

**ELEC2670**

# **L'énergie éolienne**

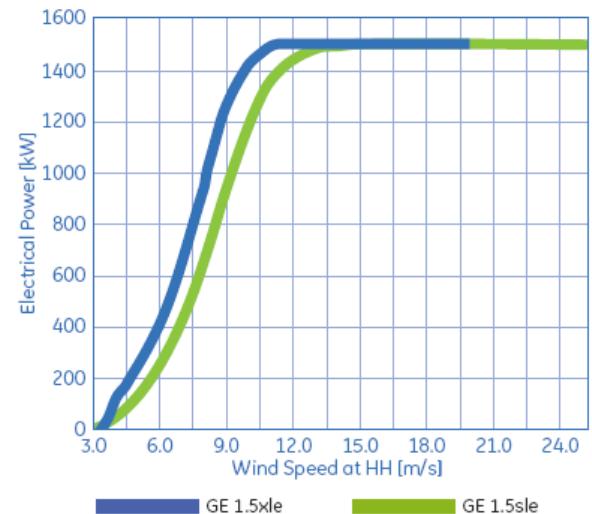
H. Jeanmart

herve.jeanmart@uclouvain.be

Année académique 2011-2012



Power curve



# Sujets abordés

Caractérisation du vent

Potentiel éolien et production

Caractérisation globale des éoliennes

Différents types d ‘éoliennes

Calcul de l’énergie produite annuellement

Aérodynamique des pales

Gestion aérodynamique de l’éolienne

Gestion électrique de l’éolienne

# A l'origine de l'énergie éolienne, la puissance du vent

$$P = \rho A U \frac{U^2}{2} = \frac{1}{2} \rho A U^3$$

— —  
Débit      Energie cinétique

La vitesse du vent est une grandeur influencée par de nombreux éléments:

- | La localisation globale (continent, pays, région)
- | La topographie locale (vallée, colline, forêt, etc. )
- | Les variations saisonnières
- | Les variations induites par la turbulence

# Evolution de la puissance avec la vitesse, importance du cube de la vitesse

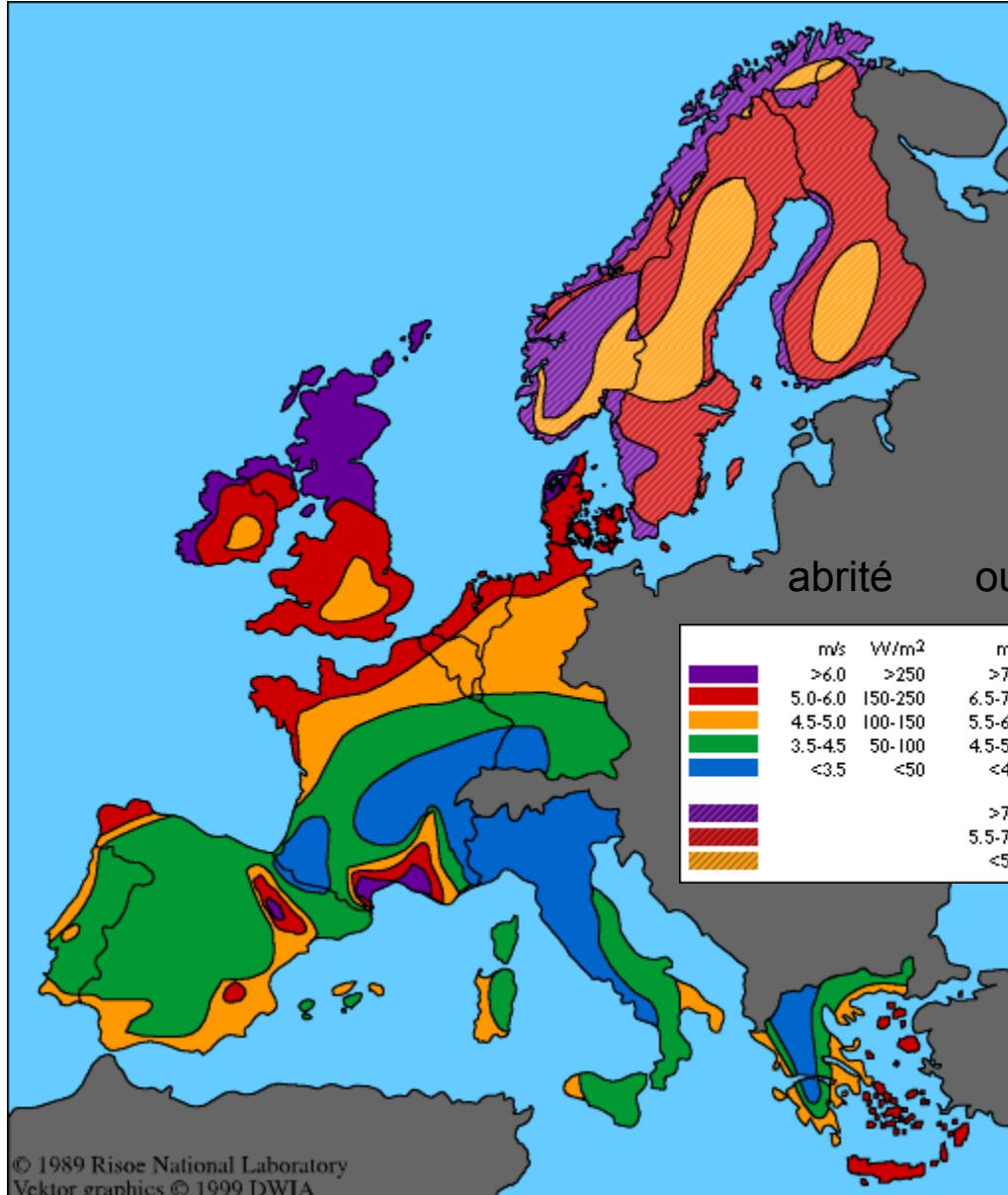
| Vitesse [m/s] | Densité de puissance [W/m <sup>2</sup> ] |
|---------------|--|
| 0             | 0  |
| 5             | 75                                       |
| 10            | 600                                      |
| 15            | 2025                                     |
| 20            | 4800                                     |
| 25            | 9375                                     |

Densité de puissance

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3$$

$$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

# Vitesses « moyennes » du vent en Europe



Vitesse du vent à  
50m d'altitude

# Incohérence entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées suite à la distribution de vitesse

Pour une vitesse du vent de 10m/s

Théorie

**600 W/m<sup>2</sup>**

Carte

**1200 W/m<sup>2</sup>**



# Définition du facteur de distribution

Sur base de mesures régulières de la vitesse du vent, on obtient plusieurs grandeurs caractéristiques

Vitesse moyenne

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum U_i$$

Puissance moyenne

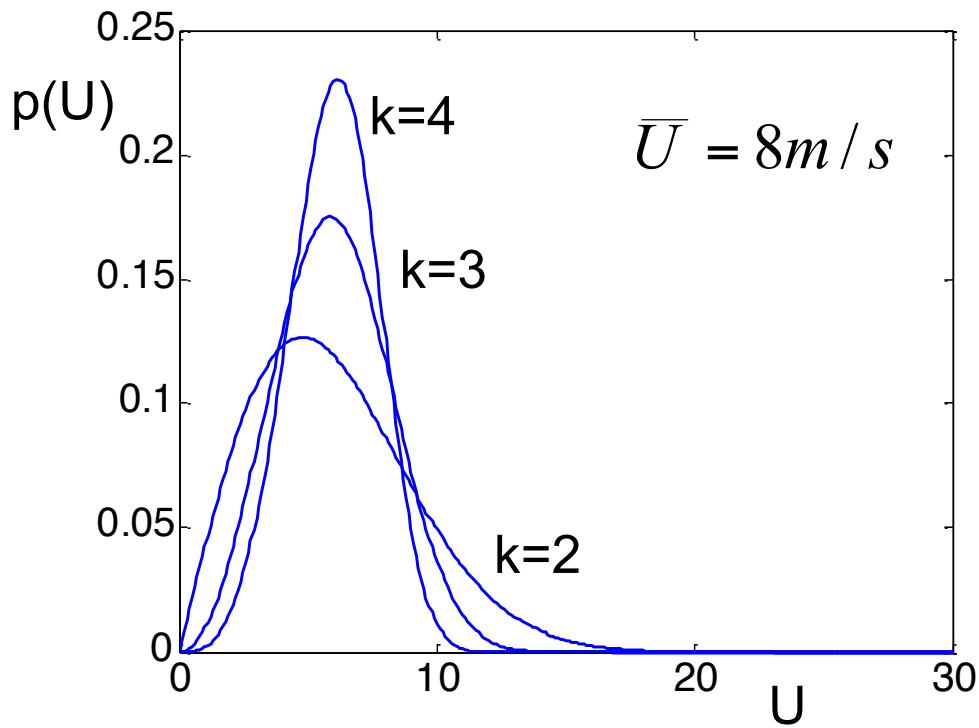
$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho A \frac{1}{N} \sum U_i^3 = \frac{1}{2} \rho A K_e \bar{U}^3$$

Facteur de distribution

$$K_e = \frac{\frac{1}{N} \sum U_i^3}{\bar{U}^3}$$

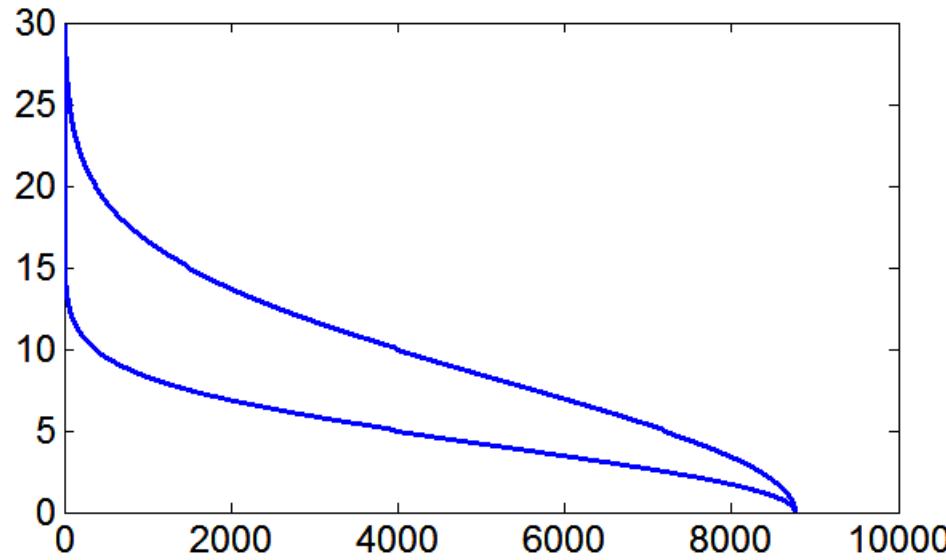
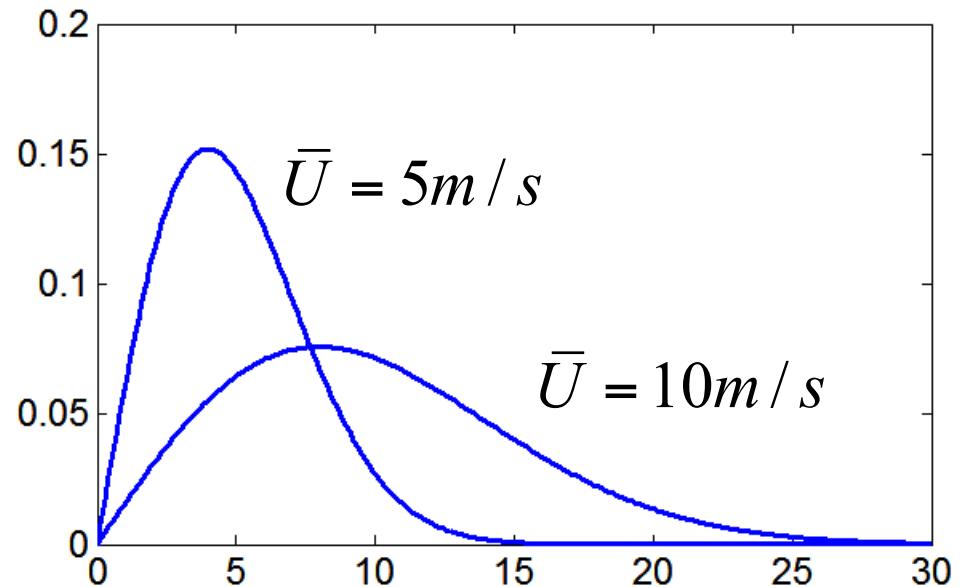
# Passage des mesures à une approche statistique, la distribution de Weibull

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad k = f(\bar{U}, \sigma_U)$$
$$c = g(\bar{U}, \sigma_U)$$



| $k$ | $K_e$ |
|-----|-------|
| 2.0 | 1.91  |
| 3.0 | 1.40  |
| 4.0 | 1.15  |

# De la distribution de Weibull, à la monotone de vitesse



« Combien  
d'heures par an,  
le vent a-t-il une  
vitesse supérieure  
à »

## Illustration de la monotone pour différents sites

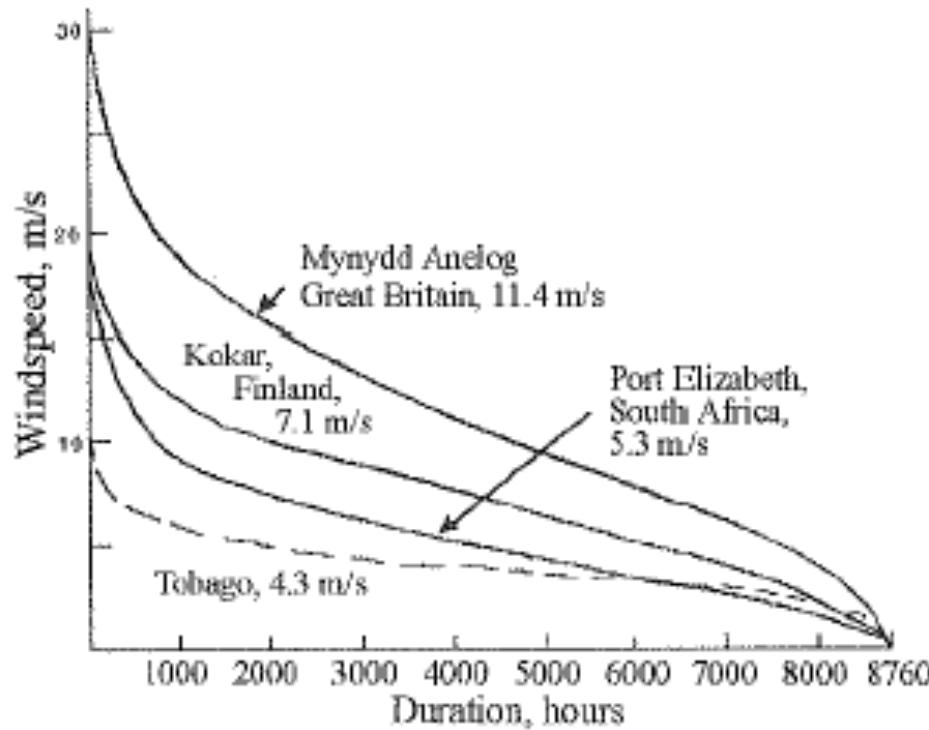


Figure 2.26 Velocity duration curve example (Rohatgi and Nelson, 1994). Reproduced by permission of Alternative Energy Institute

# Définition des classes de vent pour les éoliennes

Table 1 – IEC Classes for Wind Turbines (source: IEC 61400-1, 2<sup>nd</sup> edition, dated 1999-02)

| Wind Turbine Class  | I        | II        | III       | IV      | S                                      |
|---------------------|----------|-----------|-----------|---------|--|
| $V_{ref}$ m/s (mph) | 50 (111) | 42.5 (95) | 37.5 (84) | 30 (67) | Values to be specified by the designer |
| $V_{ave}$ m/s (mph) | 10 (22)  | 8.5 (19)  | 7.5 (17)  | 6 (13)  |  |
| A $I_{15}$          | 0.18     | 0.18      | 0.18      | 0.18    |  |
| a                   | 2        | 2         | 2         | 2       |  |
| B $I_{15}$          | 0.16     | 0.16      | 0.16      | 0.16    |  |
| a                   | 3        | 3         | 3         | 3       |  |

where:

the values apply at hub-height, and

A designates the category for higher turbulence characteristics,

B designates the category for lower turbulence characteristics,

$I_{15}$  is the characteristic value of the turbulence intensity at 15 m/s,

a is the slope parameter to be used in the Normal Turbulence Model equation.

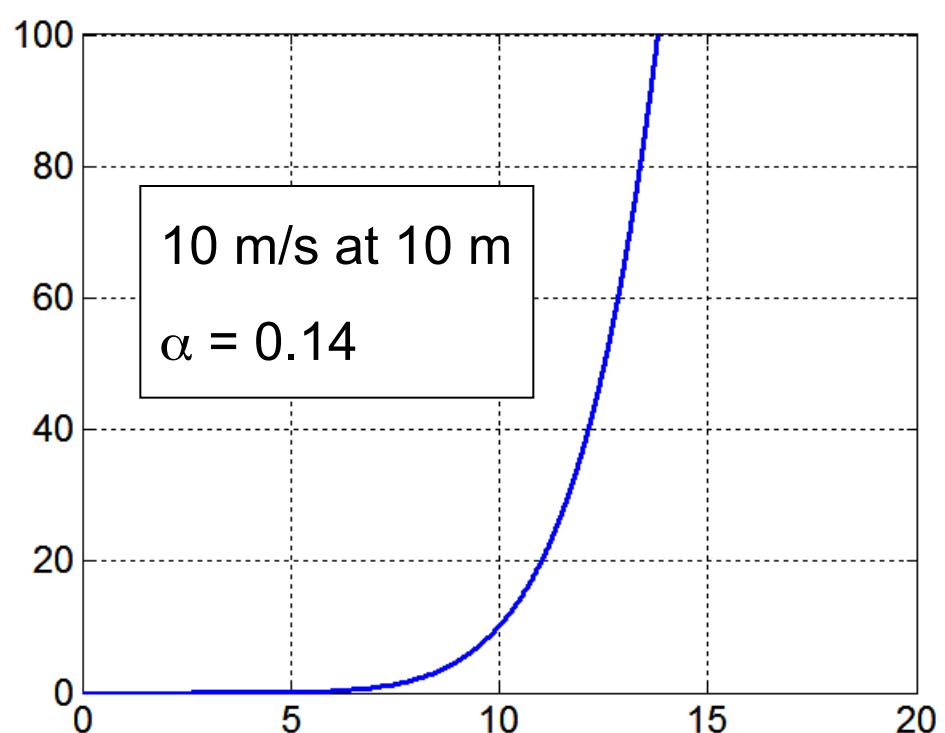
Vestas website : « Specifically, the V90-1.8 MW is ideal for IEC II sites whereas the V90-2.0 MW is better suited for IEC III sites ».

# Modification de la vitesse avec l'altitude, la couche limite terrestre

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left( \frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

$$0.1 \leq \alpha \leq 0.3$$

$\alpha$  dépend de tous les paramètres définissant la géographie et le climat local.



Caractérisation du vent

## Potentiel éolien et production

Caractérisation globale des éoliennes

Différents types d ‘éoliennes

Calcul de l’énergie produite annuellement

Aérodynamique des pales

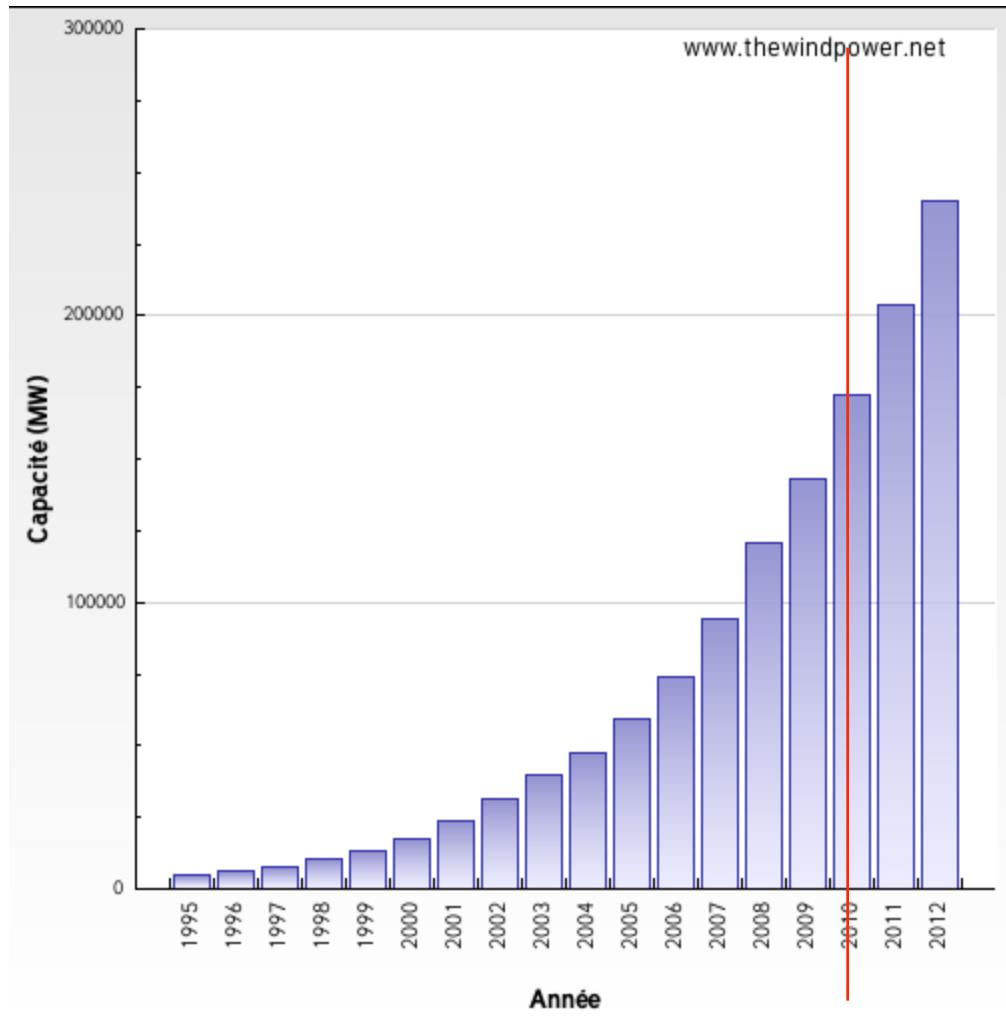
Gestion aérodynamique de l’éolienne

Gestion électrique de l’éolienne

# Quel est le potentiel éolien mondial?

|                                  |               |
|----------------------------------|---------------|
| Potentiel théorique mondial      | $10^6$ TWh/an |
| Potentiel technique mondial      | 20 000 TWh/an |
| Production mondiale (2009)       | 300 TWh/an    |
| Consommation électrique mondiale | 15500 TWh/an  |

# L'évolution de la puissance installée est exponentielle



Source : [thewindpower.net](http://thewindpower.net)

# La croissance reste forte y compris en Europe

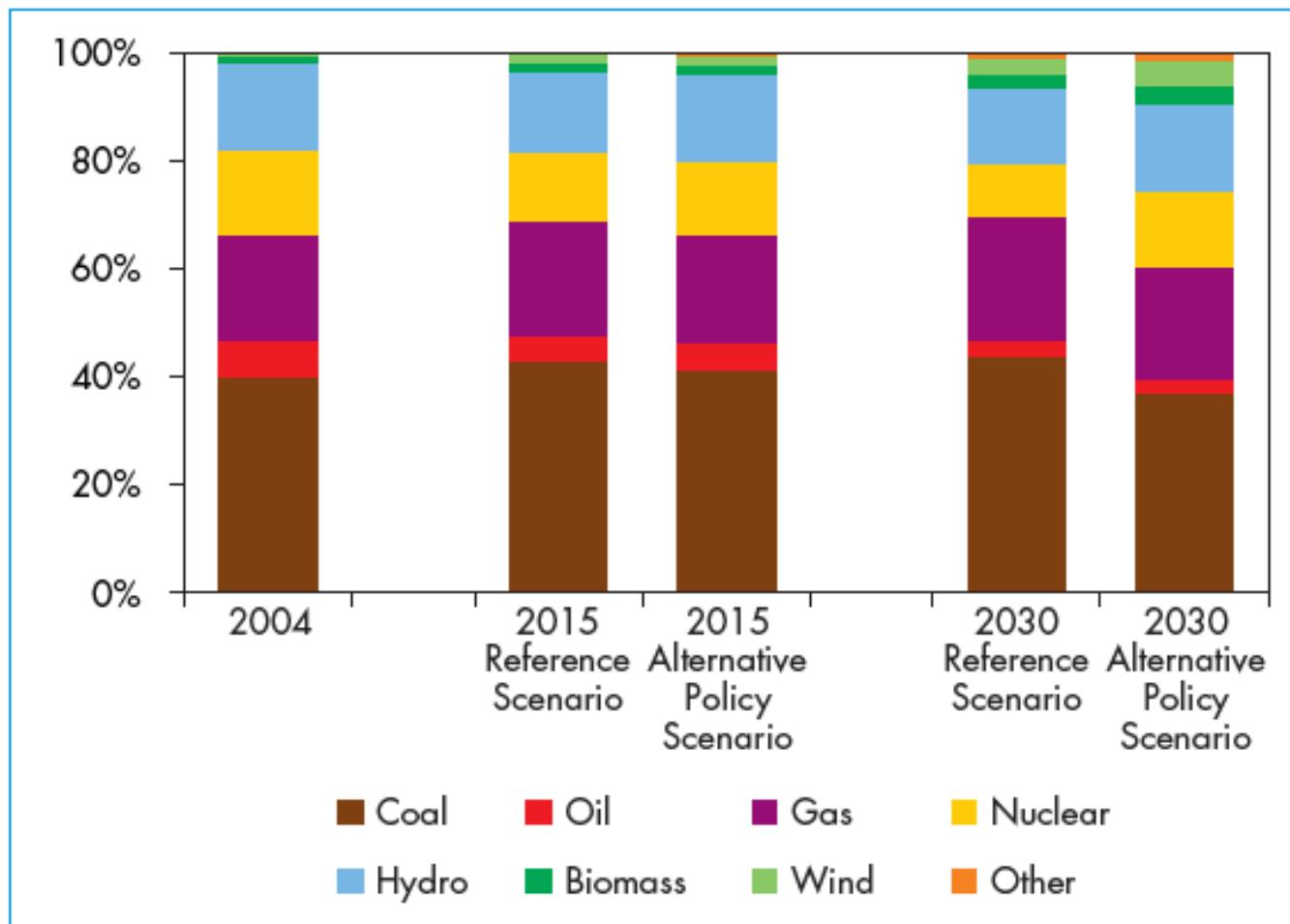
|        |                                   | End 2006      | New 2007     | Total         |
|--------|-----------------------------------|---------------|--------------|---------------|
| EUROPE | Germany                           | 20,622        | 1,667        | 22,247        |
|        | Spain                             | 11,623        | 3,522        | 15,145        |
|        | Denmark                           | 3,136         | 3            | 3,125         |
|        | Italy                             | 2,123         | 603          | 2,726         |
|        | France                            | 1,567         | 888          | 2,454         |
|        | UK                                | 1,962         | 427          | 2,389         |
|        | Portugal                          | 1,716         | 434          | 2,150         |
|        | Netherlands                       | 1,558         | 210          | 1,746         |
|        | Austria                           | 965           | 20           | 982           |
|        | Greece                            | 746           | 125          | 871           |
|        | Ireland                           | 746           | 59           | 805           |
|        | Sweden                            | 571           | 217          | 788           |
|        | Norway                            | 325           | 8            | 333           |
|        | Belgium                           | 194           | 93           | 287           |
|        | Poland                            | 153           | 123          | 276           |
|        | Rest of Europe <sup>3</sup>       | 556           | 263          | 812           |
|        | <b>Total Europe</b>               | <b>48,563</b> | <b>8,662</b> | <b>57,136</b> |
|        | <i>of which EU-27<sup>4</sup></i> | 48,069        | 8,554        | 56,535        |

Installed power in MW

Source Global Wind Energy Council

# Perspectives sur la place de l'éolien dans la production mondiale d'électricité

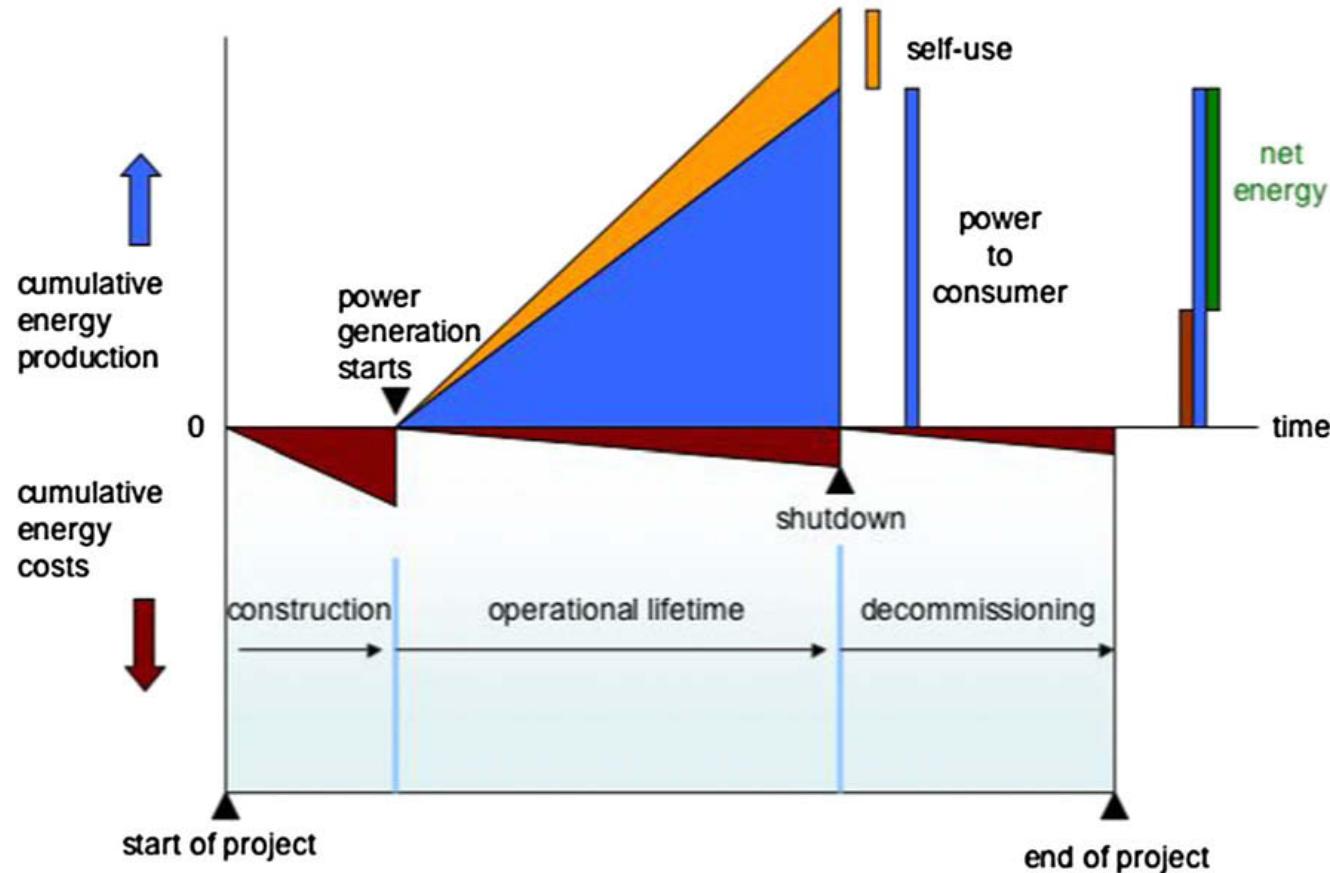
Figure 9.2: Global Fuel Shares in Electricity Generation



Note: "Other" includes geothermal, solar, tidal and wave energy.

Source: IEA, WEO2006

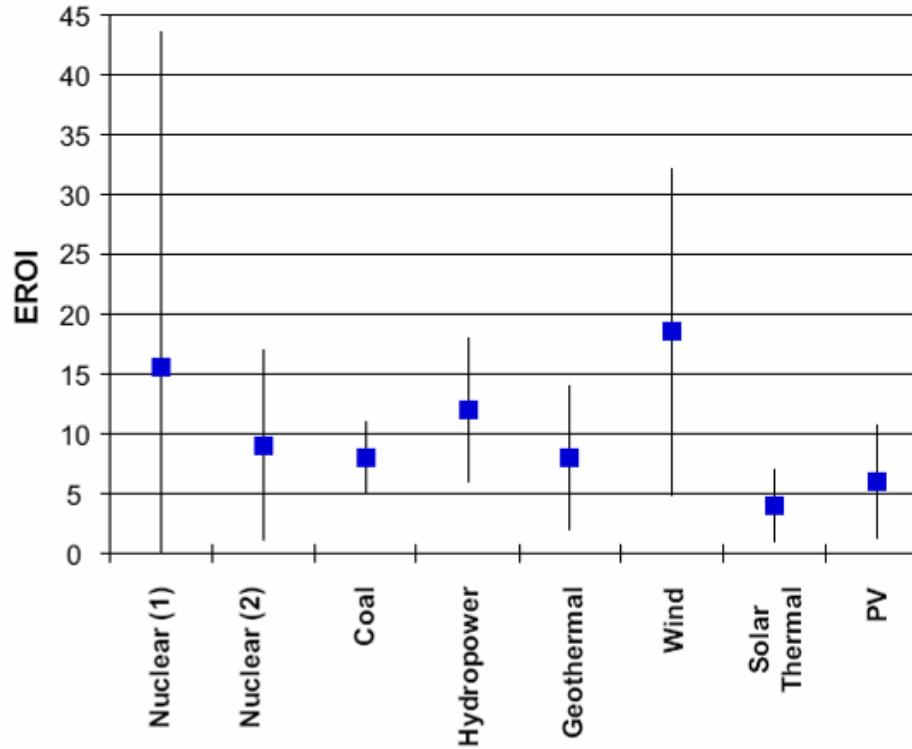
# L'énergie produite compense bien le coût de son installation et de son démantèlement



Source: Kubiszewski et al., Ren. En., 2010

# L'EROI (Energy Return On Investment) est très élevé comparé aux autres technologies

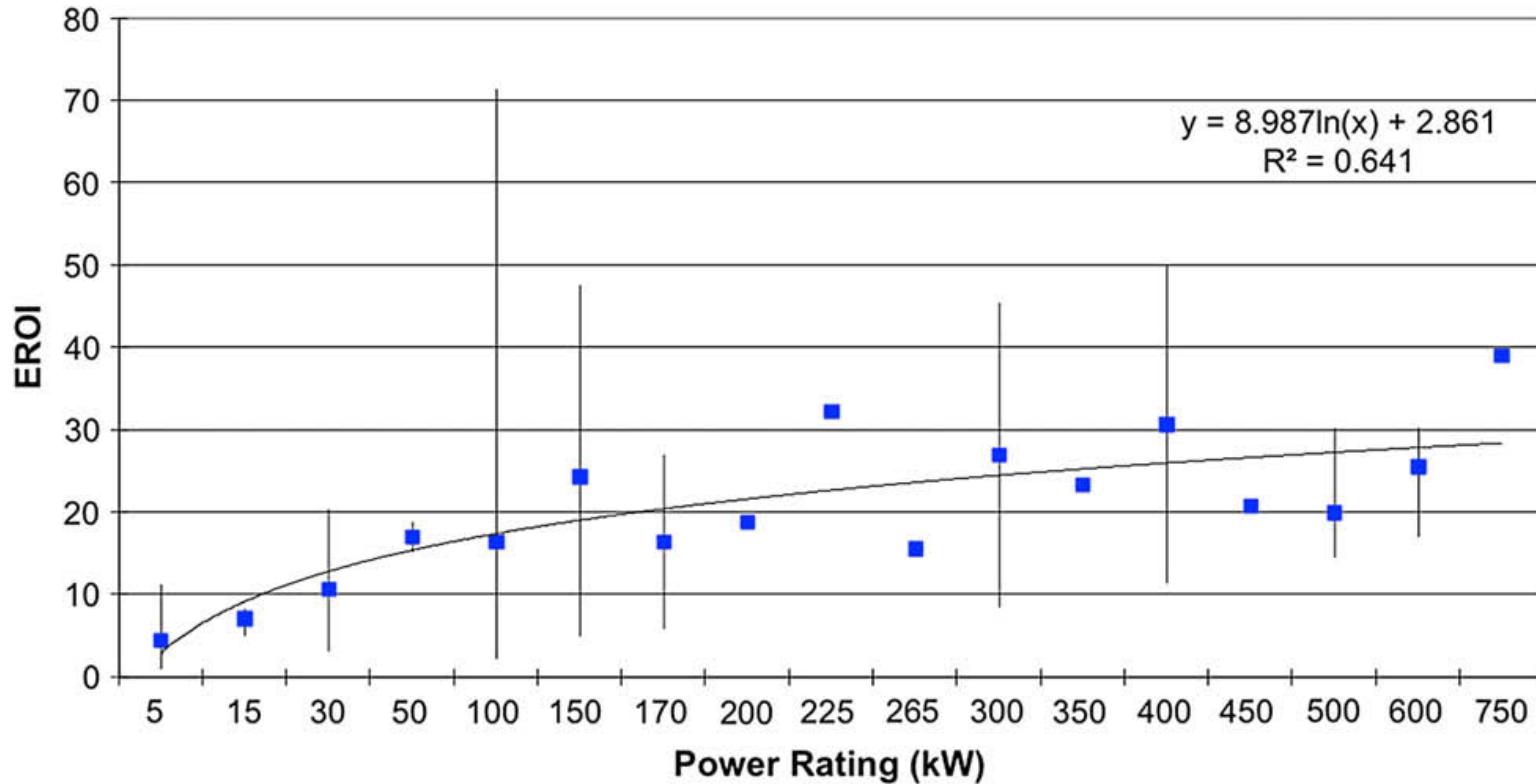
EROI = énergie électrique produite / énergie primaire consommée



**Fig. 6.** EROI for power generation systems. Nuclear (1) represents the average and standard deviation for the entire sample of analyses reviewed by Lenzen [14]. Nuclear (2) omits the extreme outliers from Lenzen's survey, and thus represents a better assessment of what the EROI for nuclear is likely to be. See text for description of further sources.

Source: Kubiszewski et al., Ren. En., 2010

# Il est préférable énergétiquement d' installer de grandes éoliennes



Source: Kubiszewski et al., Ren. En., 2010

Caractérisation du vent

Potentiel éolien et production

**Caractérisation globale des éoliennes**

Différents types d ‘éoliennes

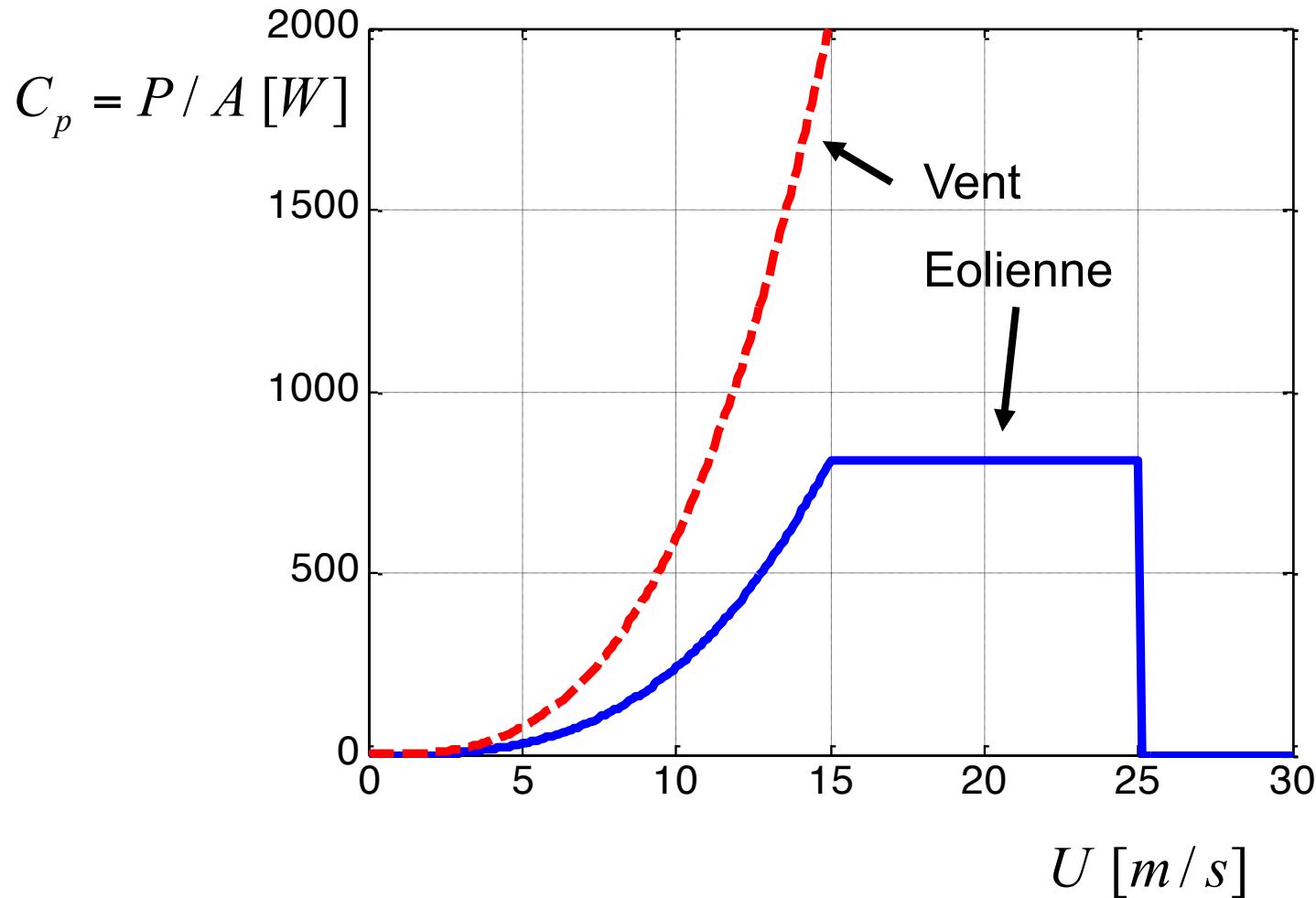
Calcul de l’énergie produite annuellement

Aérodynamique des pales

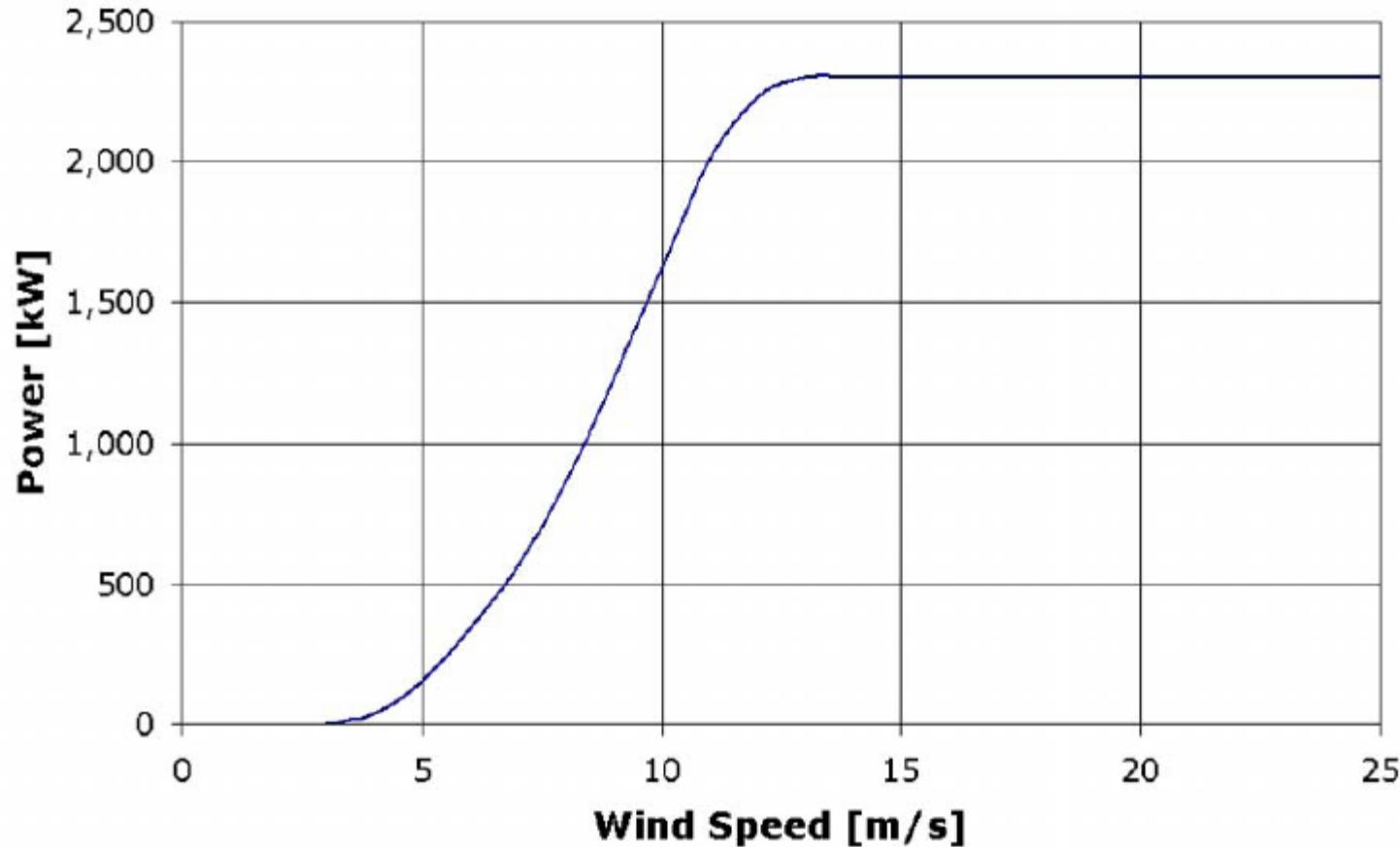
Gestion aérodynamique de l’éolienne

Gestion électrique de l’éolienne

# De la puissance du vent à celle d'une éolienne, comment expliquer l'écart?

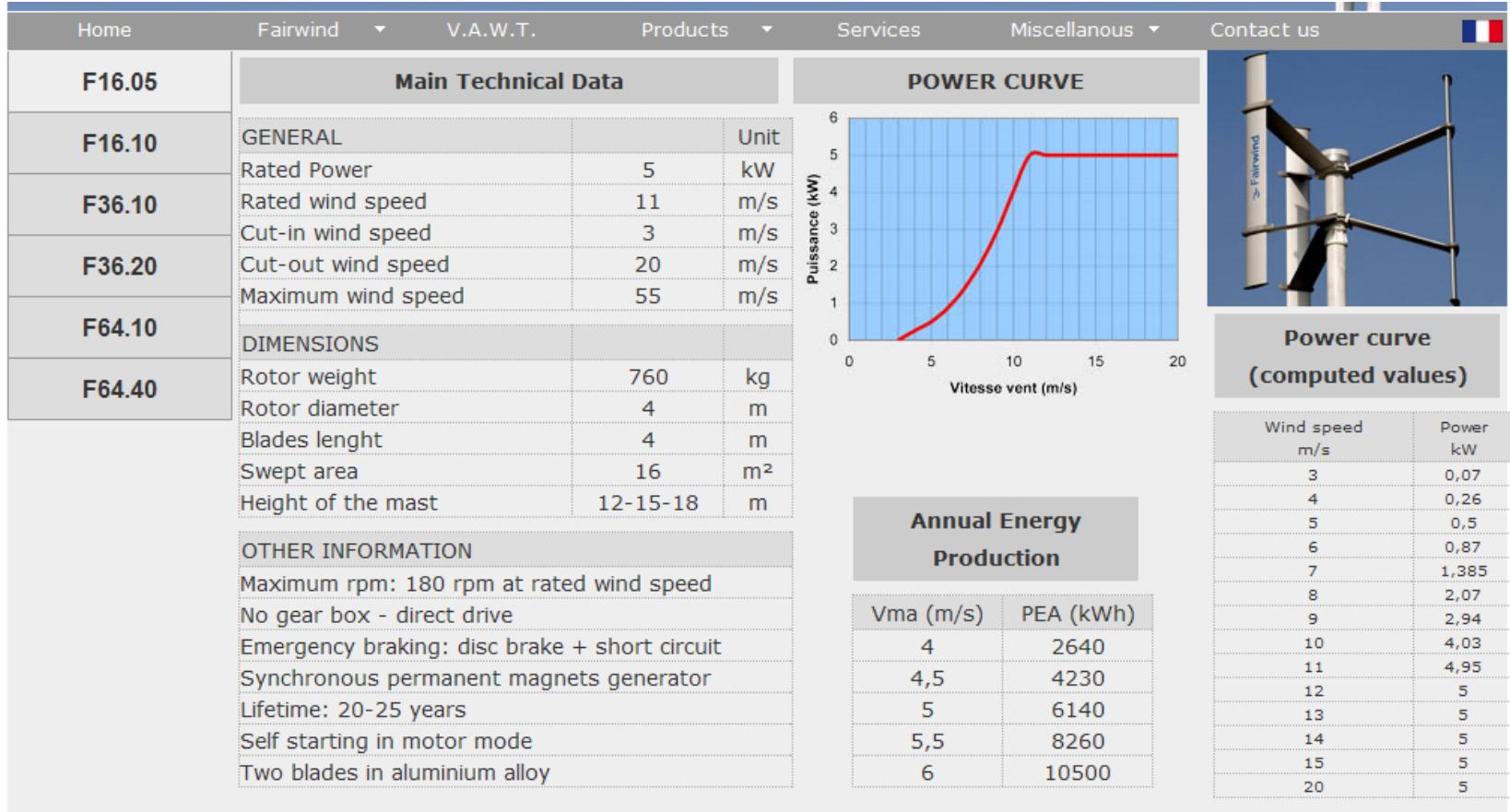


# Courbe caractéristique de puissance d'une éolienne



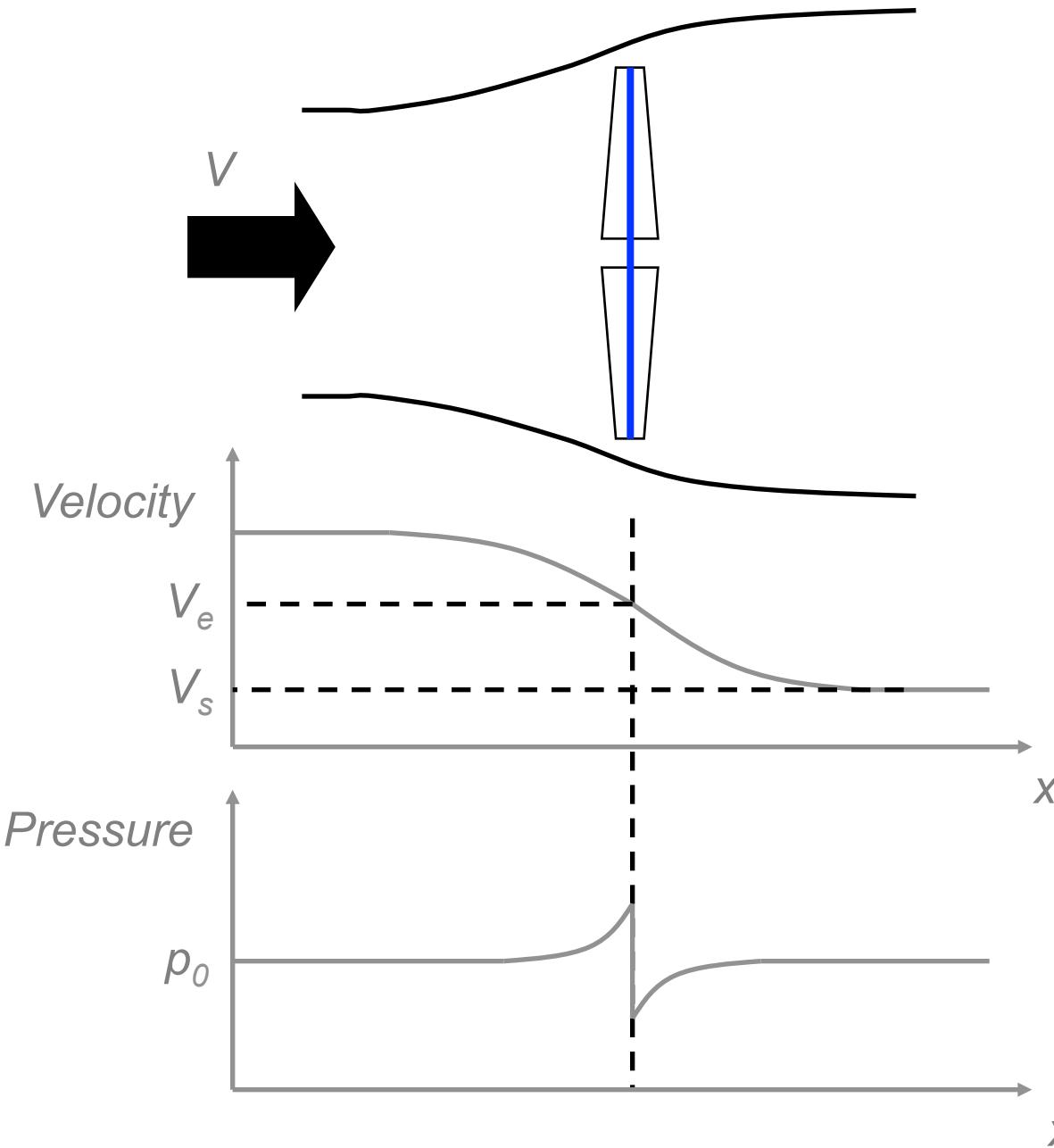
Nordex N90 : rotor diameter 90m->  $A = 6362 \text{ m}^2$

# Courbe caractéristique de puissance d'une éolienne

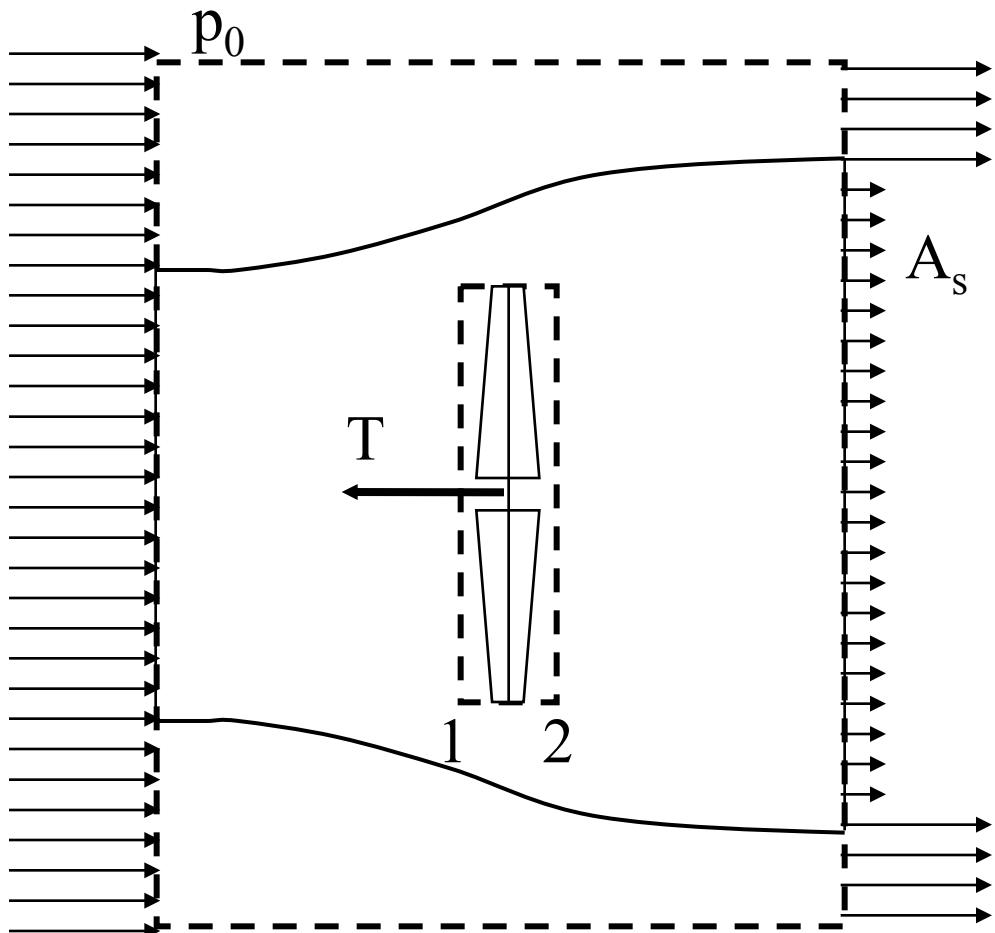


Source: <http://www.fairwind.be>

# Une vue globale sur l'écoulement autour d'une éolienne



# Bilans de quantité de mouvement pour déterminer la force axiale sur l'éolienne: théorie de Betz



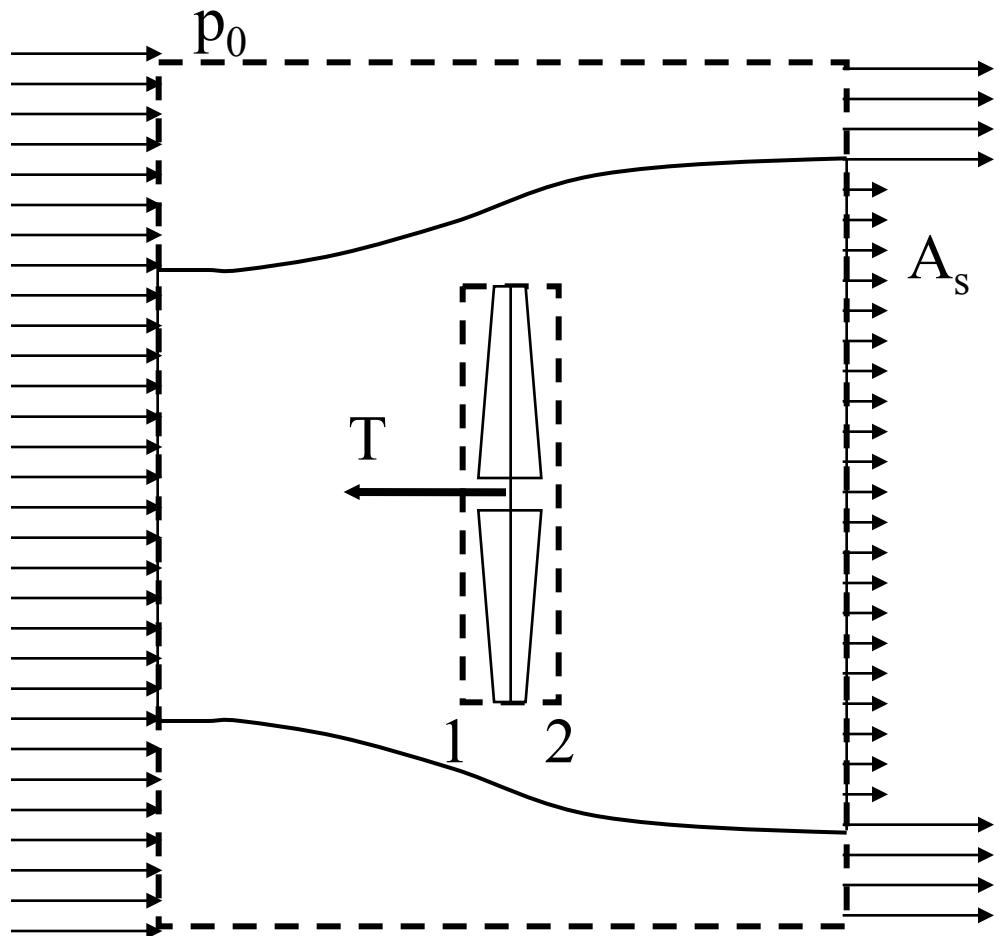
Bilan sur le contour où la pression est constante

$$T = \rho A_s V_s (V - V_s)$$

Bilan sur le contour du rotor où la vitesse est constante

$$T = A_e (p_1 - p_2)$$

# Expressions liants vitesses et pression à partir de la relation de Bernoulli

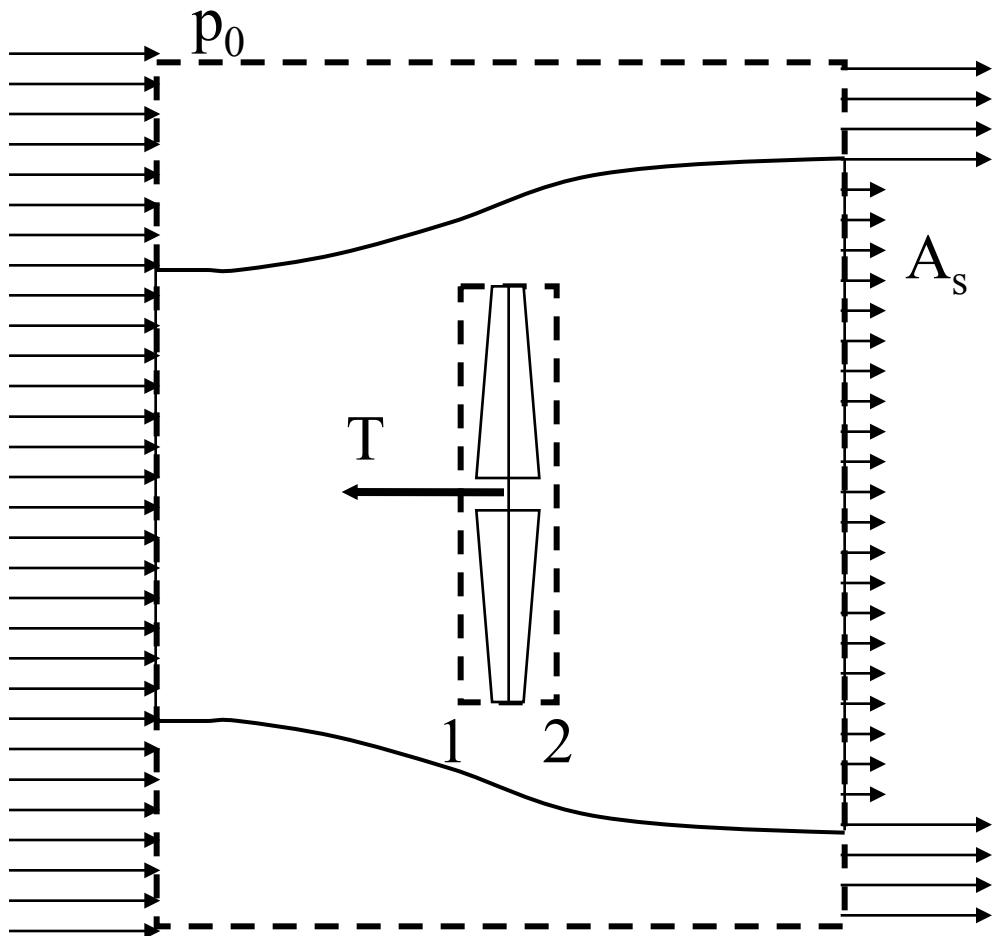


$$p_1 - p_0 = \rho \frac{V^2 - V_e^2}{2}$$

$$p_0 - p_2 = \rho \frac{V_e^2 - V_s^2}{2}$$

$$p_1 - p_2 = \rho \frac{V^2 - V_s^2}{2}$$

# Elimination des pressions pour obtenir une loi exprimant la surface de déficit de vitesse en aval



$$A_e(p_1 - p_2) = \rho A_s V_s (V - V_s)$$

$$p_1 - p_2 = \rho \frac{V^2 - V_s^2}{2}$$

---

$$A_s = A_e \frac{V + V_s}{2V_s} = A_e \frac{(1+x)}{2x}$$

# Expression de la puissance perdue par le vent et du coefficient de puissance

La puissance prélevée est le produit du débit et de la perte d'énergie cintétique

$$P_p = \rho A_s V_s \frac{V^2 - V_s^2}{2}$$

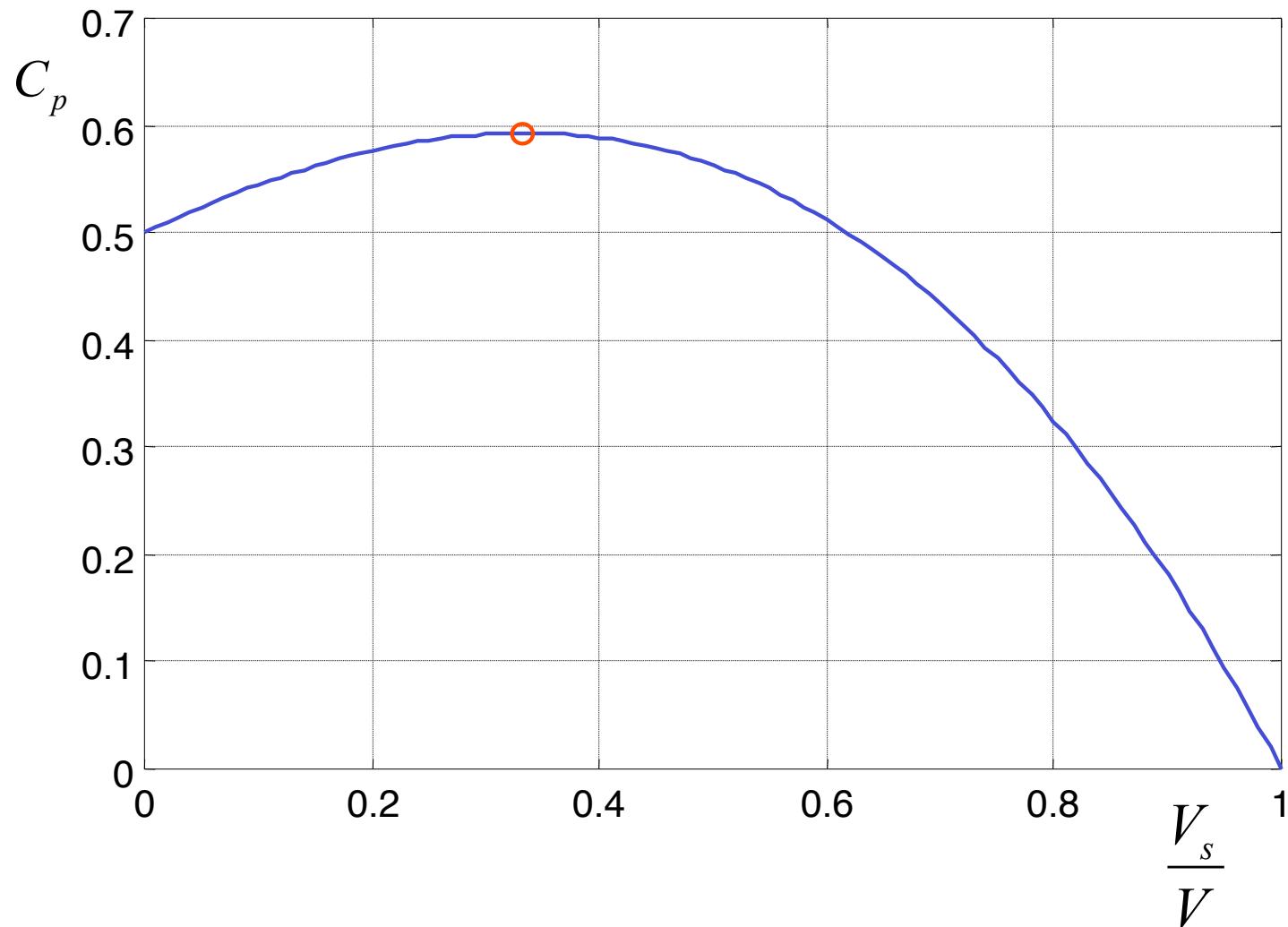
La puissance prélevée est uniquement fonction du rapport entre la vitesse avale et la vitesse amont

$$P_p = \frac{1}{2} \rho A_e V^3 \frac{(1+x)(1-x^2)}{2} \quad x = \frac{V_s}{V}$$

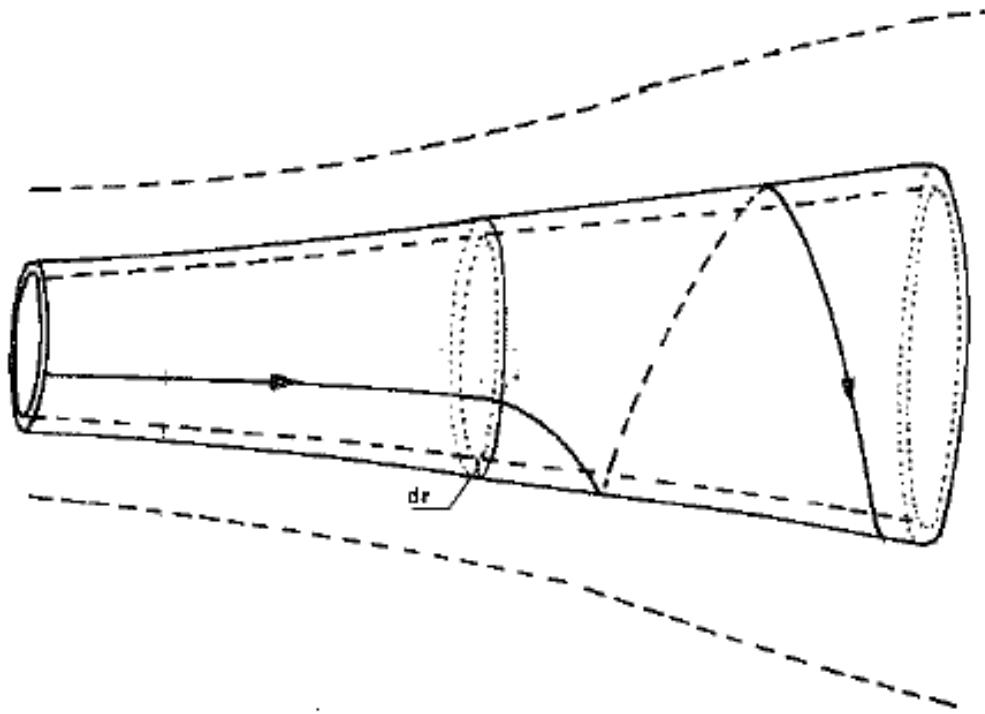
Le coefficient est indépendant de la taille de l'éolienne et de la vitesse du vent

$$C_p = \frac{P_p}{\frac{1}{2} \rho A_e V^3} = \frac{(1+x)(1-x^2)}{2}$$

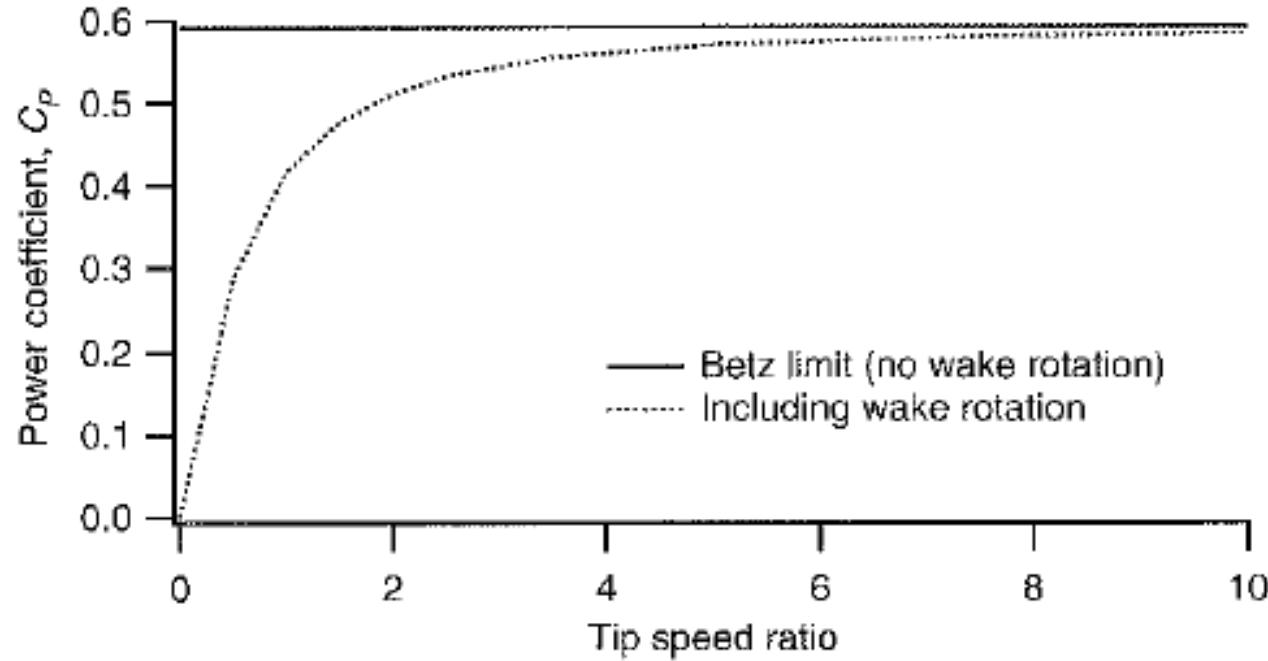
**Il existe un optimum de puissance prélevée dont le rendement est proche de 60%: optimum de Betz**



## Première correction, la giration de sillage en réaction du couple sur le rotor



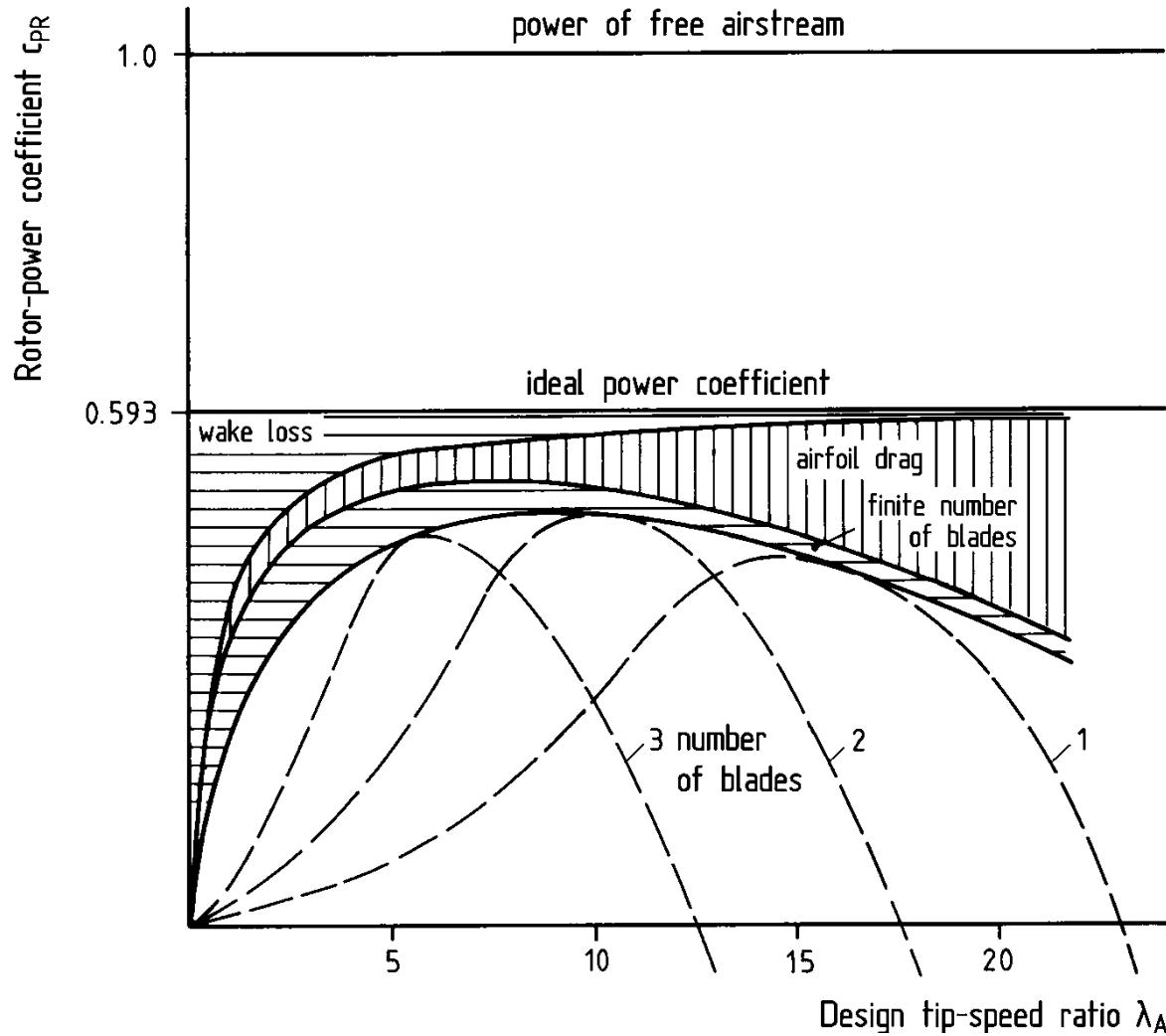
## L'optimum de Betz est réduit et dépend fortement du « tip speed ratio »



$$\lambda = \frac{\Omega R}{V}$$

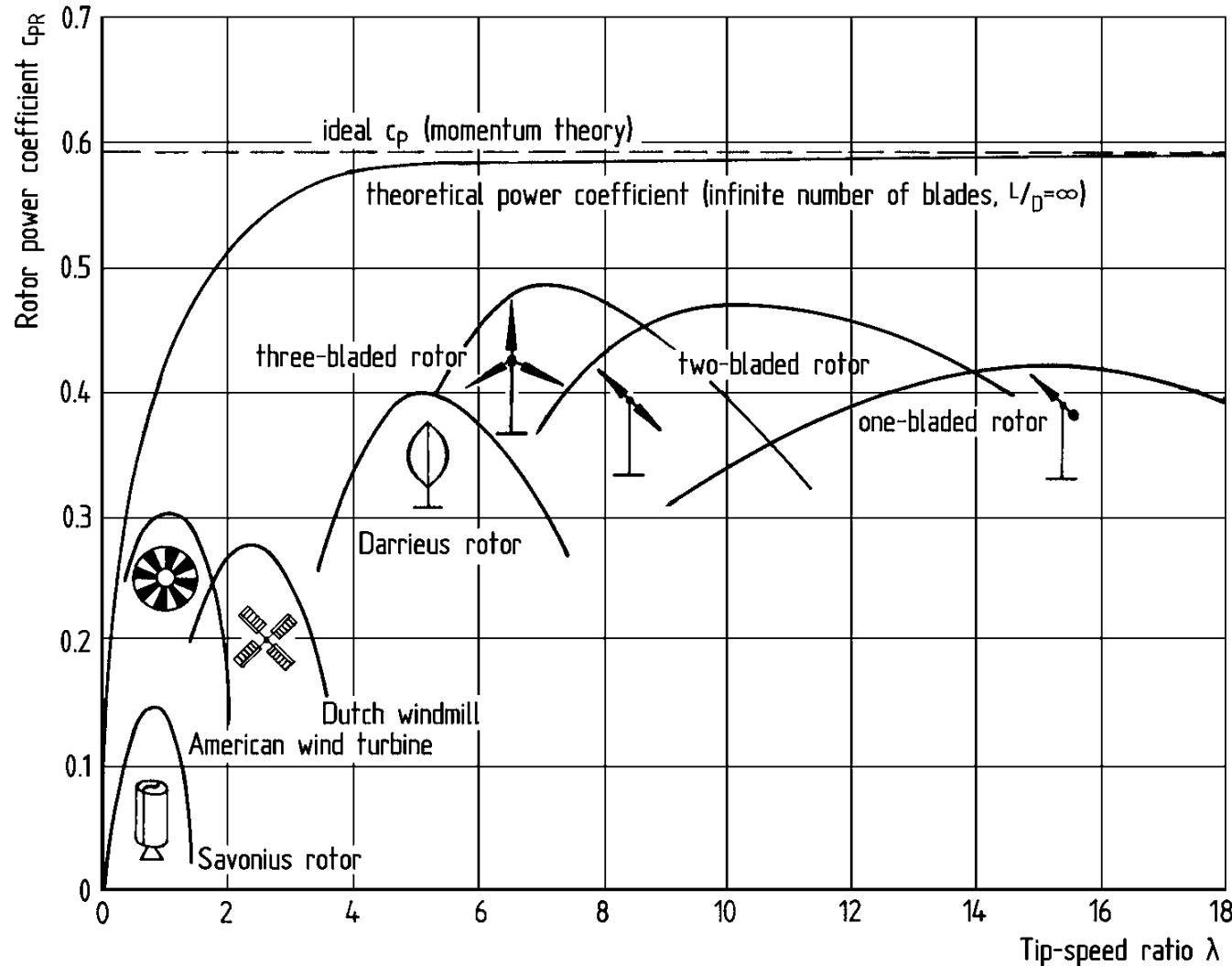
$\lambda$  également limité supérieurement pour des raisons de bruit

## Seconde correction, nombre de pales et traînées



Source: Wind Turbines by Hau and von Renouard, Springer,  
accessible en ligne gratuitement

# Caractérisation des éoliennes par rapport à Betz: différents types d'éoliennes



Caractérisation du vent

Potentiel éolien et production

Caractérisation globale des éoliennes

**Différents types d ‘éoliennes**

Calcul de l’énergie produite annuellement

Aérodynamique des pales

Gestion aérodynamique de l’éolienne

Gestion électrique de l’éolienne

# Les différents types d'éoliennes

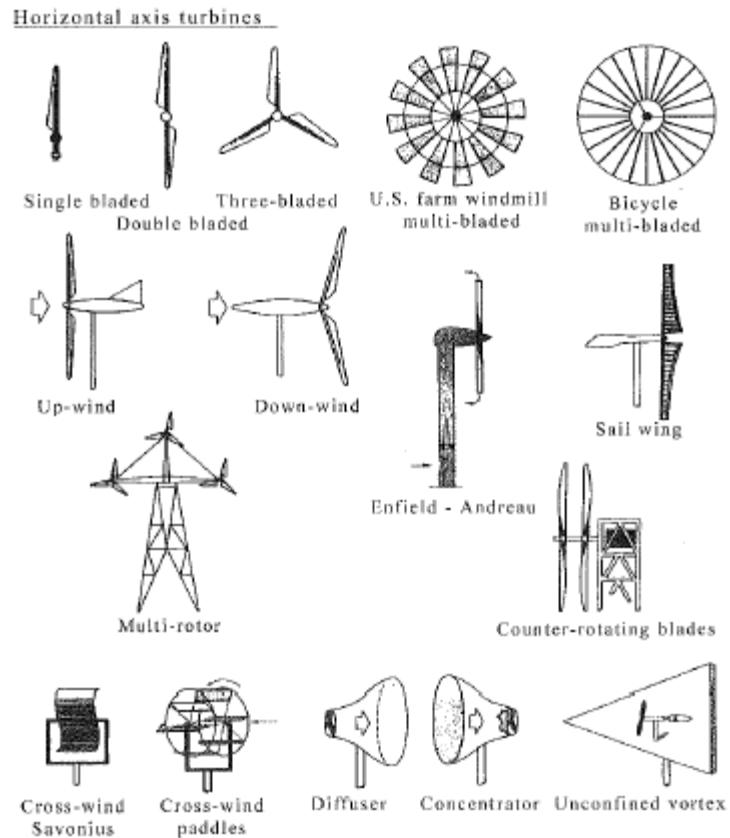


Figure 1.5 Various concepts for horizontal axis turbines (Eldridge, 1980)

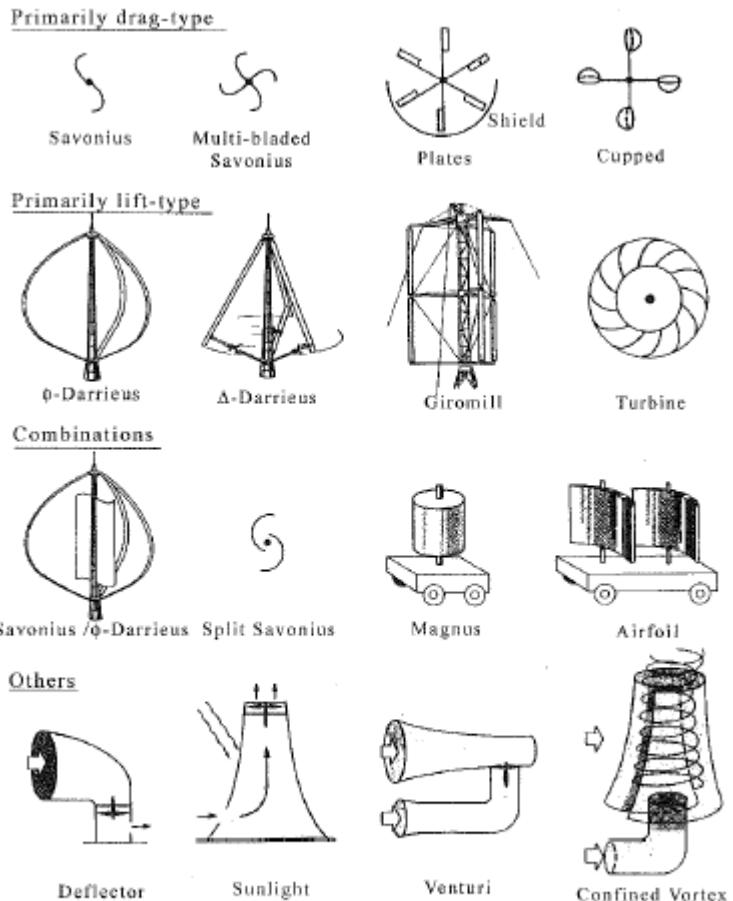


Figure 1.6 Various concepts for vertical axis turbines (Eldridge, 1980)

Source : Eldridge

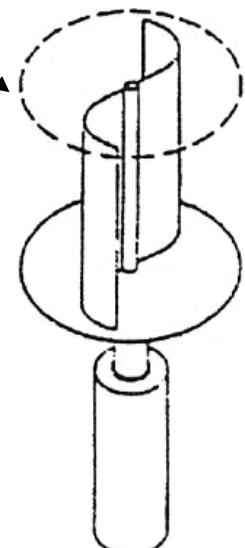
# Deux configurations majeures

Eolienne à axe vertical (VAWT)

Darrieus (basée sur la portance)

Savonius (basée sur la traînée)

Eolienne à axe horizontal (HAWT)



# Les éoliennes à axe vertical

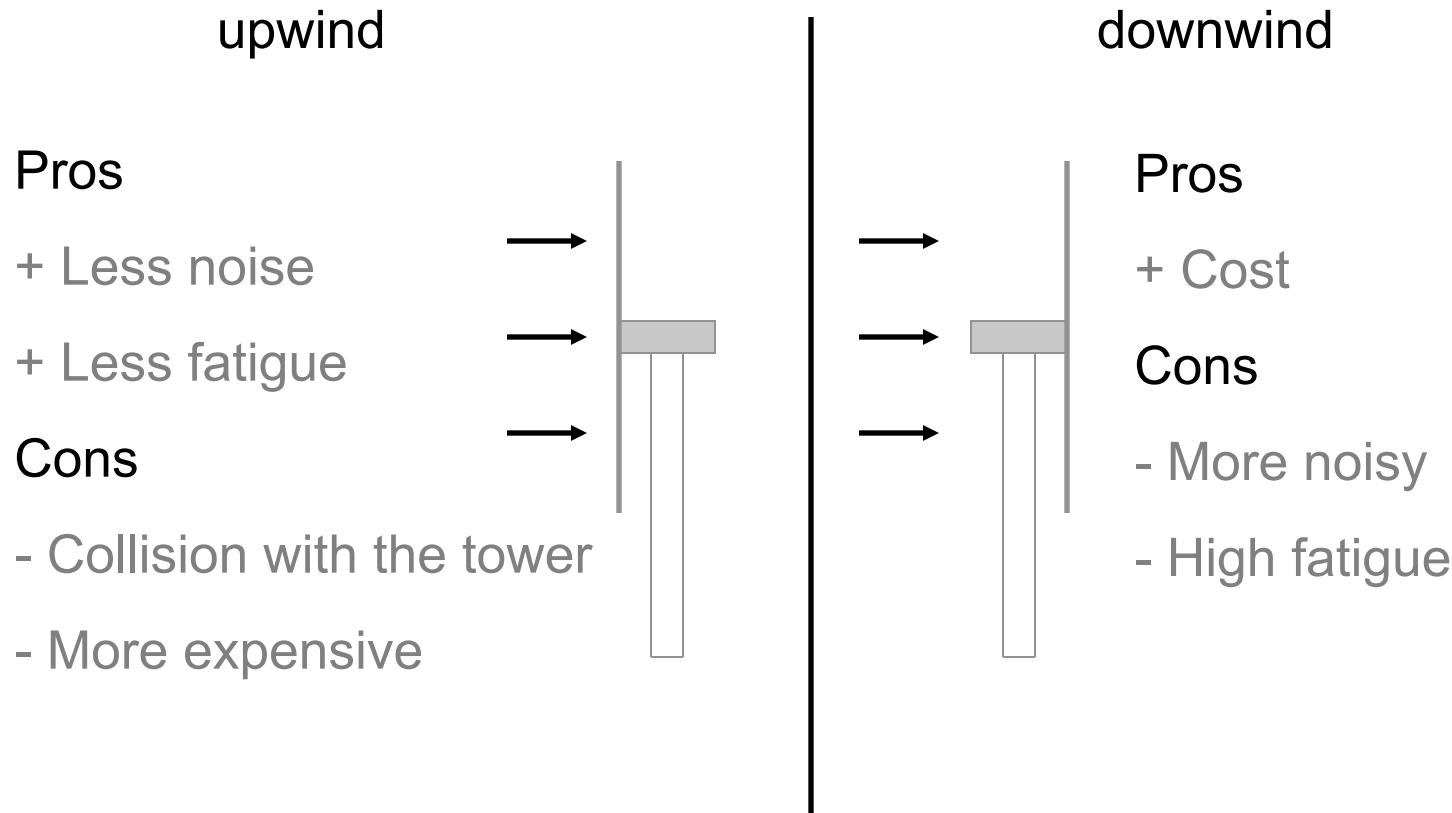
## Pros

- + All the machinery is at the ground level
- + Simplicity
- + Always correctly oriented

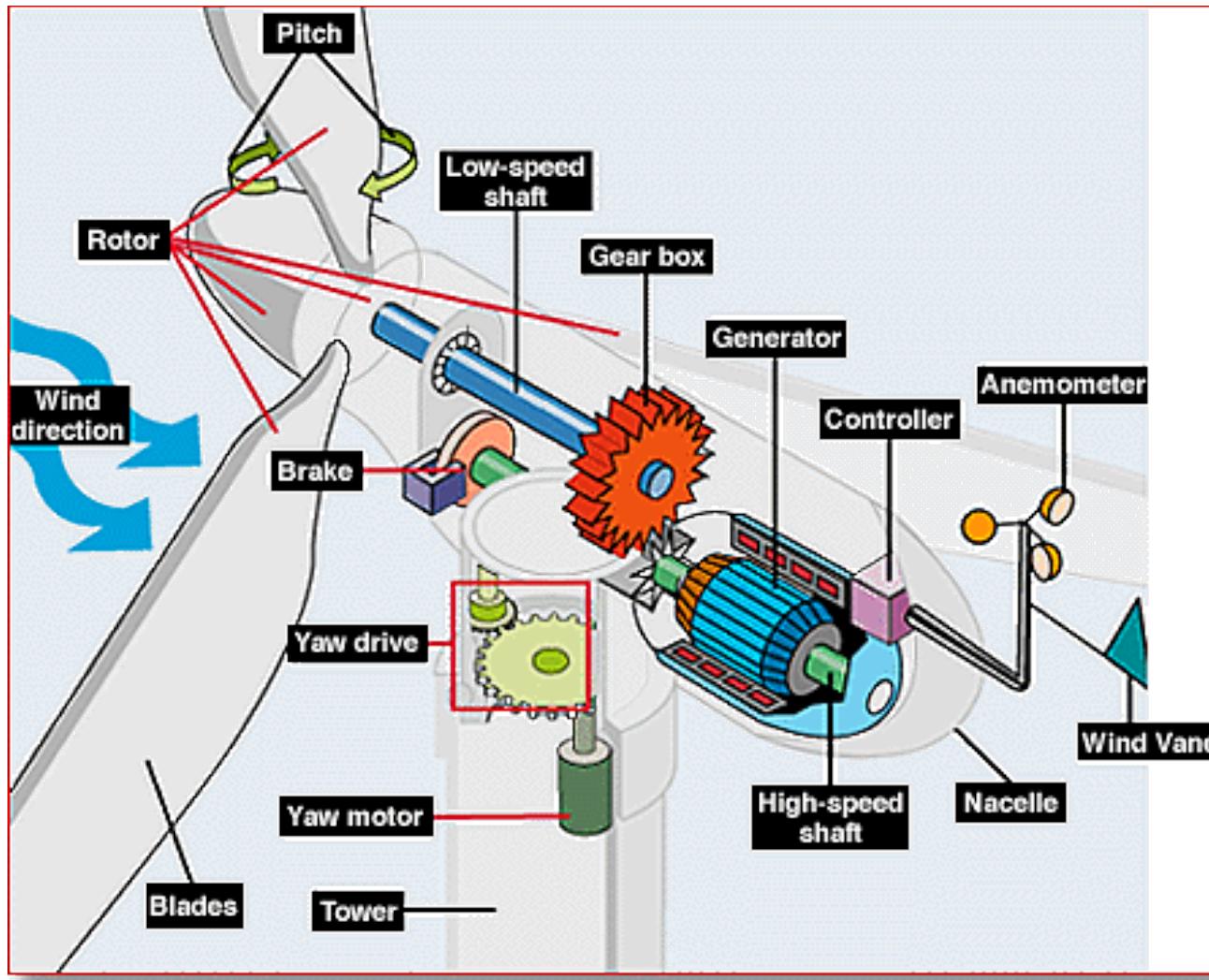
## Cons

- Symmetric blade profile -> less efficient
- Lack of torque to start the rotor
- Important rotor wake influence
- Highly cyclic torque -> fatigue
- High torque, low speed

# Les éoliennes à axes horizontal : upwind ou downwind



# Quelques éléments majeurs d'une éolienne



Caractérisation du vent

Potentiel éolien et production

Caractérisation globale des éoliennes

Différents types d ‘éoliennes

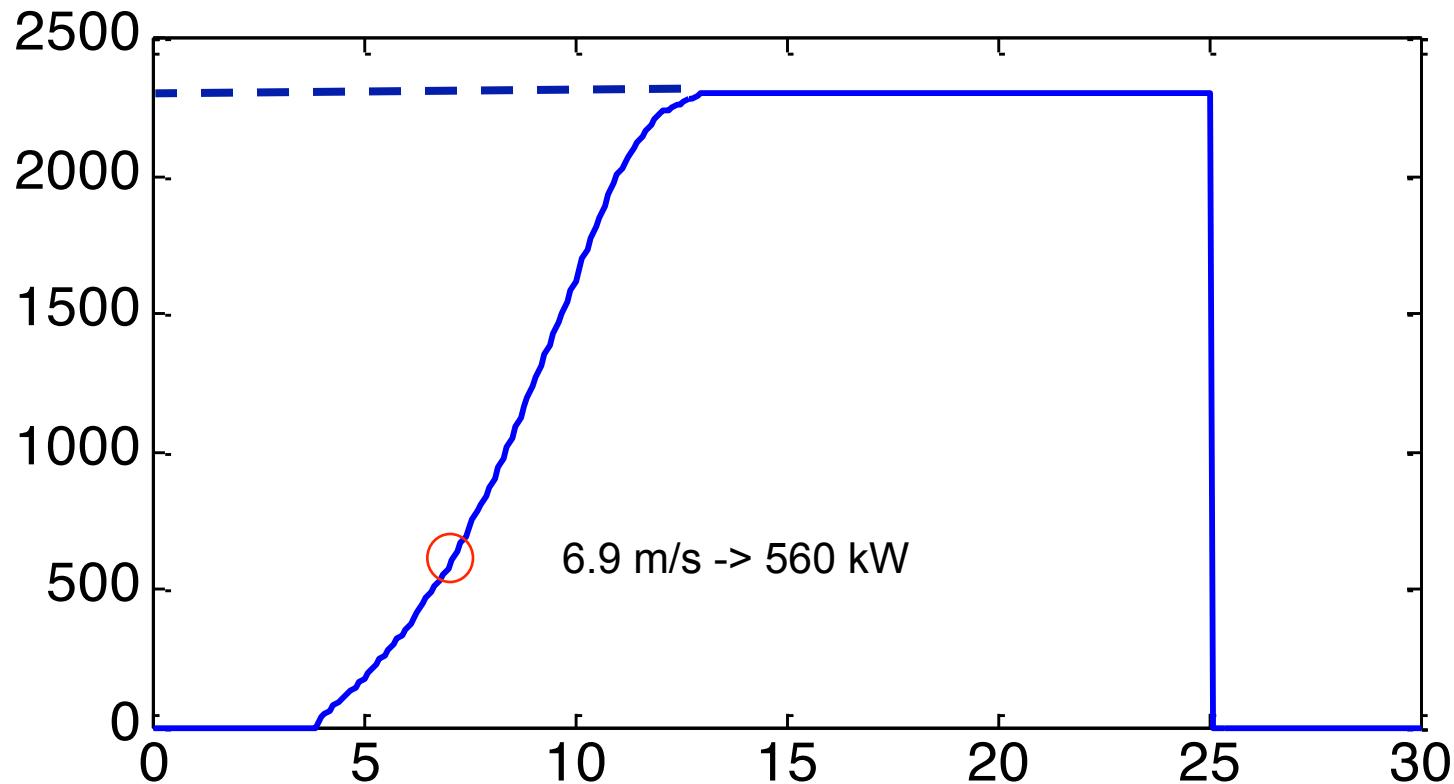
**Calcul de l’énergie produite annuellement**

Aérodynamique des pales

Gestion aérodynamique de l’éolienne

Gestion électrique de l’éolienne

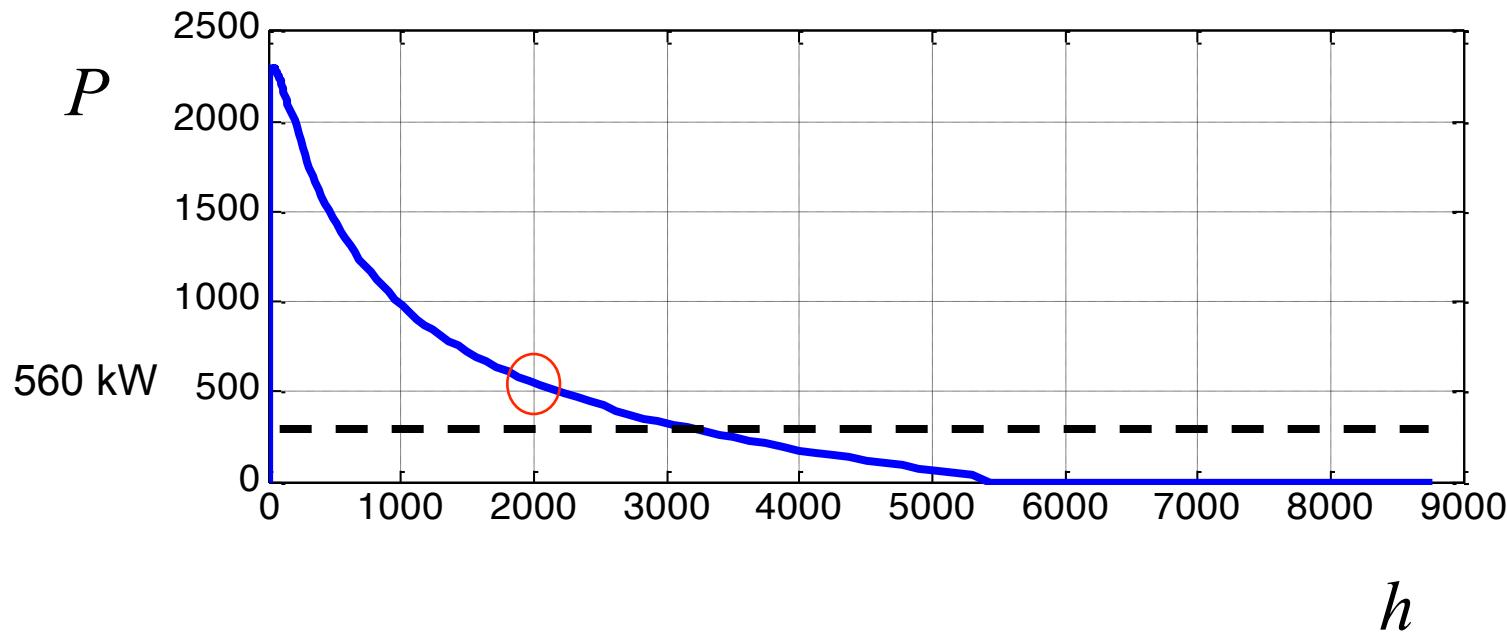
# Calcul de l'énergie produite annuellement à partir de la courbe caractéristique



Démarrage à 4 m/s  
Puissance nominale à 13 m/s  
Arrêt à 25 m/s

## En combinaison avec la monotone de vitesse, on détermine une monotone de puissance

$$\bar{U} = 5 \text{ m/s}$$



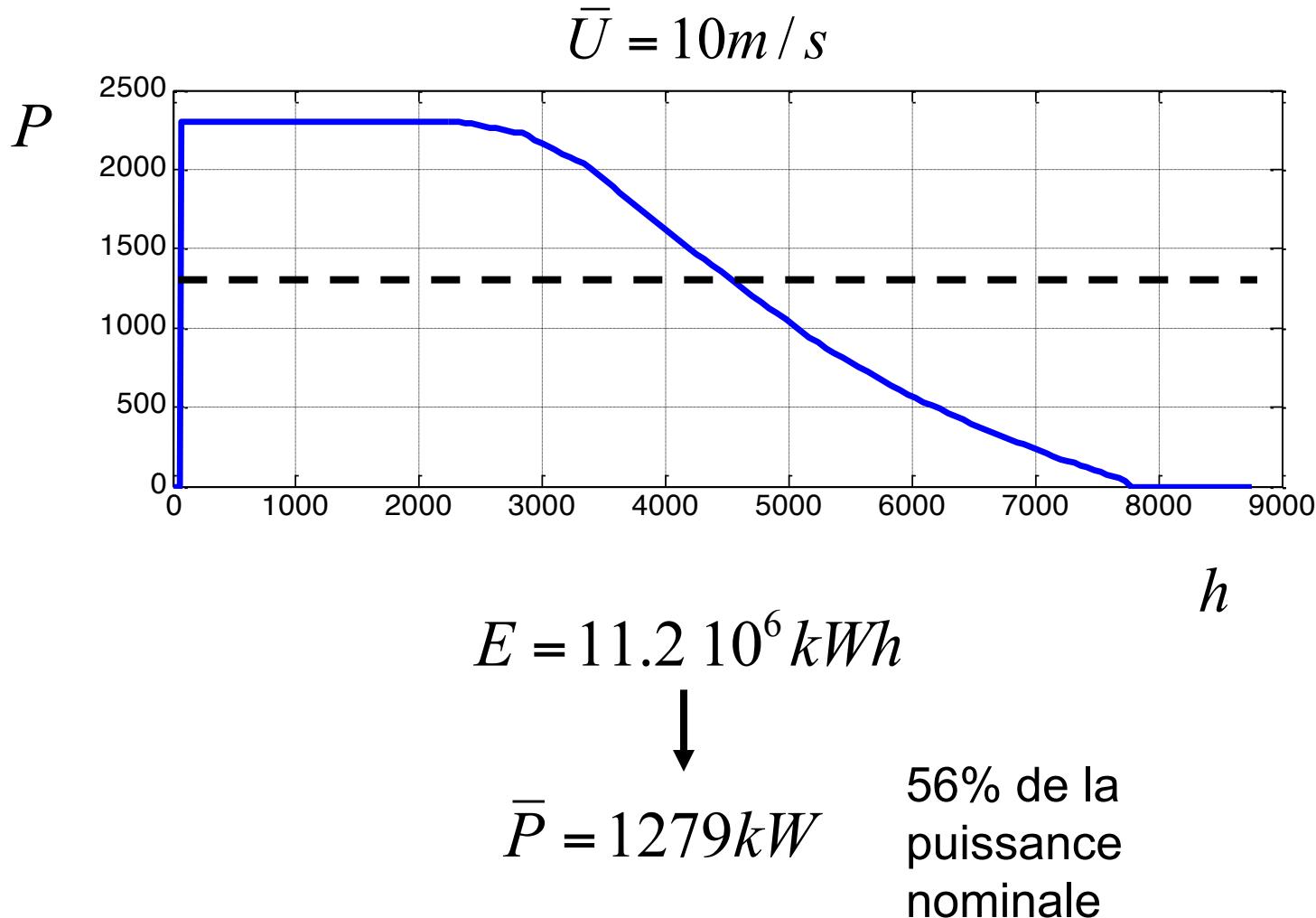
2000 heures par an, la vitesse du vent est supérieure à 6.9 m/s et la puissance fournie par l'éolienne est supérieure à 560kW. En intégrant cette monotone de puissance, on obtient l'énergie produite annuellement

$$\rightarrow E = 3.1 \cdot 10^6 \text{ kWh}$$

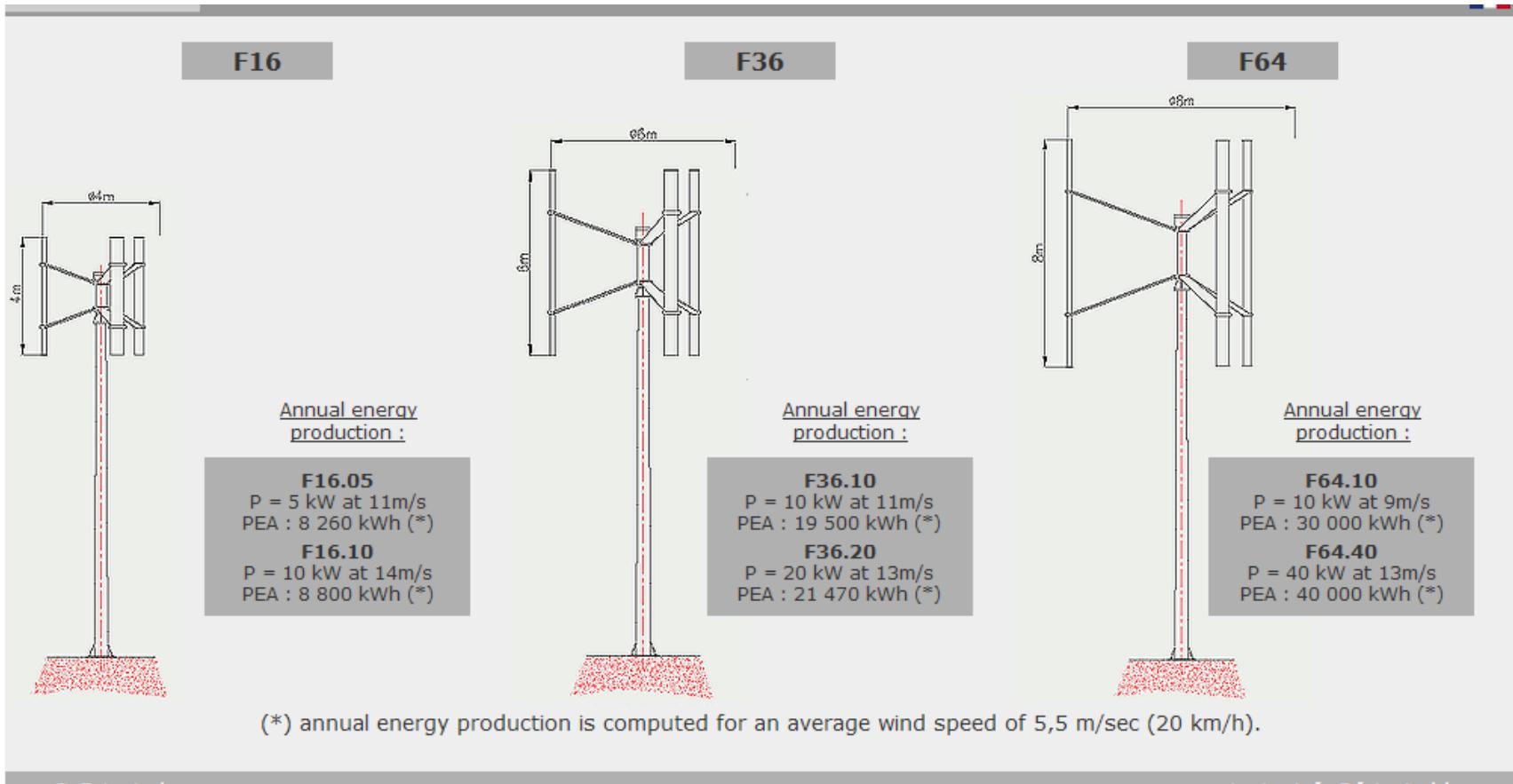
$\downarrow$

$$\bar{P} = 354 \text{ kW} \quad \begin{matrix} 15\% \text{ de la} \\ \text{puissance} \\ \text{nominale}^{44} \end{matrix}$$

**En combinaison avec la monotone de vitesse,  
on détermine une monotone de puissance**



# En exercice pour les étudiants



Caractérisation du vent

Potentiel éolien et production

Caractérisation globale des éoliennes

Différents types d ‘éoliennes

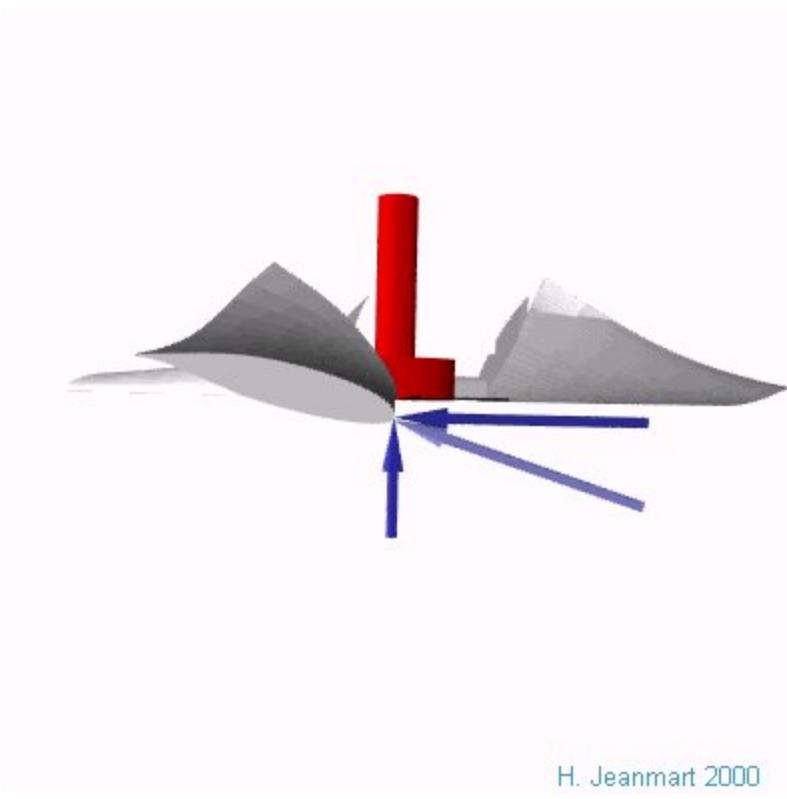
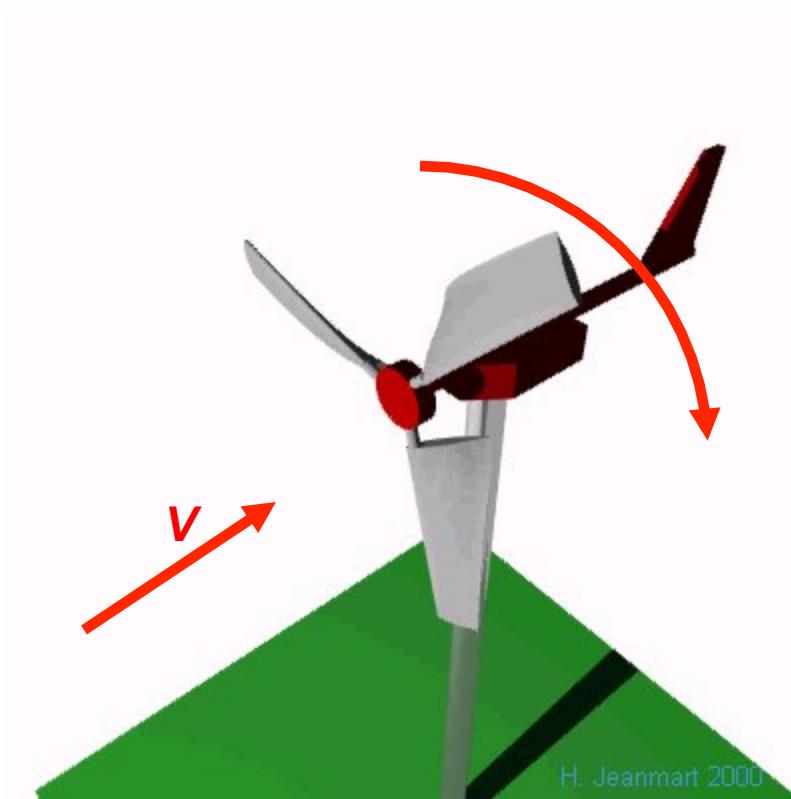
Calcul de l’énergie produite annuellement

**Aérodynamique des pales**

Gestion aérodynamique de l’éolienne

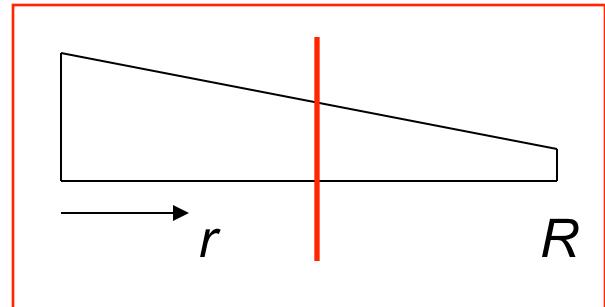
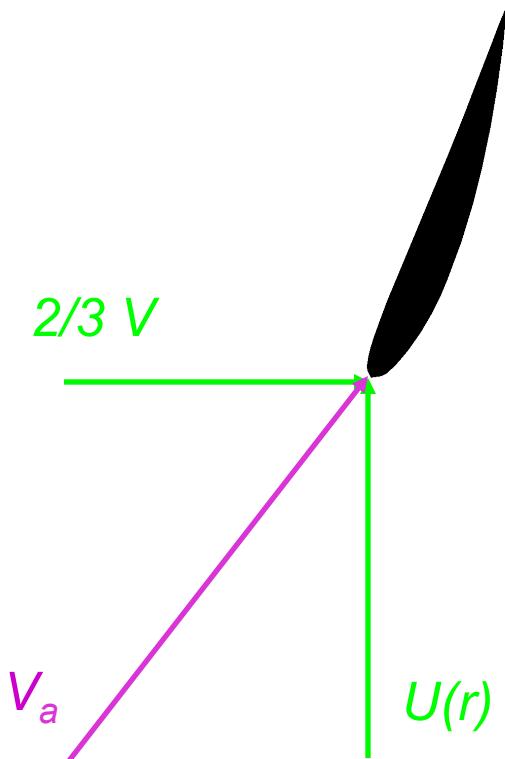
Gestion électrique de l’éolienne

# Aerodynamic approach



# Aerodynamic approach – velocities

Consider a section along a blade



$V$  is the wind velocity

$U$  is the angular velocity

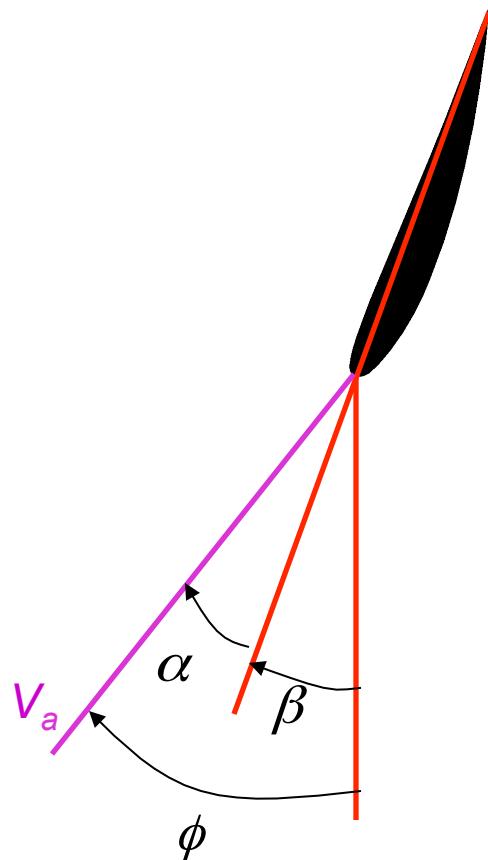
$$U(r) = \frac{r}{R} \lambda V$$

Where  $\lambda$  is the **tip speed ratio**

$$\lambda = \frac{U(r = R)}{V}$$

$V_a$  is the relative velocity between the blade and the air. It is a function of the radial position.

# Aerodynamic approach – Angles

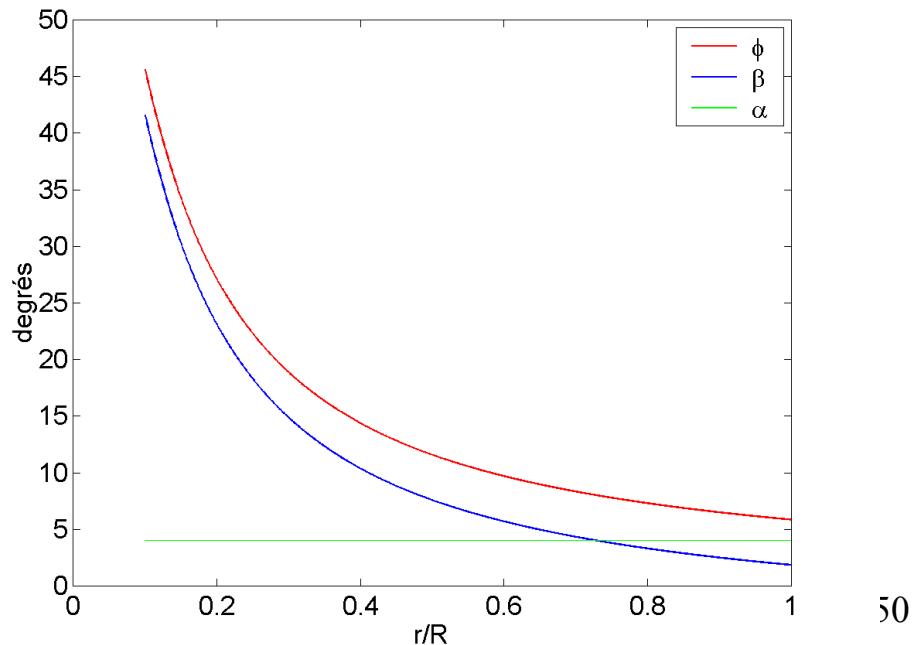


$$\phi = \text{atan} \left( \frac{2}{3\lambda} \left( \frac{R}{r} \right) \right)$$

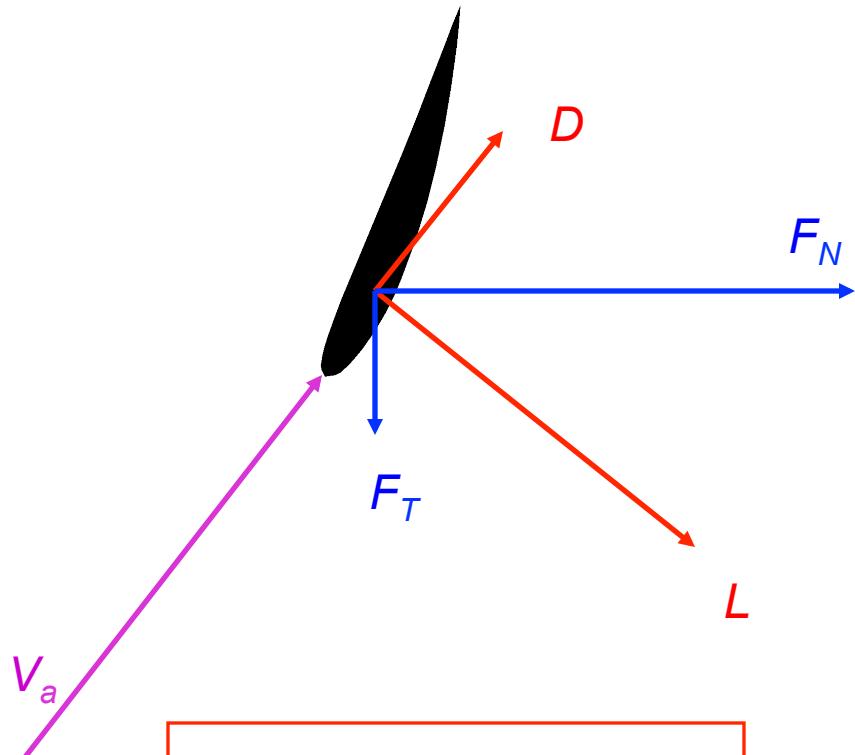
$\phi$  is the angle between the relative velocity and the vertical plane. It is a function of the radial position.

$\beta$  is the pitch angle between the blade chord and the vertical. It is a function of the radial position.

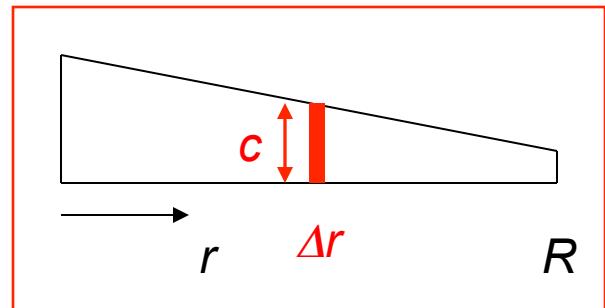
$\alpha$  is the blade angle with the flow. It is a function of the blade profile and the radial position. It is usually taken as a constant for simplified models



# Aerodynamic approach – Forces



$$F_N = L \cos(\phi) + D \sin(\phi)$$
$$F_T = L \sin(\phi) - D \cos(\phi)$$



For a blade section  $\Delta r$ :

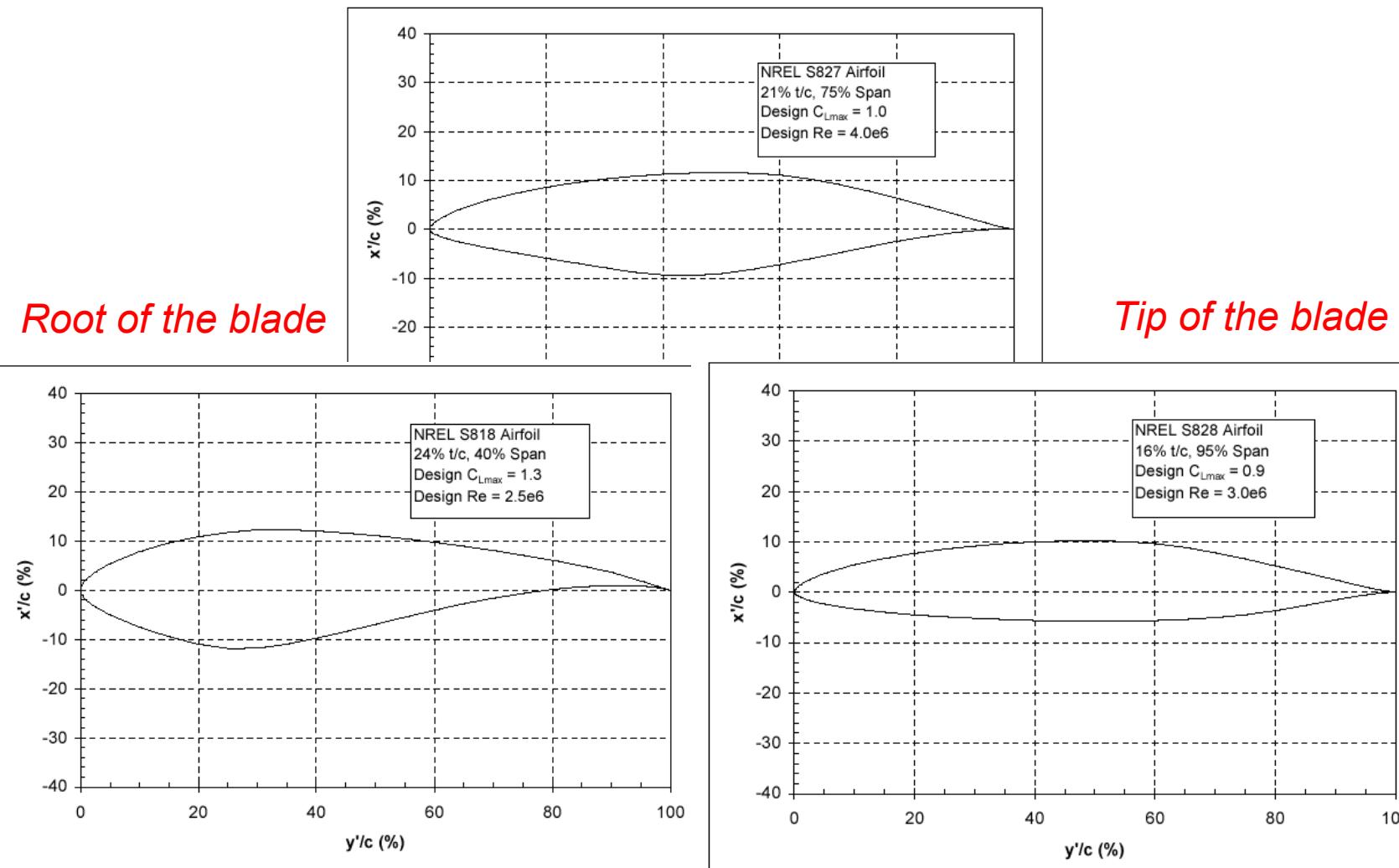
$$L = \frac{1}{2} \rho V_a^2 C_L c \Delta r$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V_a^2 C_D c \Delta r$$

- $C_L$  et  $C_D$  are determined by the blade profile and the angle  $\alpha$ .
- The chord **C** must be evaluated in order to obtain L and D.

# Aerodynamic approach – Profiles

## *Basic profile*

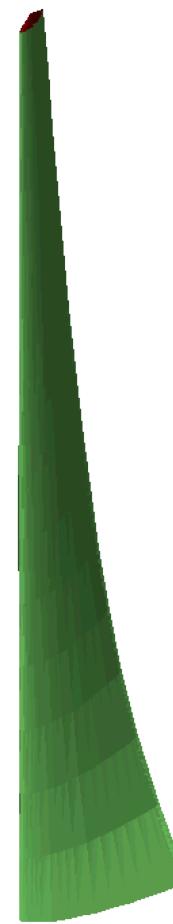
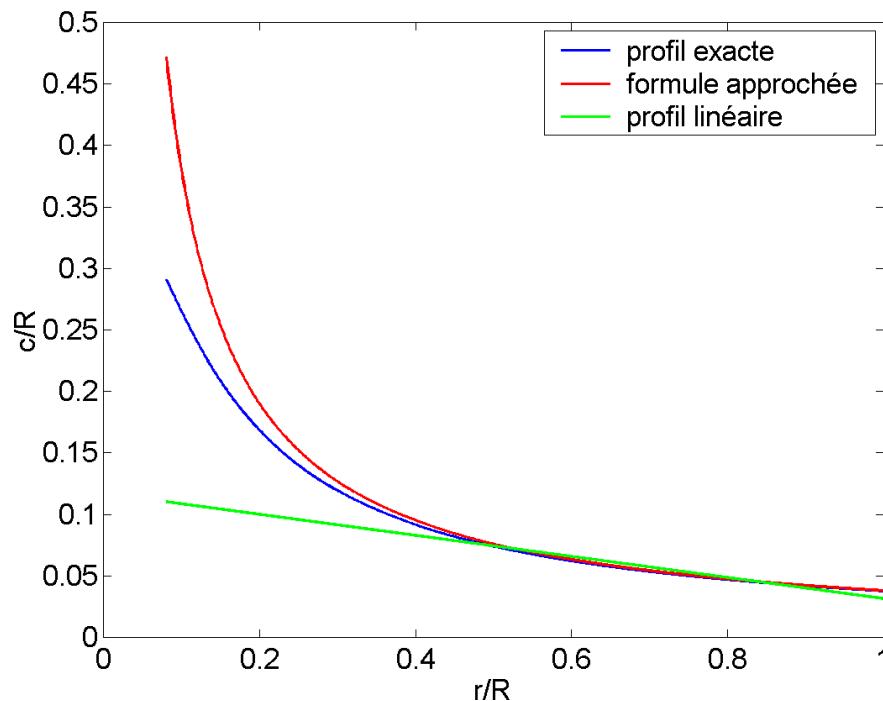


## Aerodynamic approach – The chord

The local value of the chord is determined by a momentum balance between the upstream and downstream velocities. We assume a 1/3 ratio between the two velocities following Betz theory.

The approximate chord profile is thus :  
where B is the number of blades

$$c = \frac{16\pi R}{9\lambda^2 B} \left( \frac{R}{r} \right)$$



# Aerodynamic approach – Torque and power

Total torque on the rotor :

$$T = B \int_0^R F_T r dr$$

Total power

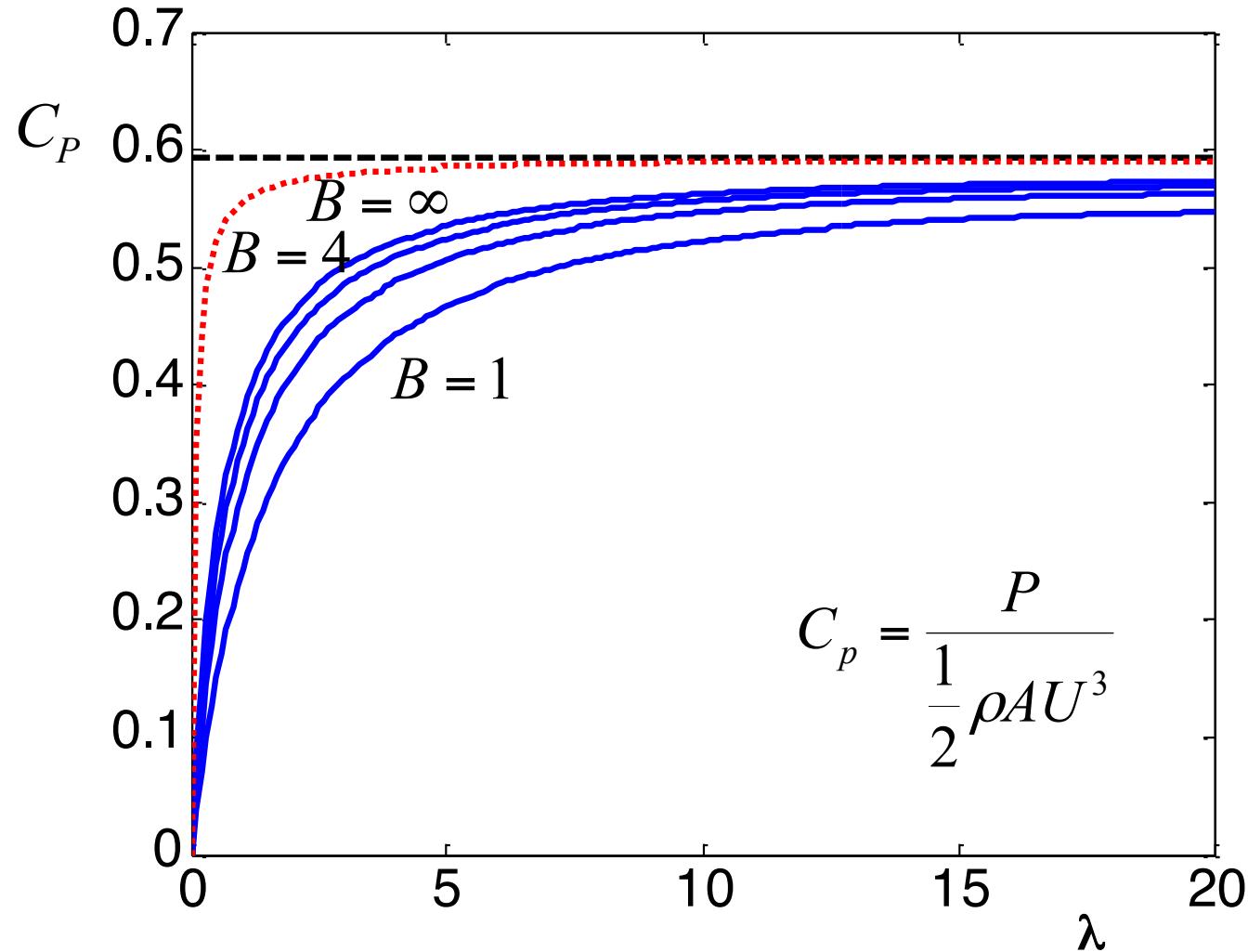
$$P = T\omega$$

$$\omega = \frac{rpm}{2\pi 60} \quad \text{et} \quad rpm = \frac{60\lambda V}{2\pi R}$$

Examples :

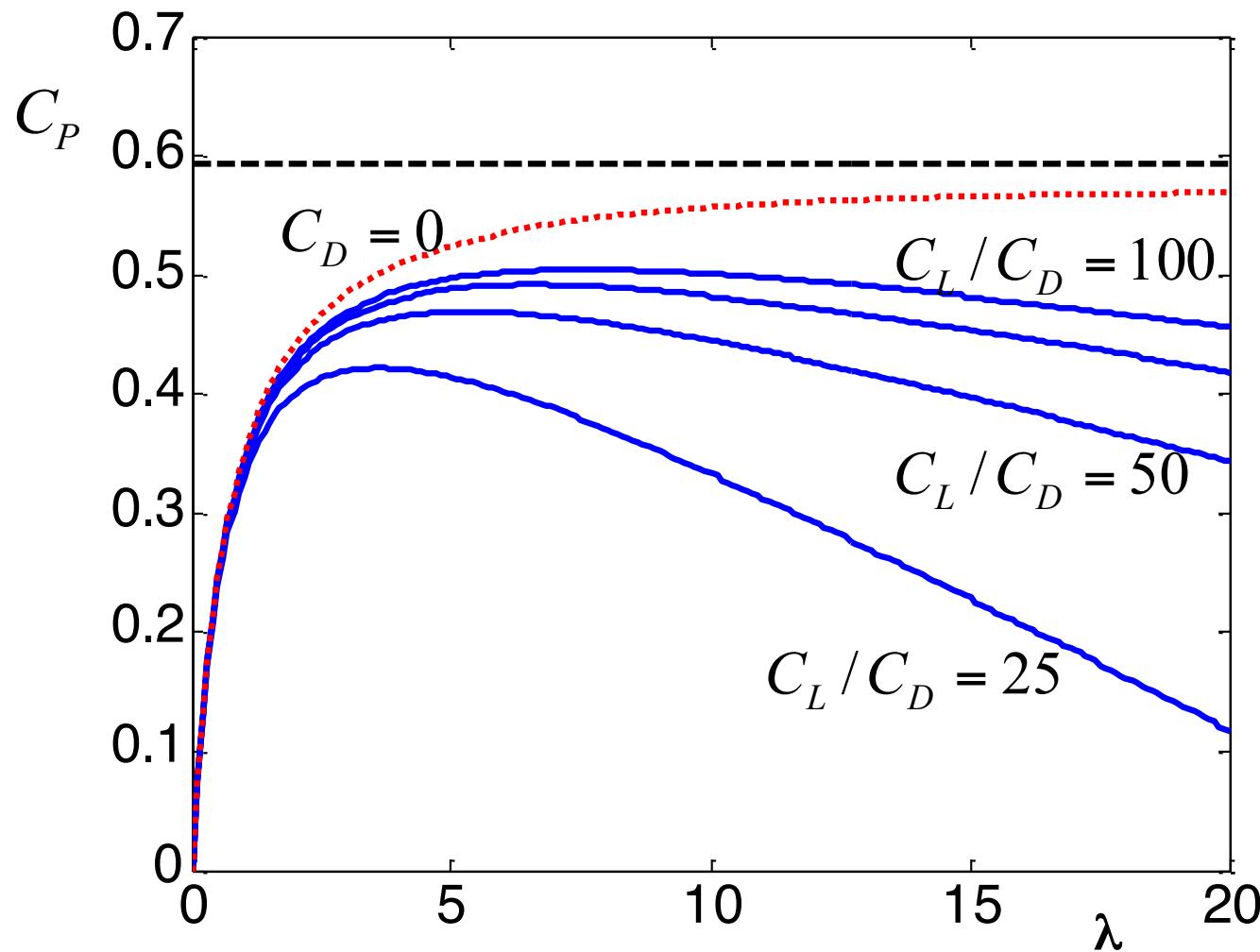
| V<br>[m/s] | Rmin<br>[m] | Rmax<br>[m] | $\lambda$ | rpm<br>[tr/min] | T<br>[Nm] | P<br>[kW] |
|------------|-------------|-------------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| 10         | 0,1         | 1           | 8         | 764             | 8,6       | 0,6       |
| 10         | 1           | 10          | 7         | 67              | 1,10E+04  | 75        |
| 10         | 2           | 25          | 7         | 27              | 1,70E+05  | 470       |
| 10         | 3           | 30          | 6         | 19              | 3,60E+05  | 790       |

## Aerodynamic approach – Power vs number of blades



$$C_D = 0$$

## Aerodynamic approach – Power vs blade characteristics



$$B = 3$$

Caractérisation du vent

Potentiel éolien et production

Caractérisation globale des éoliennes

Différents types d ‘éoliennes

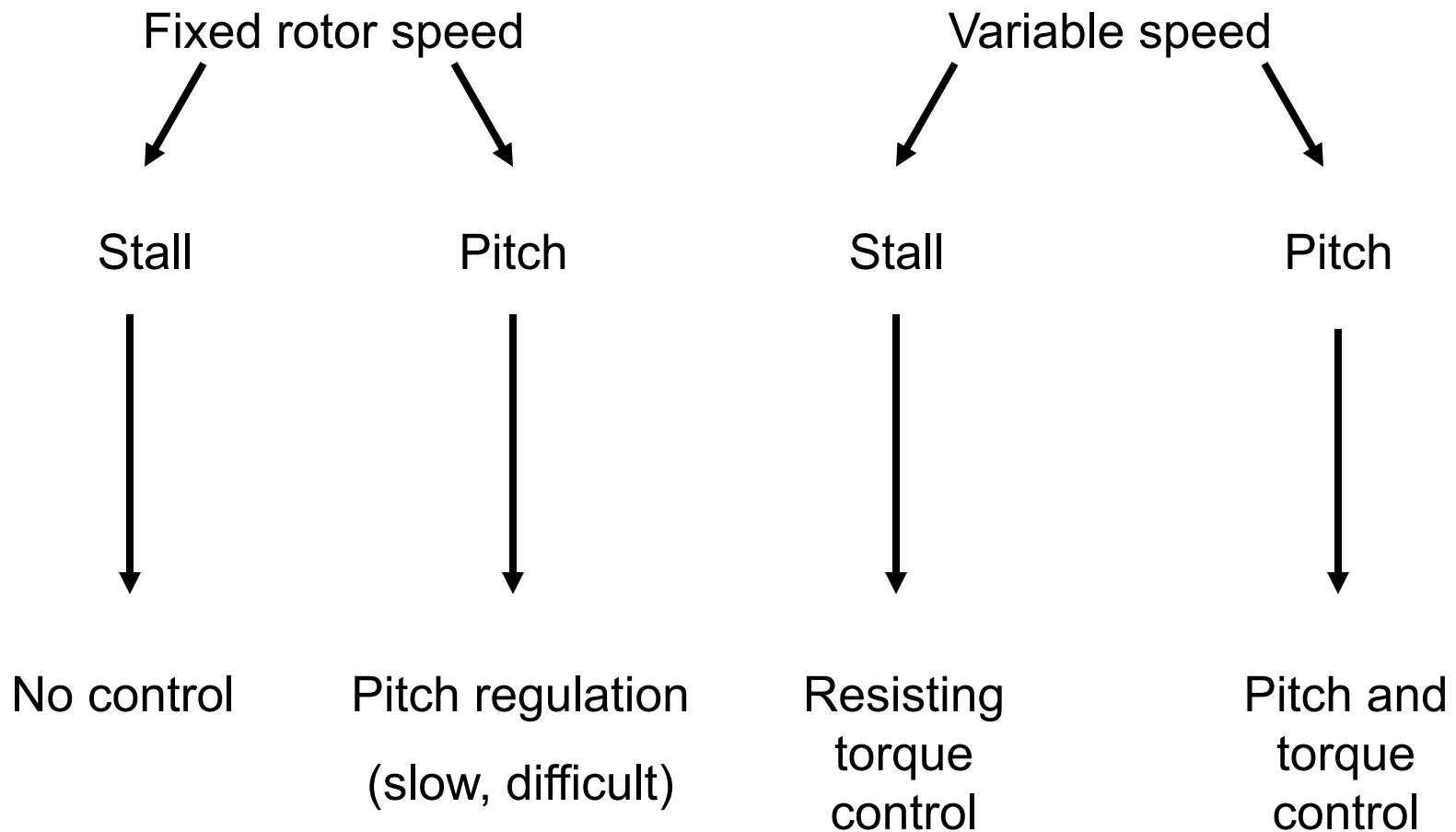
Calcul de l’énergie produite annuellement

Aérodynamique des pales

**Gestion aérodynamique de l’éolienne**

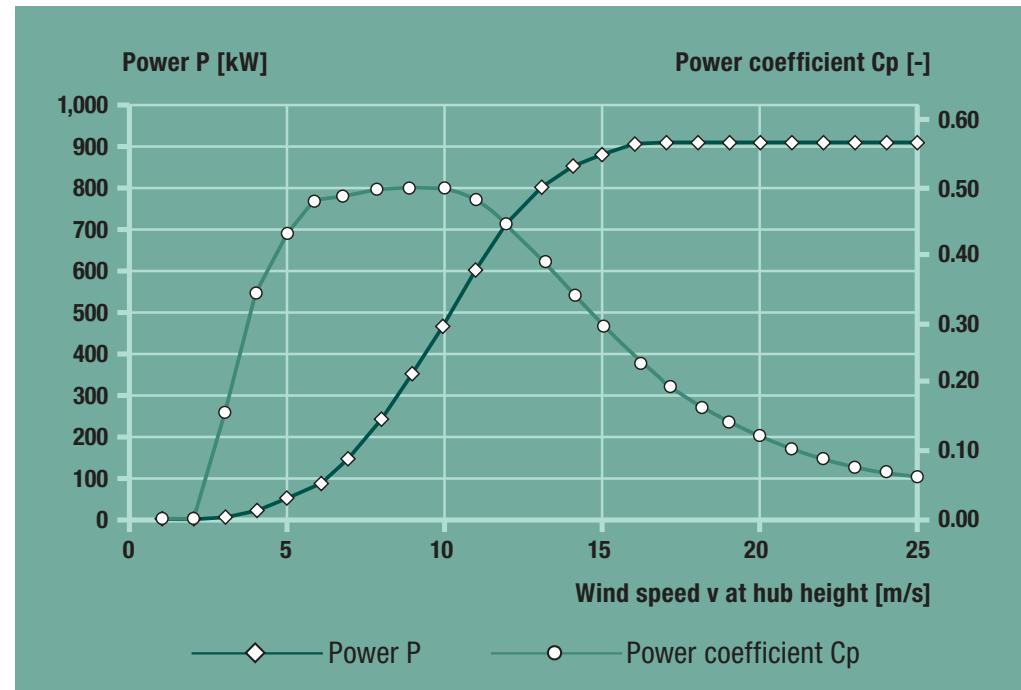
Gestion électrique de l’éolienne

# Control systems – methods



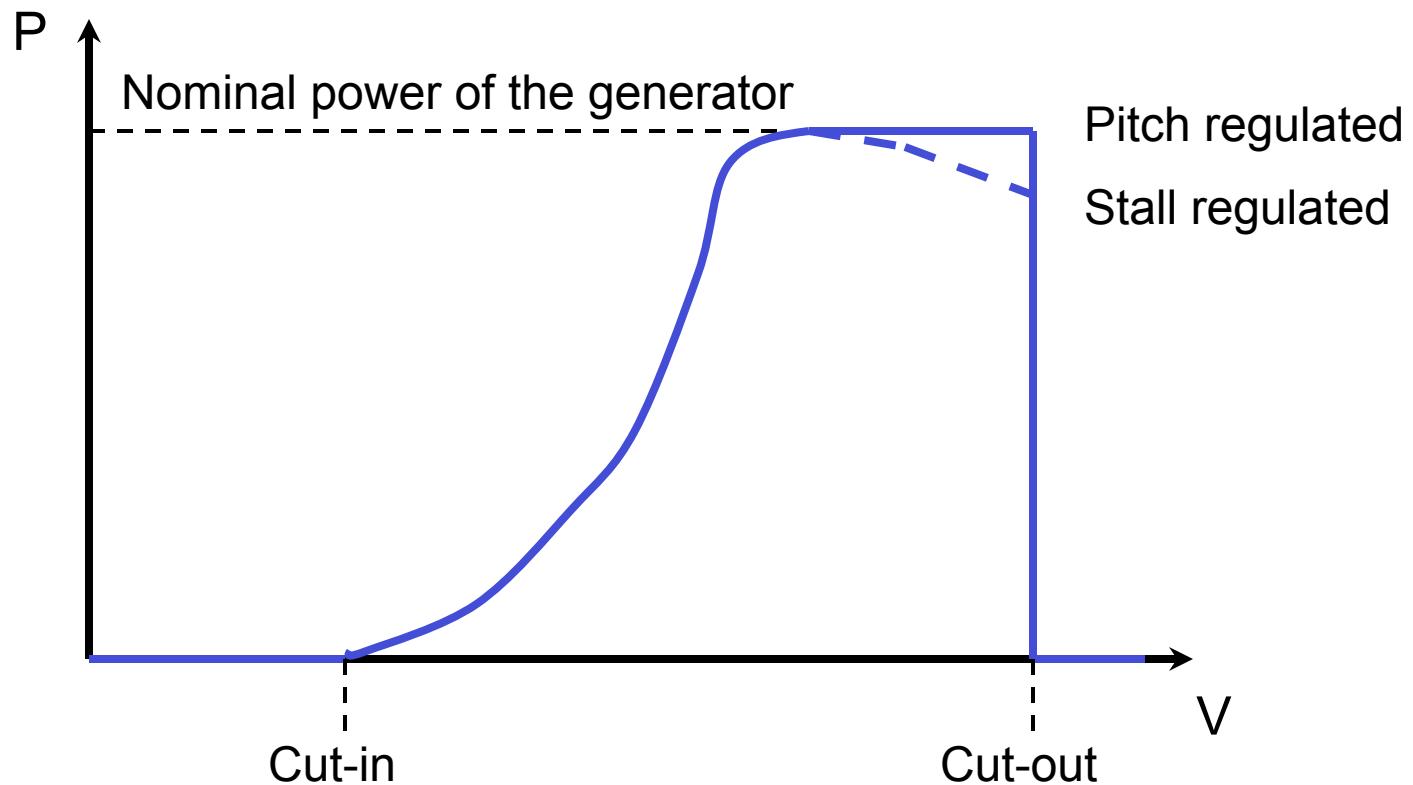
# Power coefficient vs wind speed : pitch control, why?

| Wind [m/s] | Power P [kW] | Power coefficient Cp [-] |
|------------|--------------|--------------------------|
| 1          | 0.0          | 0.00                     |
| 2          | 0.0          | 0.00                     |
| 3          | 4.0          | 0.16                     |
| 4          | 20.0         | 0.34                     |
| 5          | 50.0         | 0.43                     |
| 6          | 96.0         | 0.48                     |
| 7          | 156.0        | 0.49                     |
| 8          | 238.0        | 0.50                     |
| 9          | 340.0        | 0.50                     |
| 10         | 466.0        | 0.50                     |
| 11         | 600.0        | 0.48                     |
| 12         | 710.0        | 0.44                     |
| 13         | 790.0        | 0.39                     |
| 14         | 850.0        | 0.33                     |
| 15         | 880.0        | 0.28                     |
| 16         | 905.0        | 0.24                     |
| 17         | 910.0        | 0.20                     |
| 18         | 910.0        | 0.17                     |
| 19         | 910.0        | 0.14                     |
| 20         | 910.0        | 0.12                     |
| 21         | 910.0        | 0.11                     |
| 22         | 910.0        | 0.09                     |
| 23         | 910.0        | 0.08                     |
| 24         | 910.0        | 0.07                     |
| 25         | 910.0        | 0.06                     |



Source: Enercon

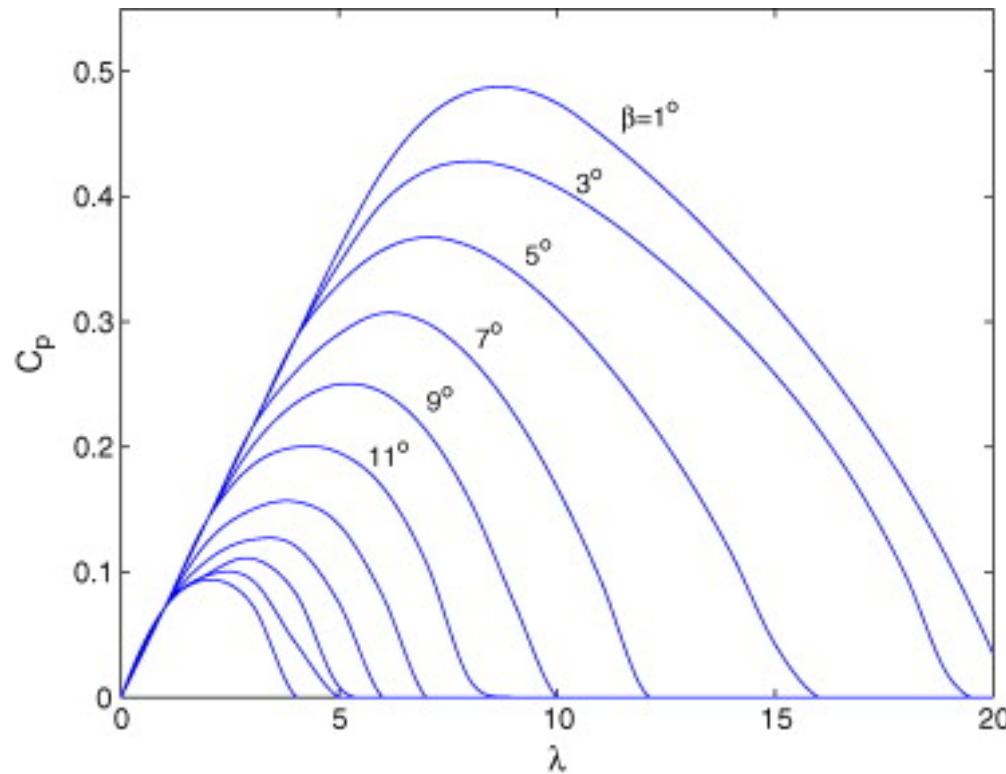
# Control systems – Power curve



Aim:

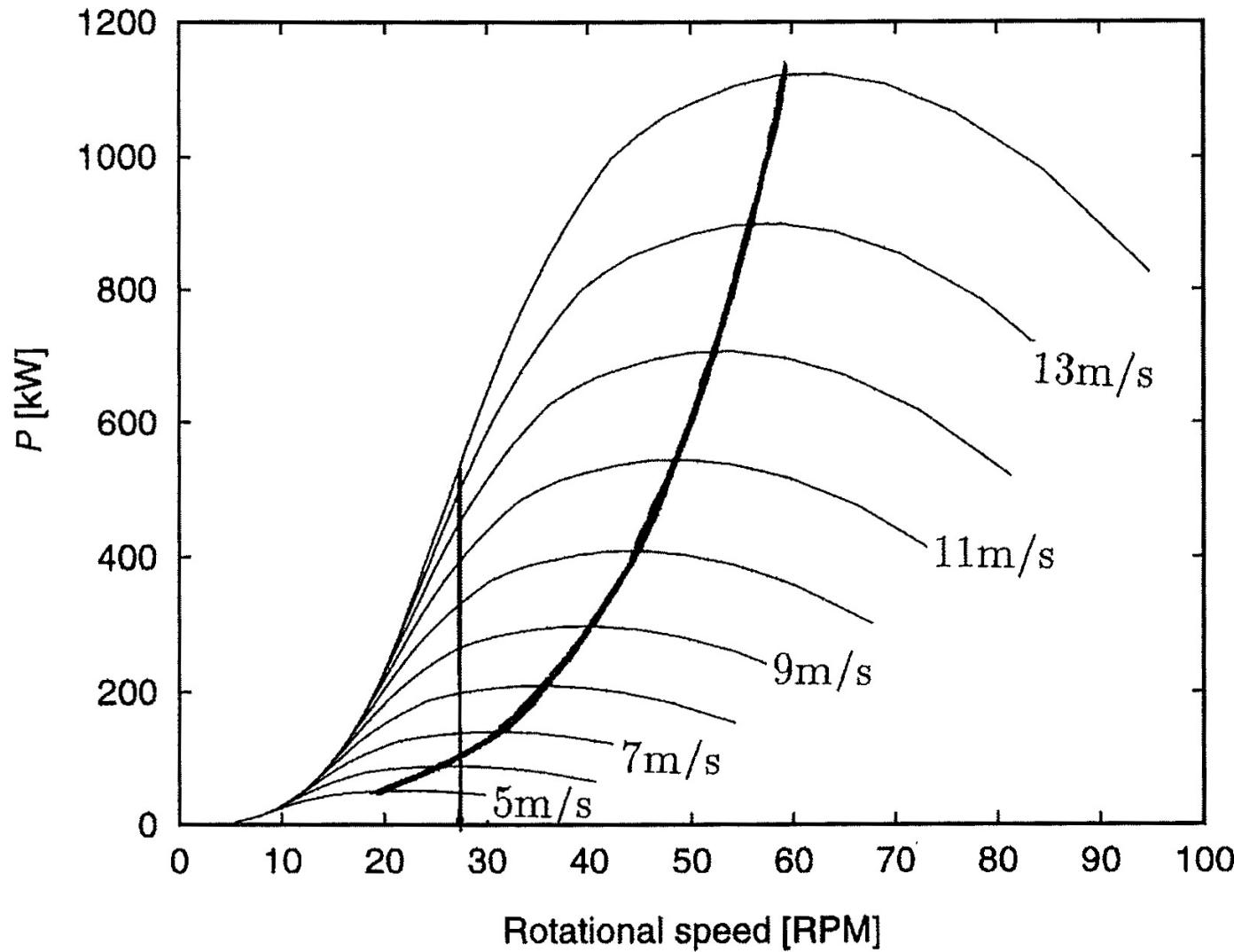
Get the maximal power from the wind at all velocities

# Power coefficient vs tip speed and pitch angle

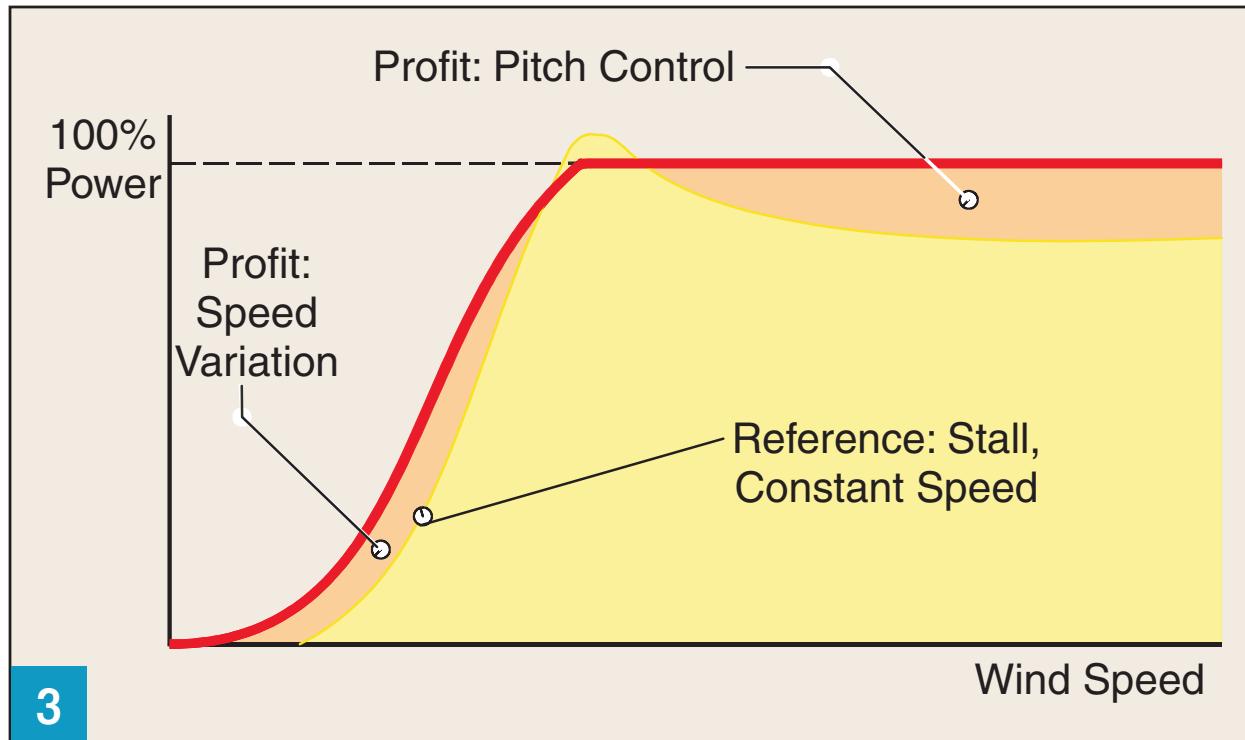


Si la vitesse de rotation est fixe, il existe une seule valeur optimale de vitesse de vent => vitesse variable  
Si l'angle de calage est fixe, il existe une seule valeur optimale de TSR (Tip Speed Ratio) => angle variable

# Travailler à vitesse variable augmente le rendement



# Gains with variable speed (below rated power) and pitch control (at rated power)



Efficiency gains due to adjustable speed wind turbines.