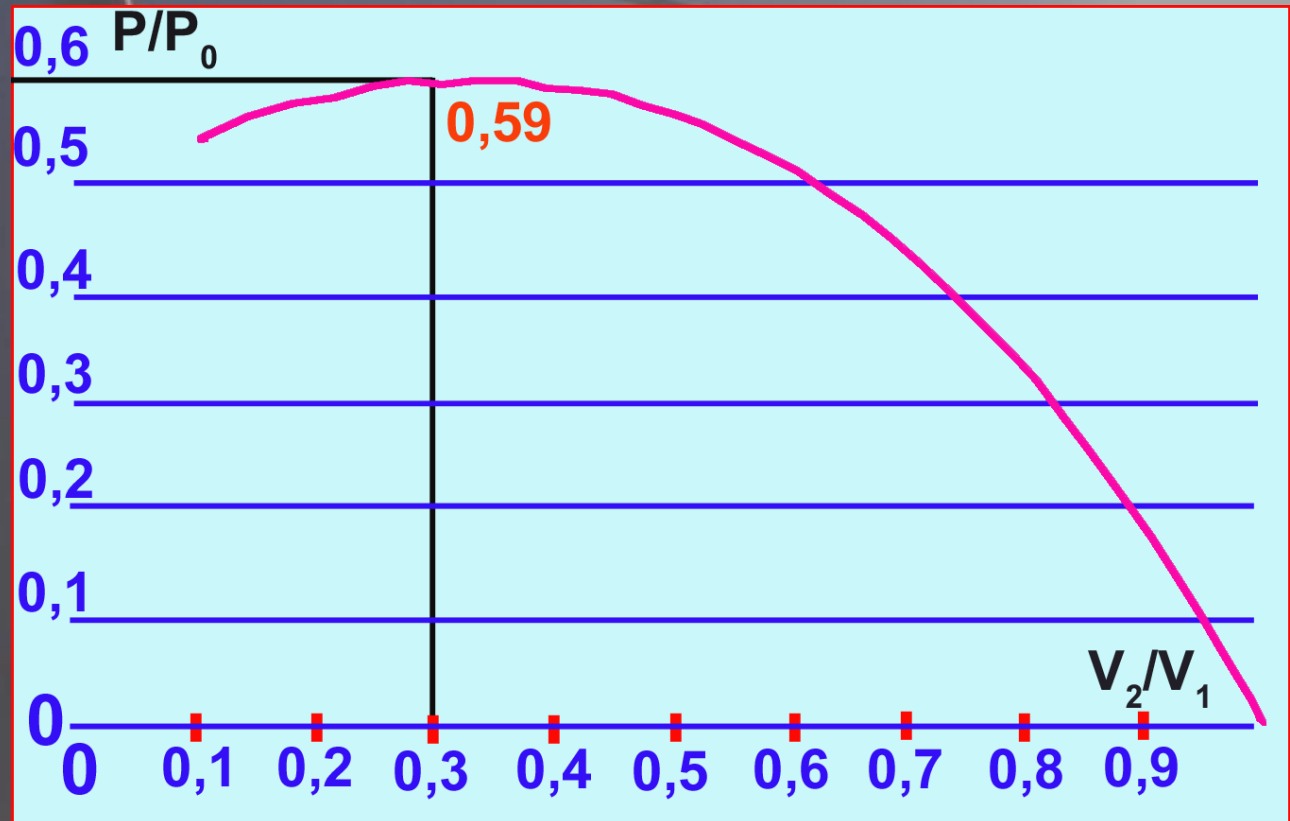
La loi de Betz (1919)

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

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

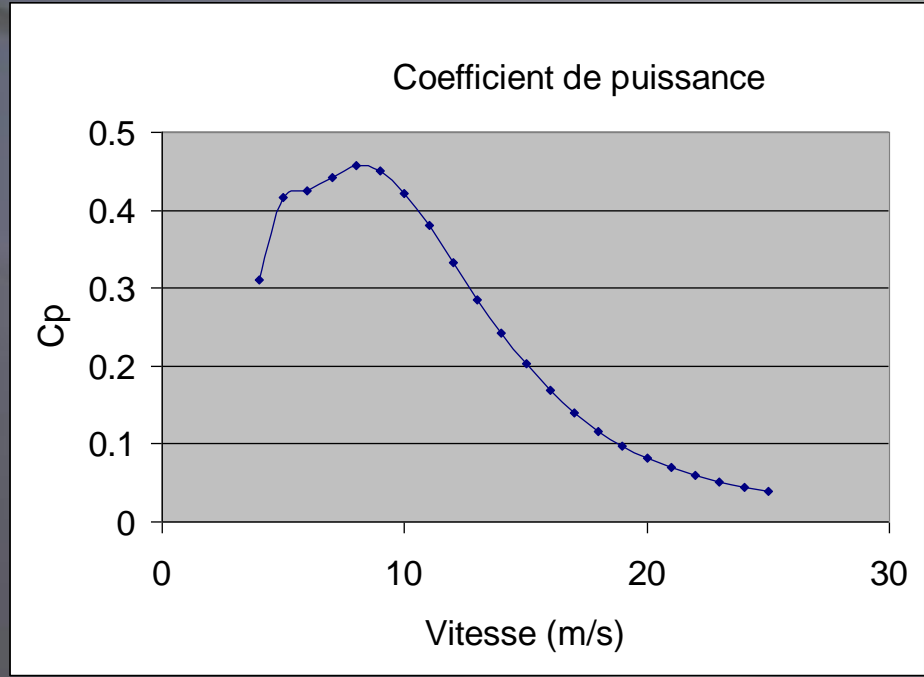
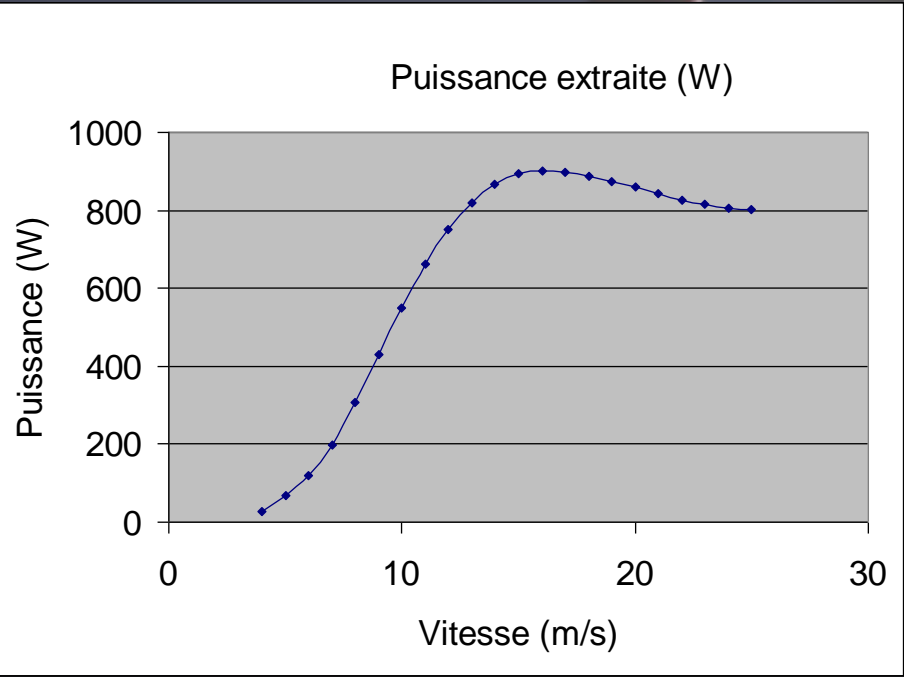
$$\frac{dC_P}{da} = 0 \text{ pour } a = \frac{1}{3}$$

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



Puissance extraite

Coefficient de puissance
= Puissance extraite/
Puissance du vent

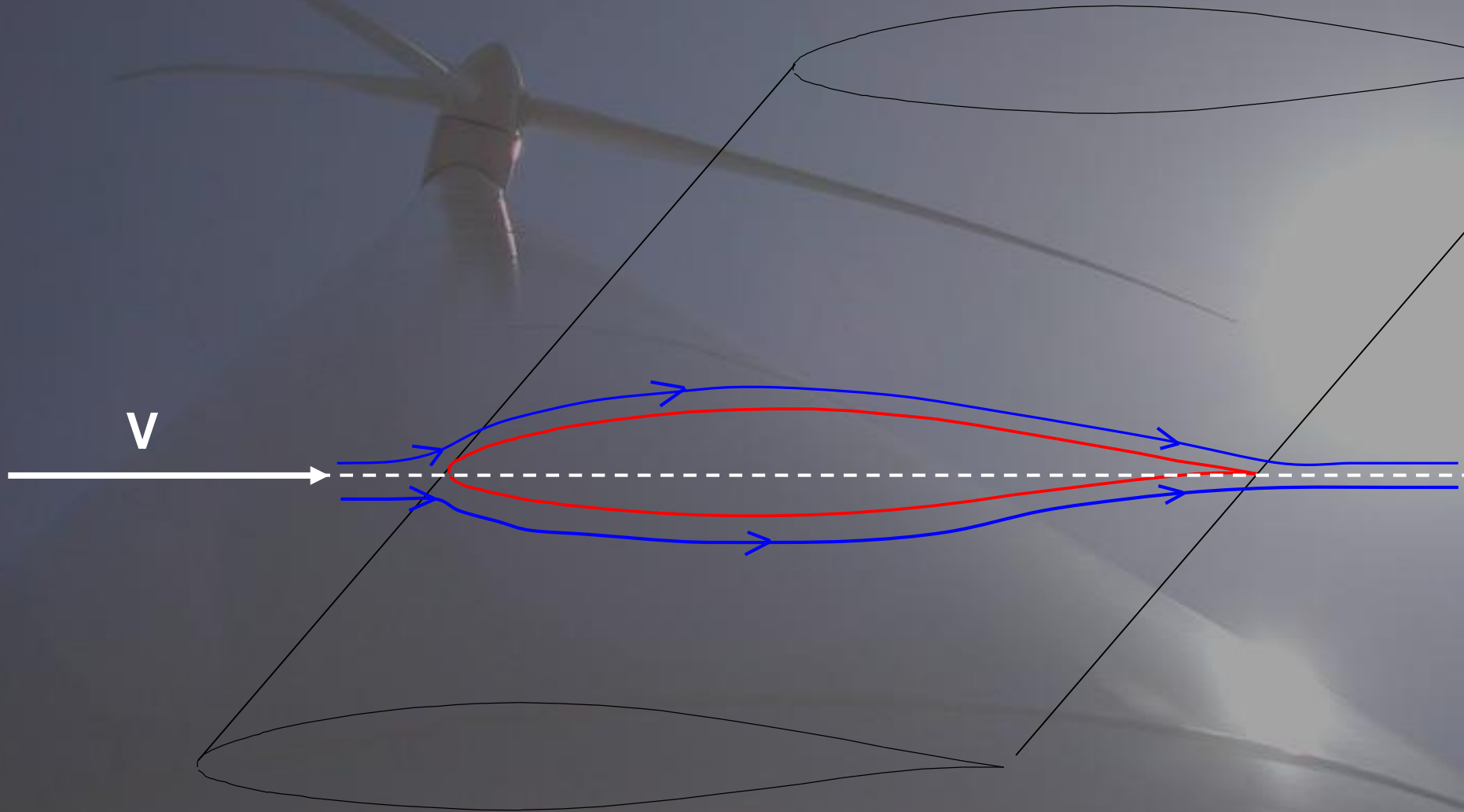


Exemple de l'éolienne Neg Micon NM52/900

Aérodynamique de pales

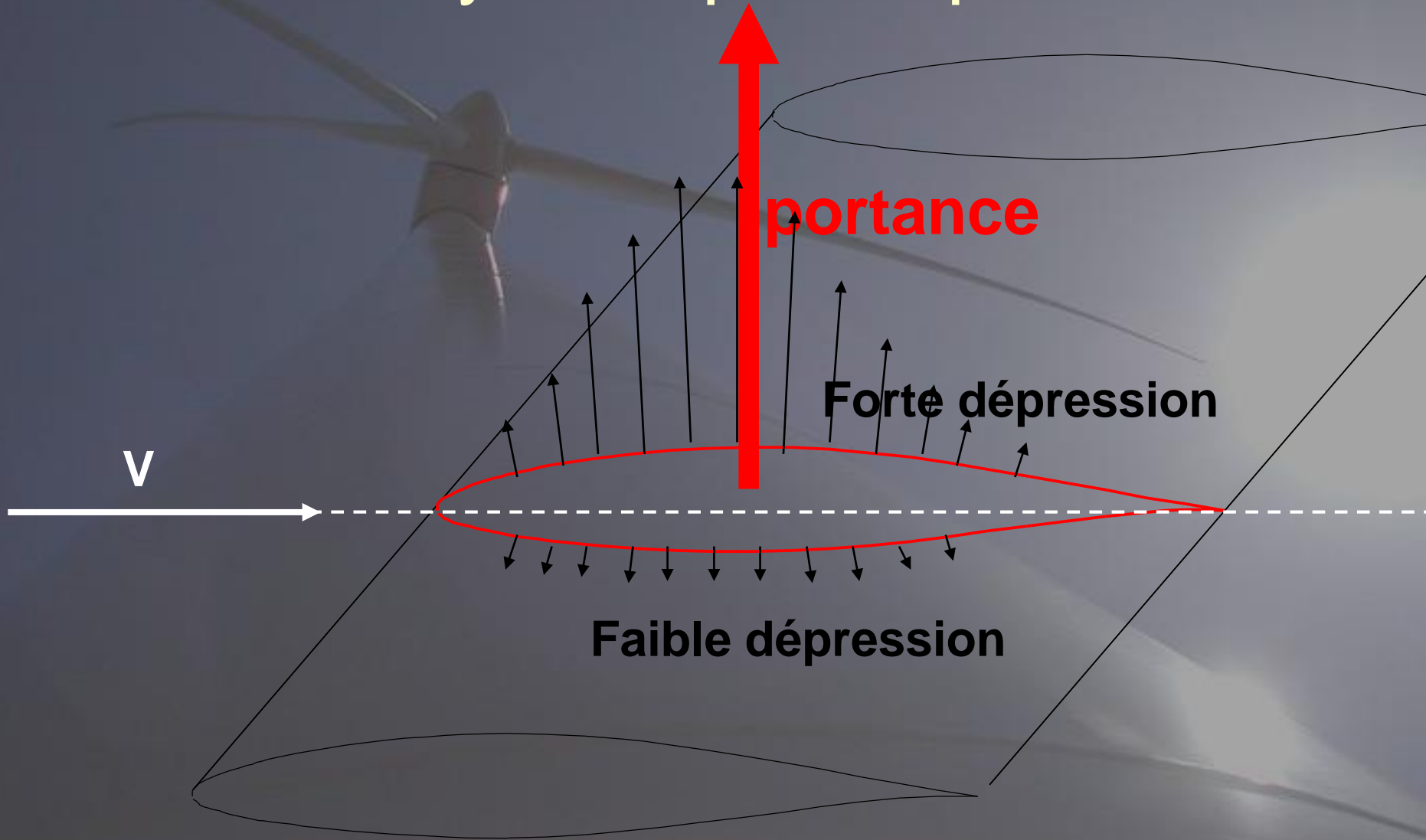


Aérodynamique de pales



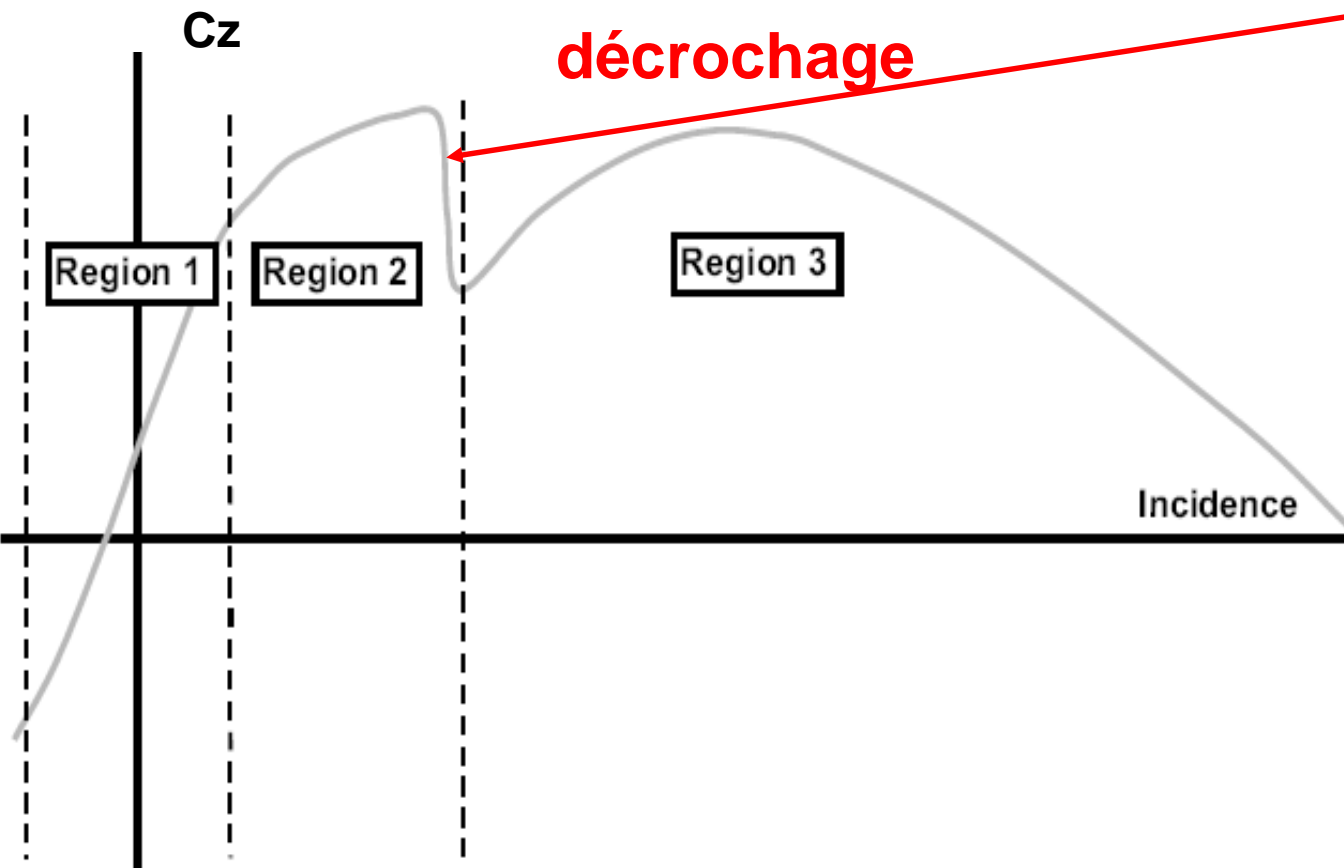
Bernoulli : le long d'une ligne de courant, si la vitesse augmente, la pression diminue

Aérodynamique de pales

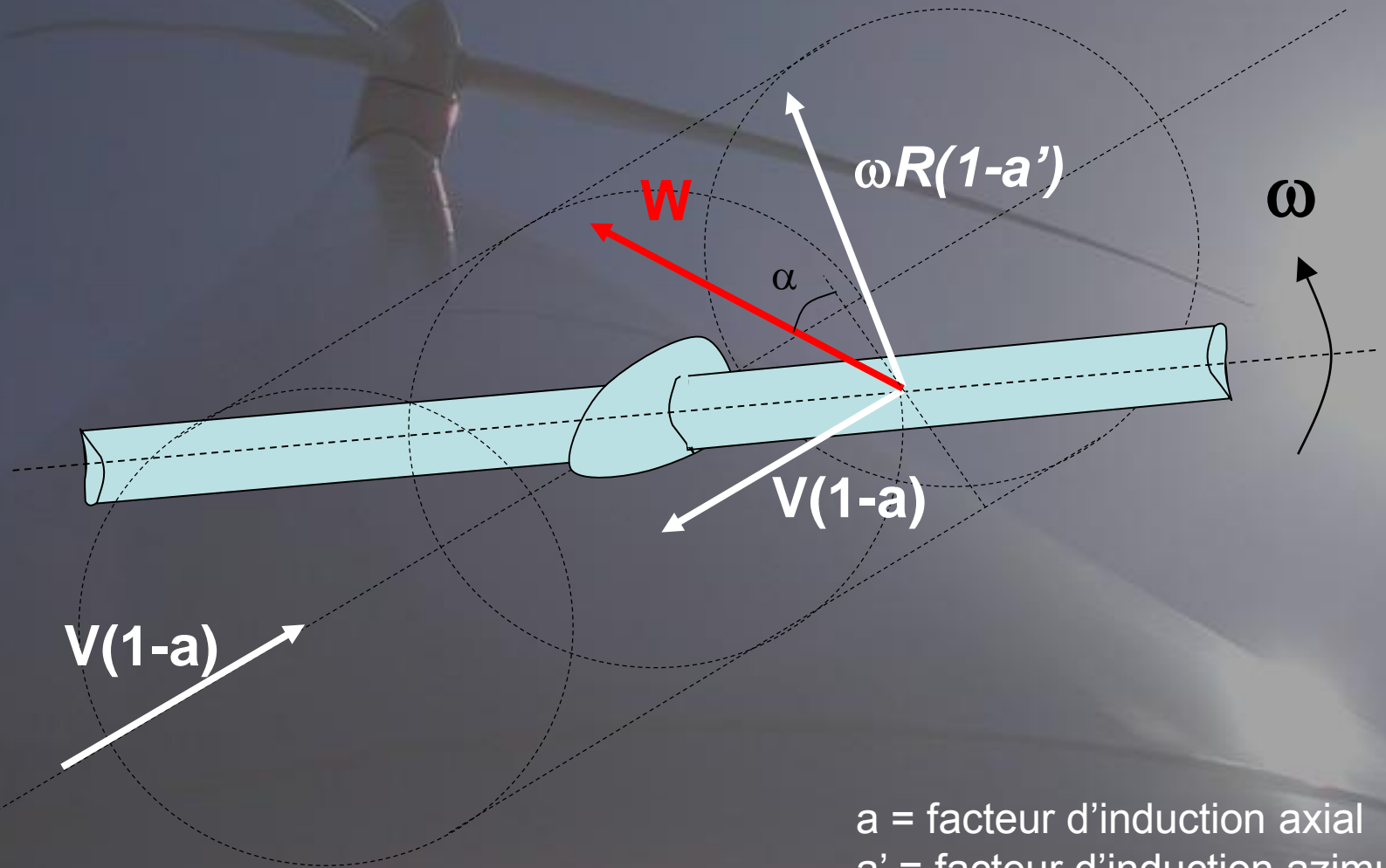


Bernoulli : le long d'une ligne de courant, si la vitesse augmente, la pression diminue

La portance

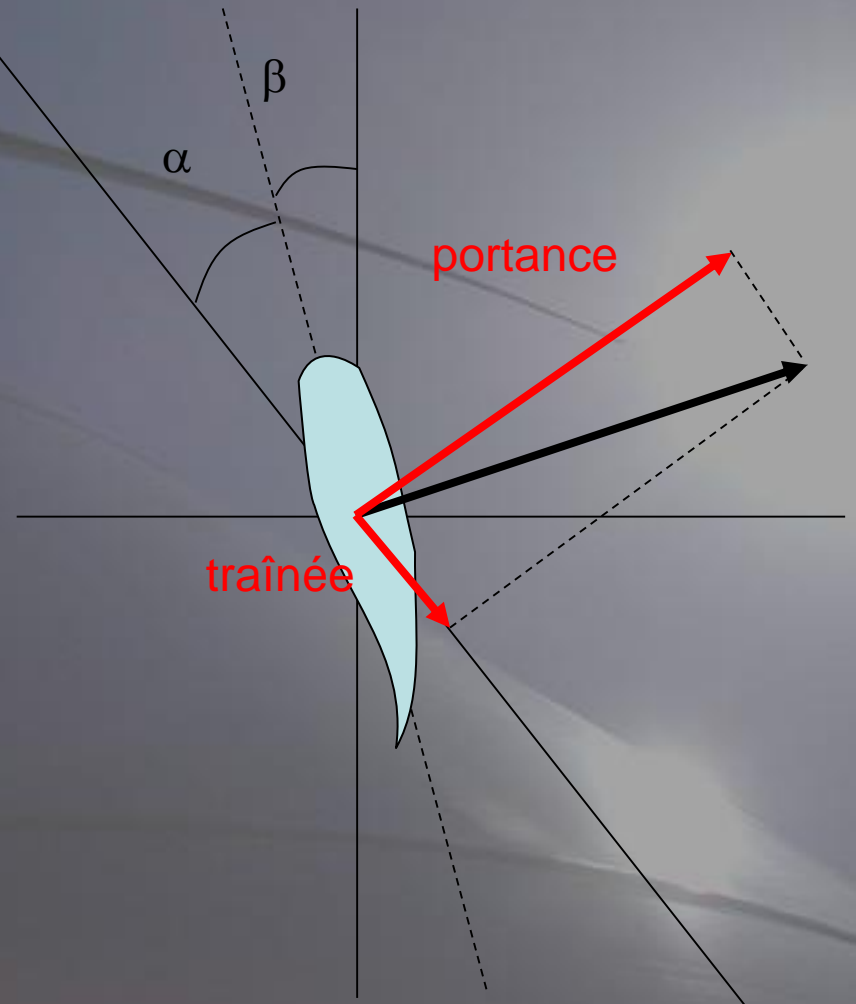
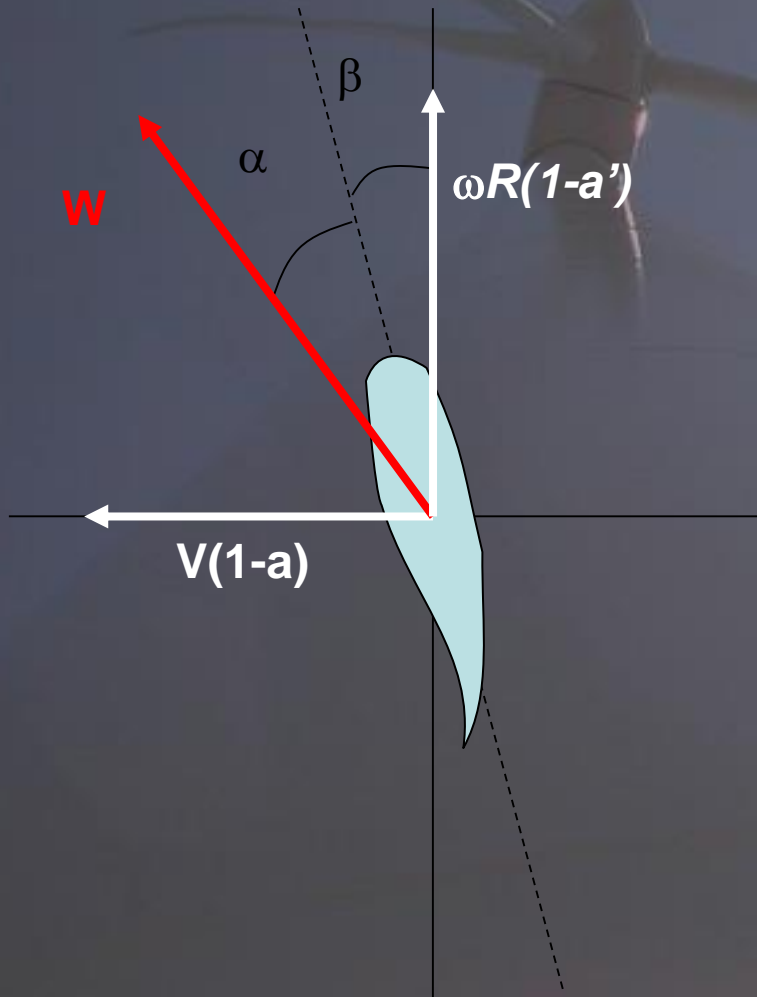


Aérodynamique des pales en rotation

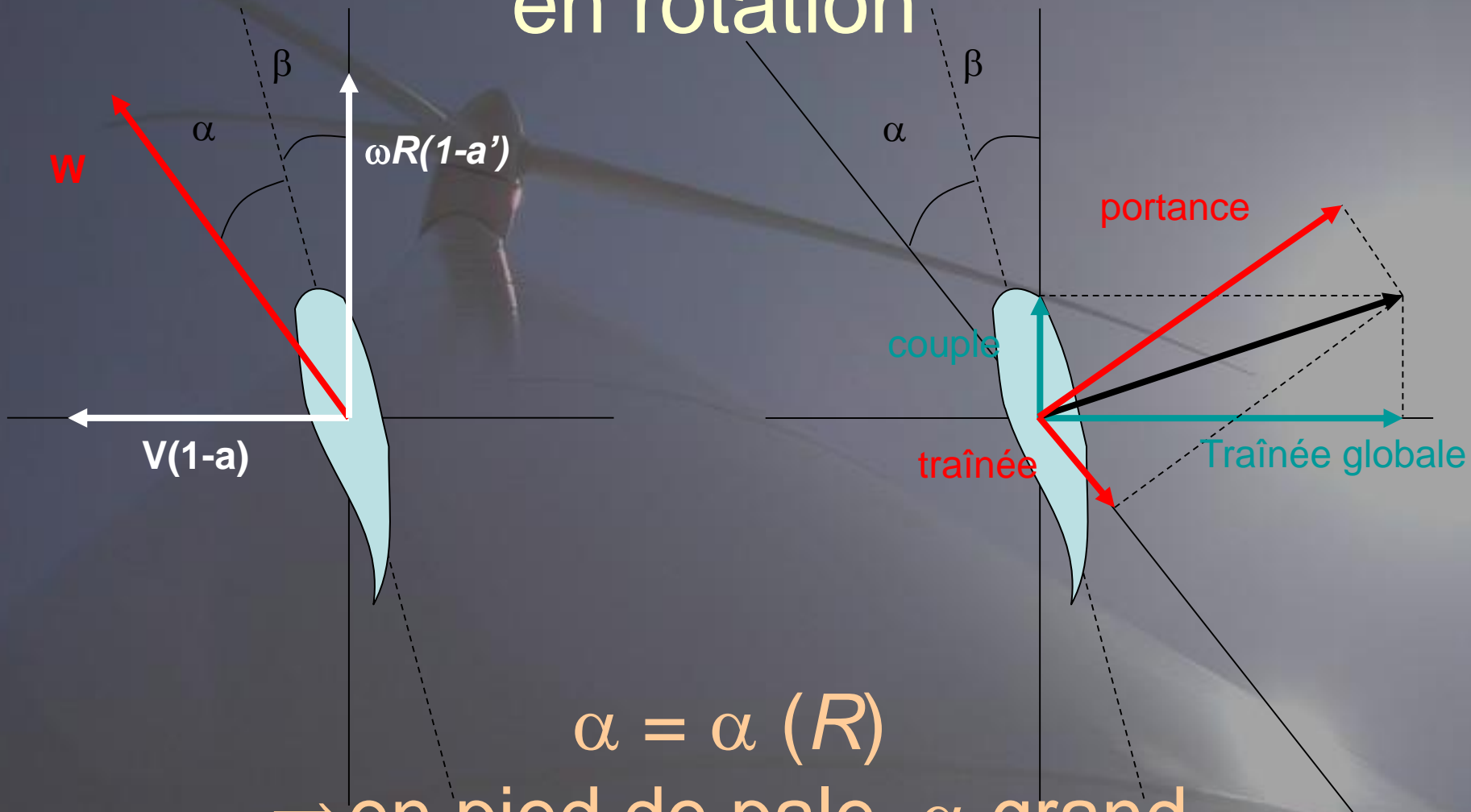


a = facteur d'induction axial
 a' = facteur d'induction azimuthal

Aérodynamique des pales en rotation



Aérodynamique des pales en rotation



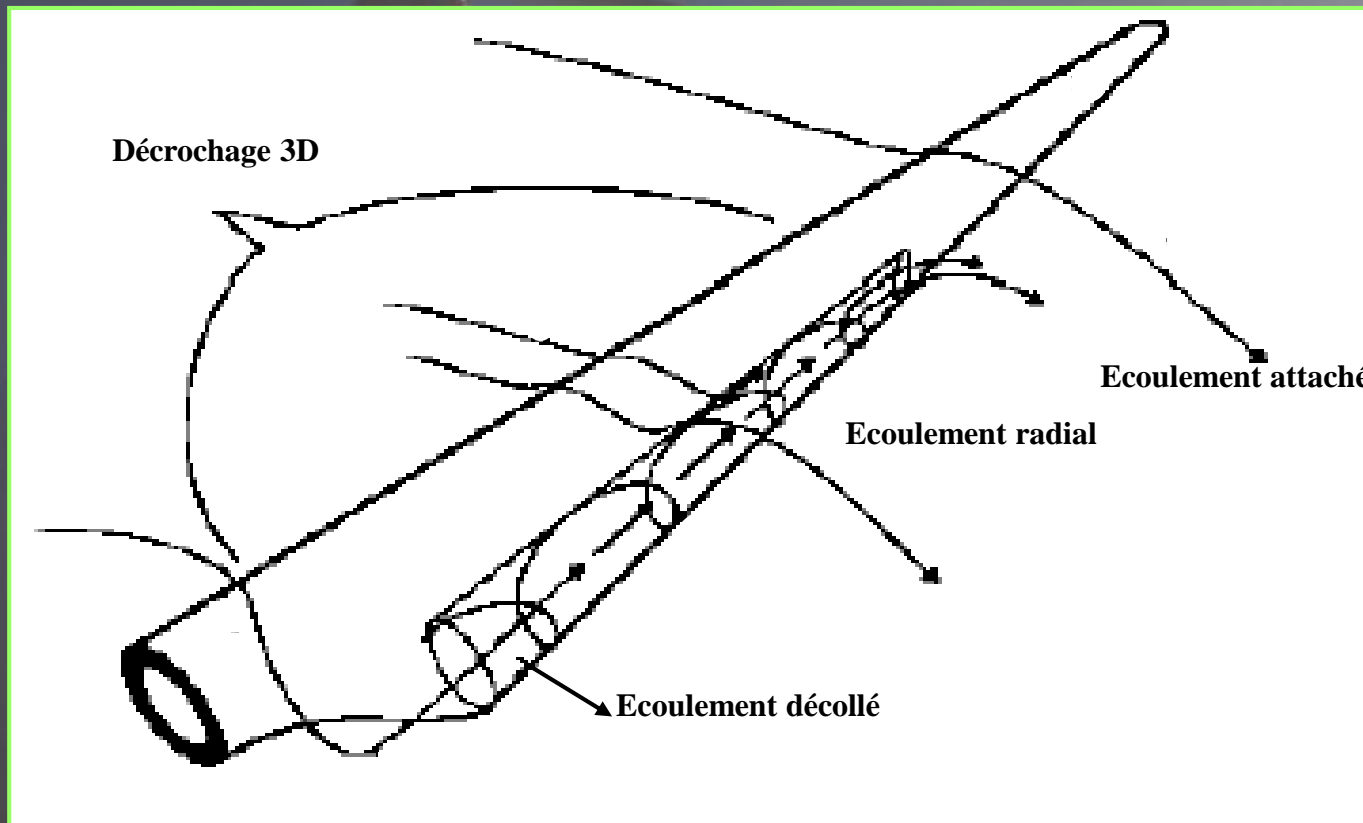
$$\alpha = \alpha (R)$$

⇒ en pied de pale, α grand

⇒ En bout de pale, α petit

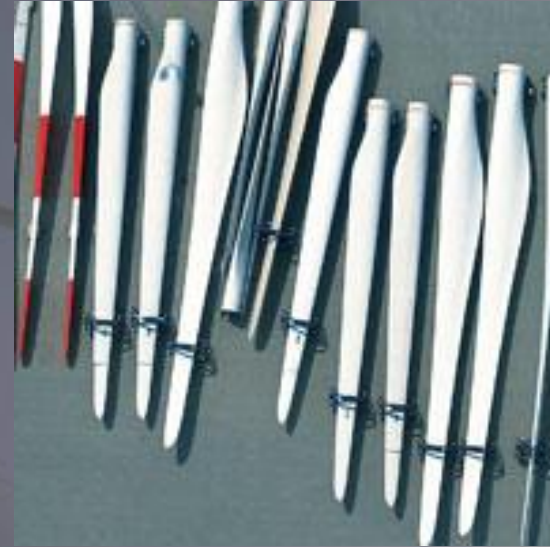
Aérodynamique des pales en rotation

La corde des pales n'est pas constante



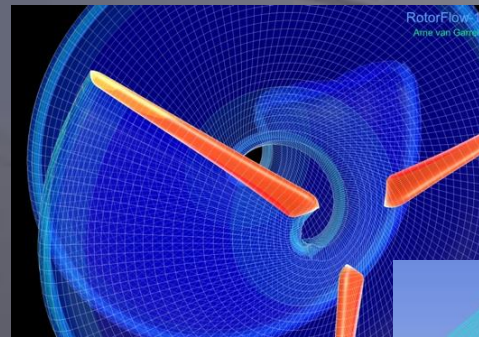
Aérodynamique des pales

La corde des pales n'est pas constante

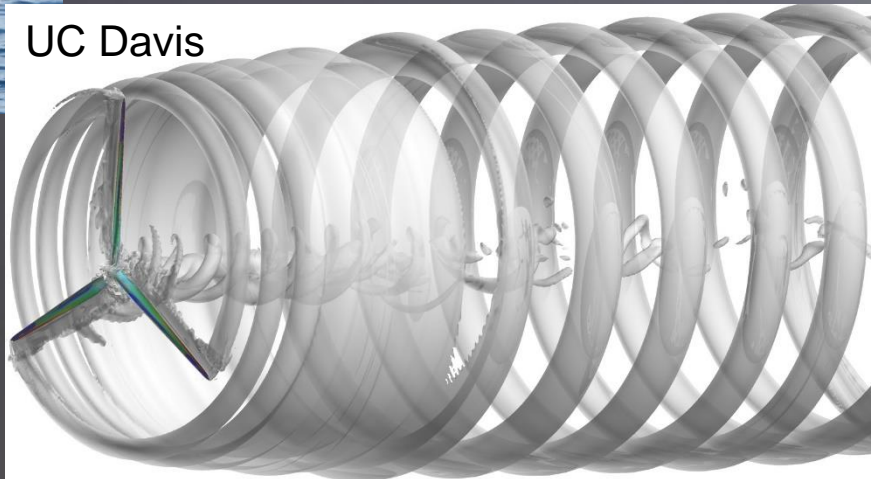


Aérodynamique

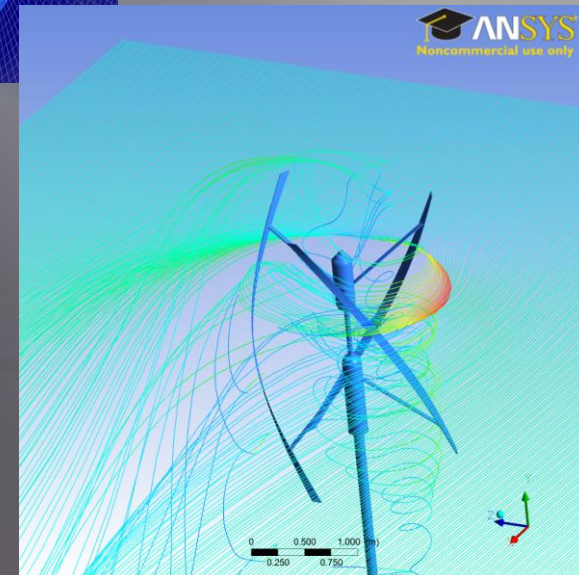
- Amélioration de la production globale
- Réduction des efforts aérodynamiques
- Réduction du bruit
- Concepts innovants



UC Davis



AskNature



EOLIENNES MARINES FLOTTANTES : VAWTs are Back !



Spinfloat



Nova



Deepwind

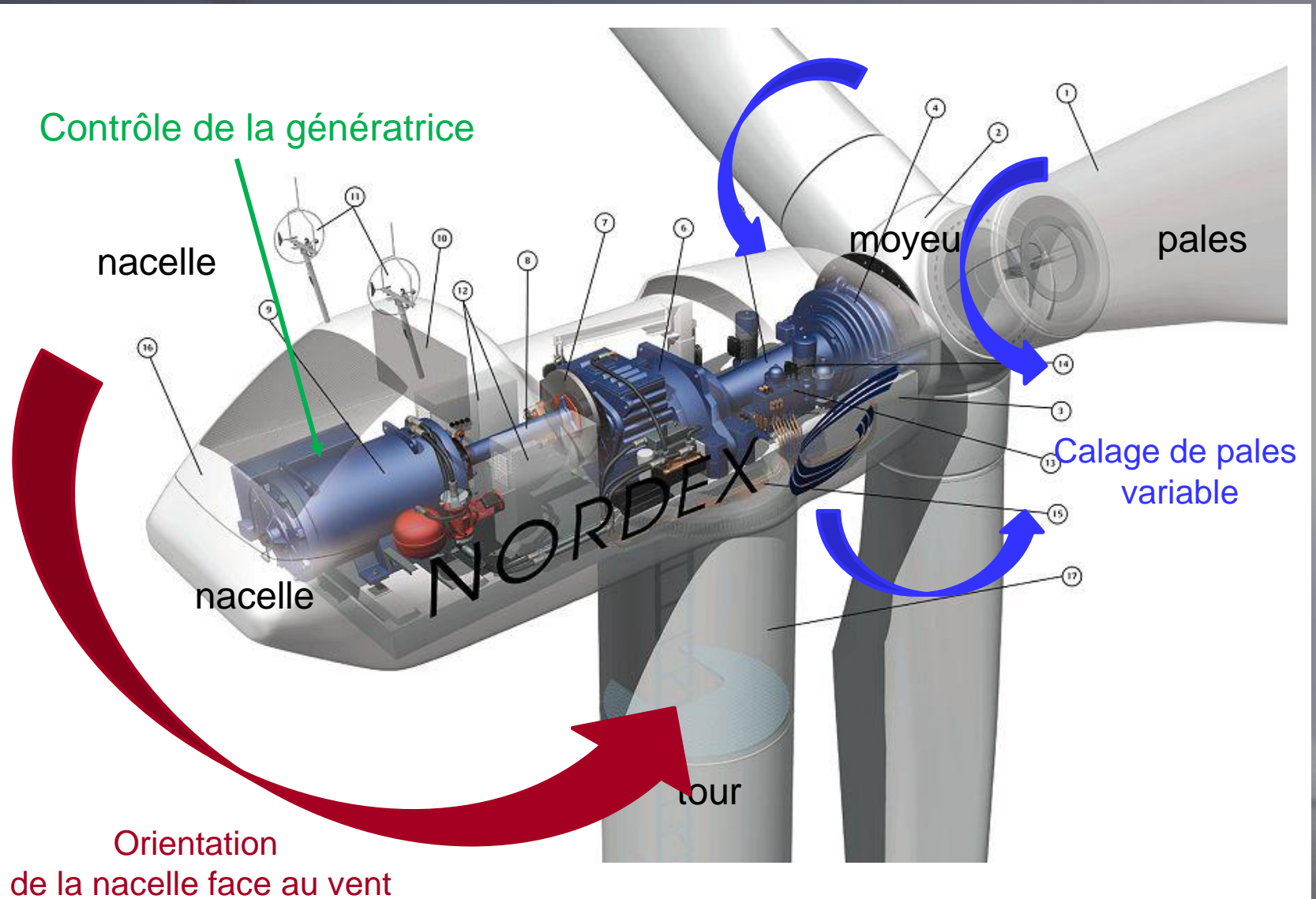


Twin Flow

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, α 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

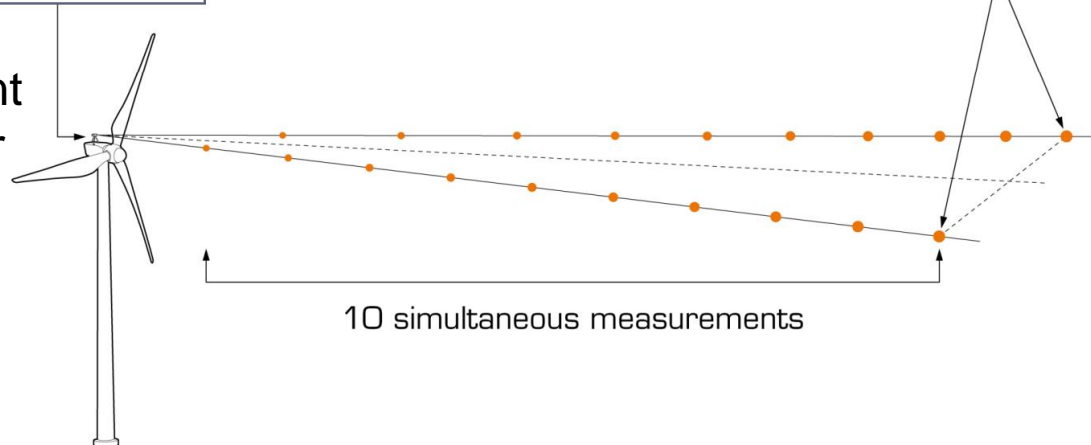
Du contrôle de réaction au contrôle d'anticipation



Nacelle-mounted Lidar



Mesure anticipée du vent qui va impacter le rotor

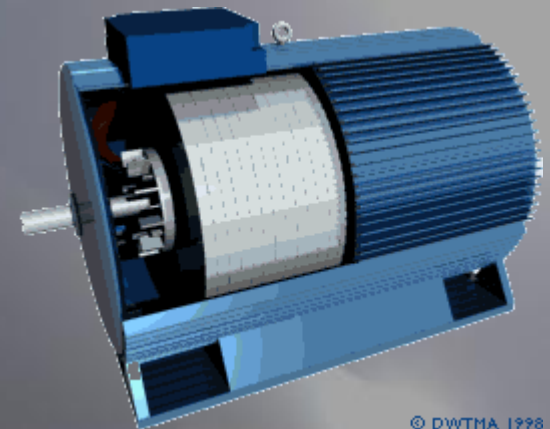


Programme

- 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

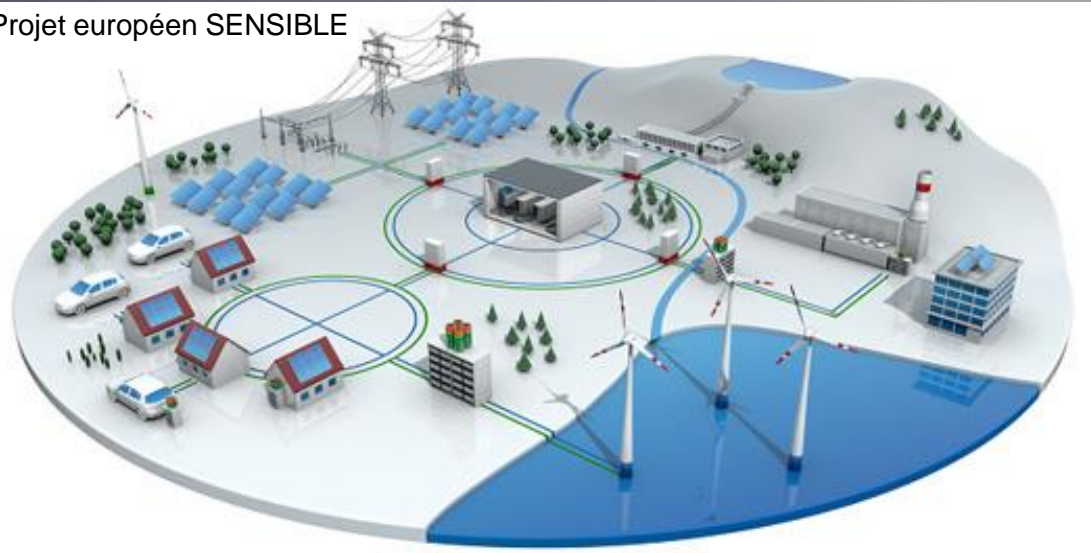
Programme

- 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)

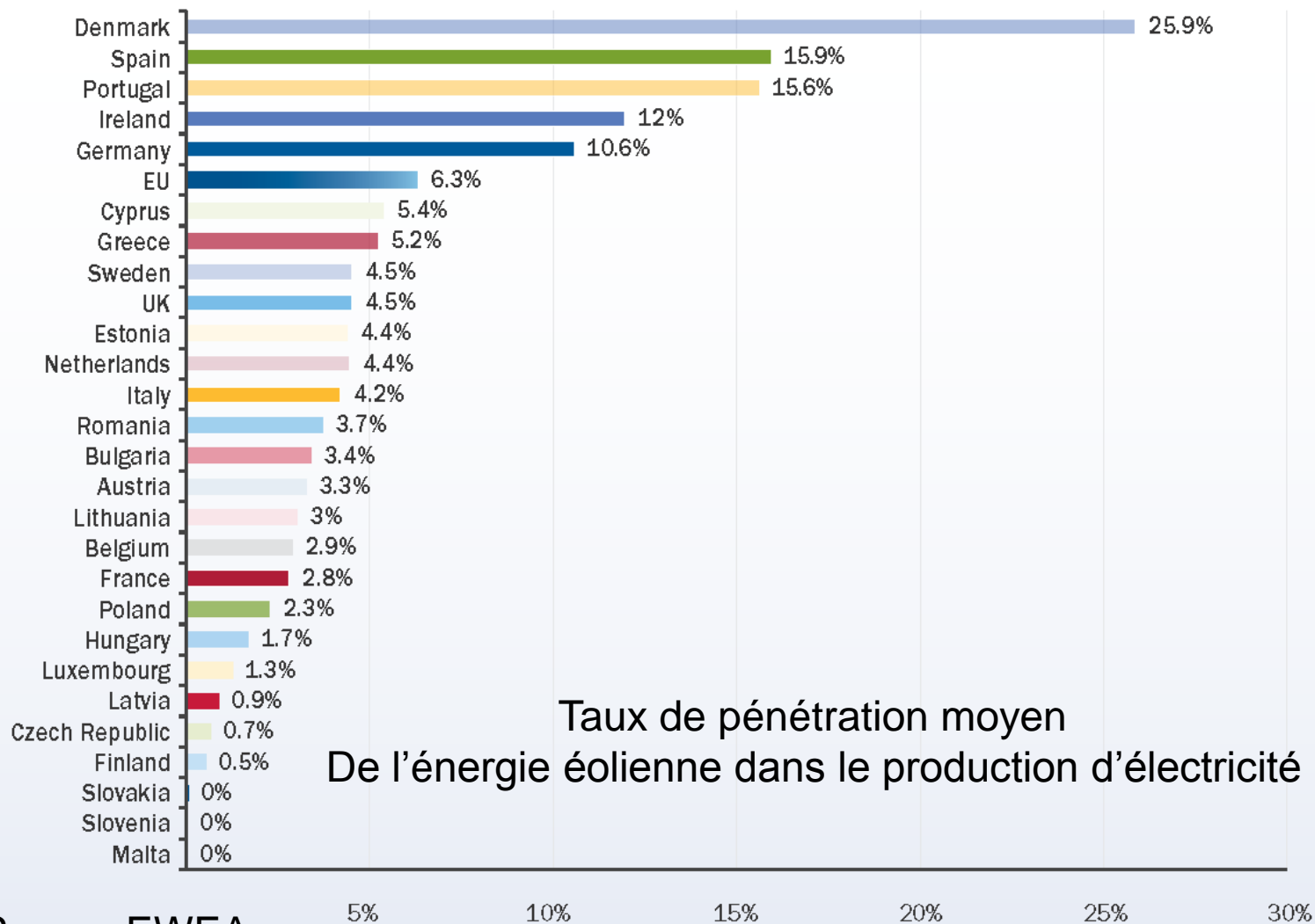
Projet européen SENSIBLE



Intégration au réseau

WIND SHARE OF TOTAL ELECTRICITY CONSUMPTION

FIGURE 3.6



Taux de pénétration moyen
De l'énergie éolienne dans le production d'électricité

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

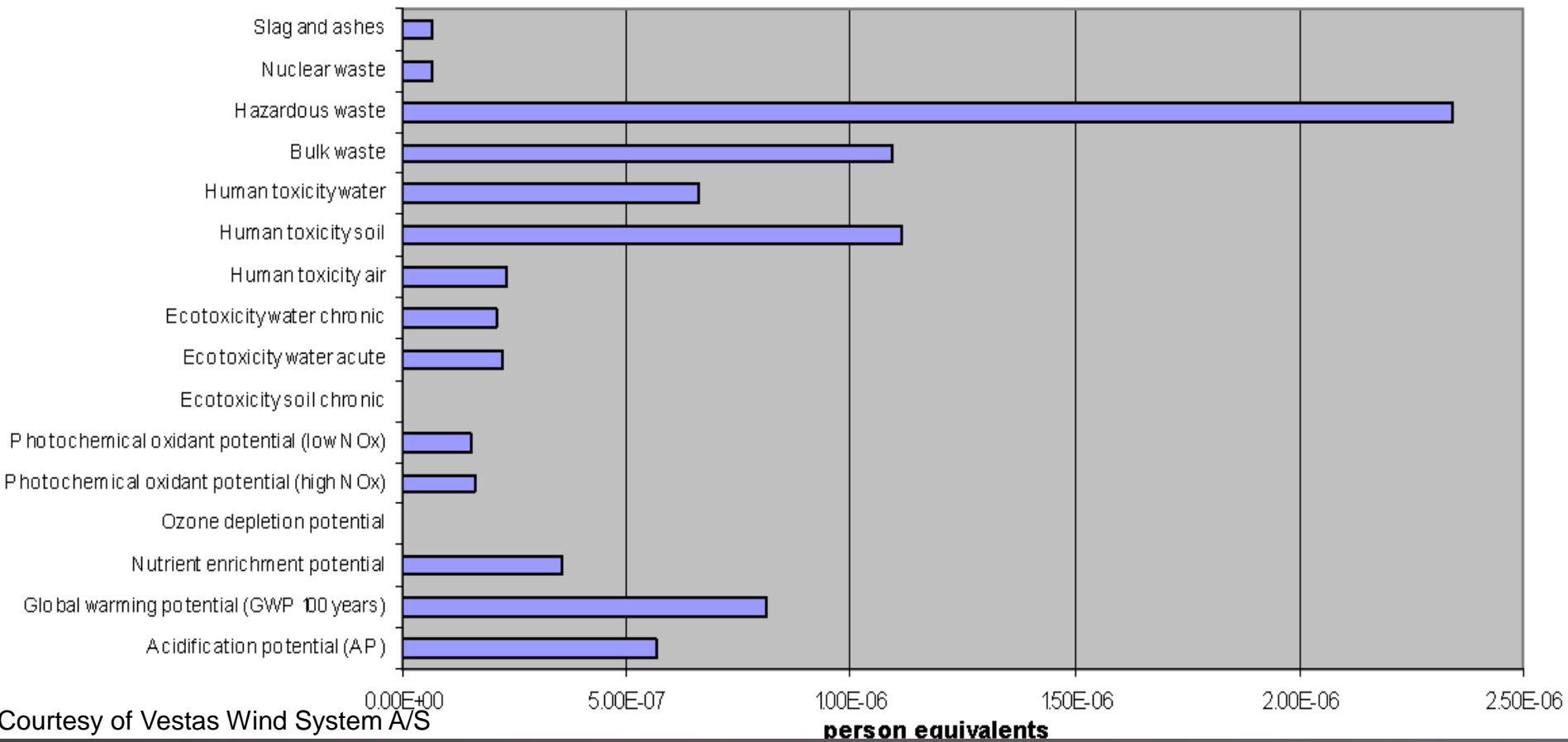
- Clauses de démantèlement
- Pales non recyclables (matériaux composites)
- Analyse du Cycle de Vie (ACV)

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

Analyse du cycle de vie

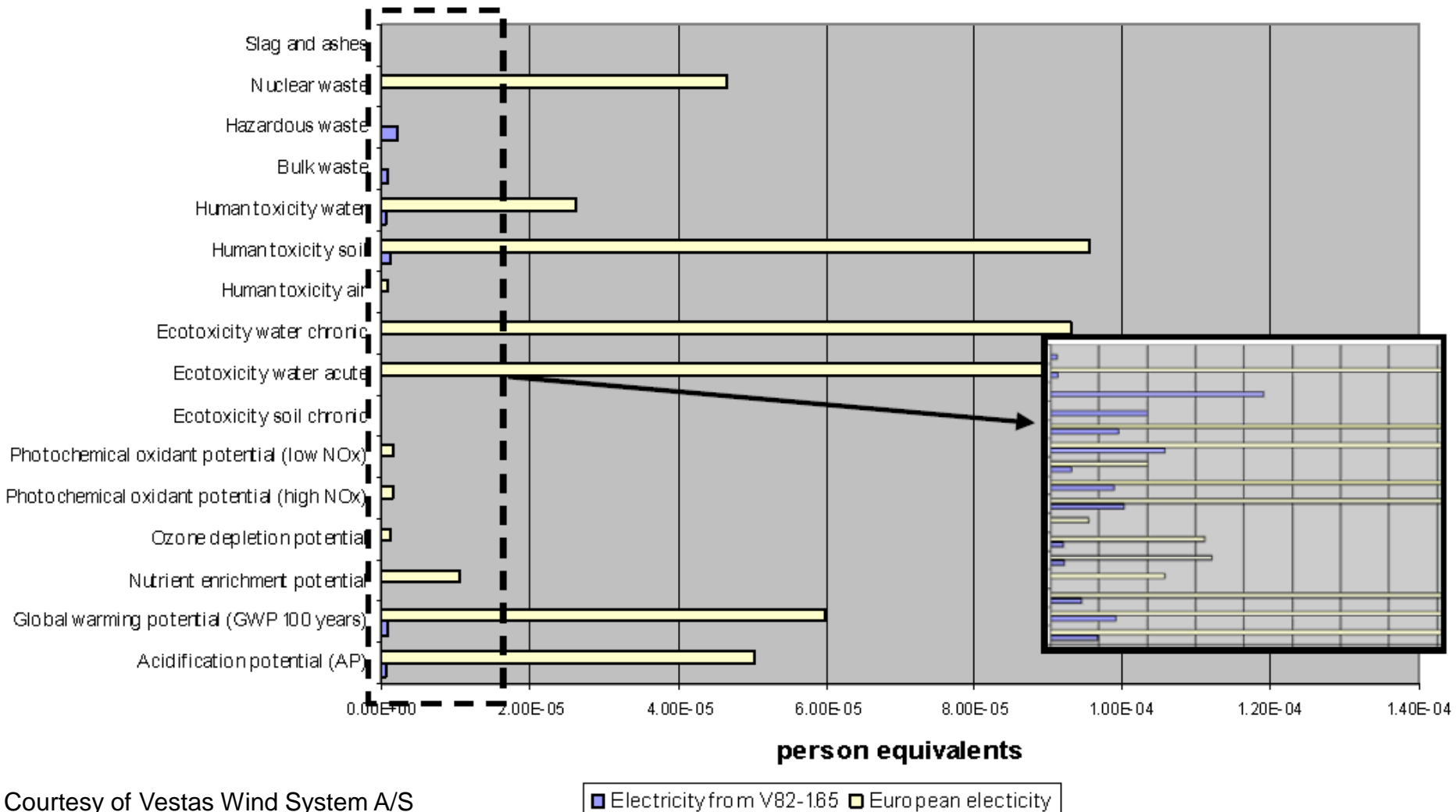
Exemple : éolienne Vestas V82-1.65MW

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 (ADEME)
- www.windpower.org (association danoise)
- www.meteo.fr (Meteofrance)
- www.eole.org
- www.suivi-eolien.com

■ Livres

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