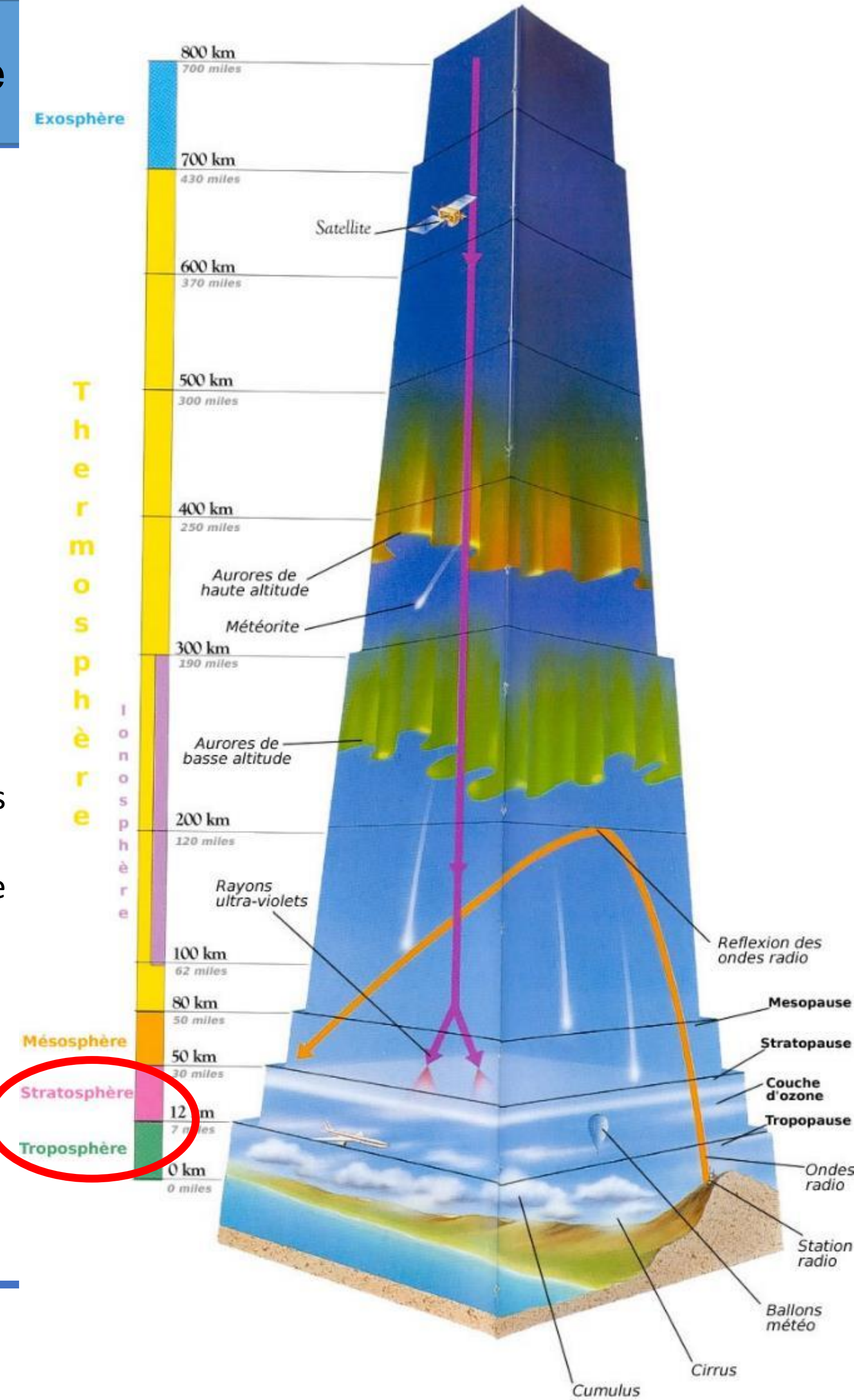
De la mesure du vent à la production éolienne

JC. Dupont

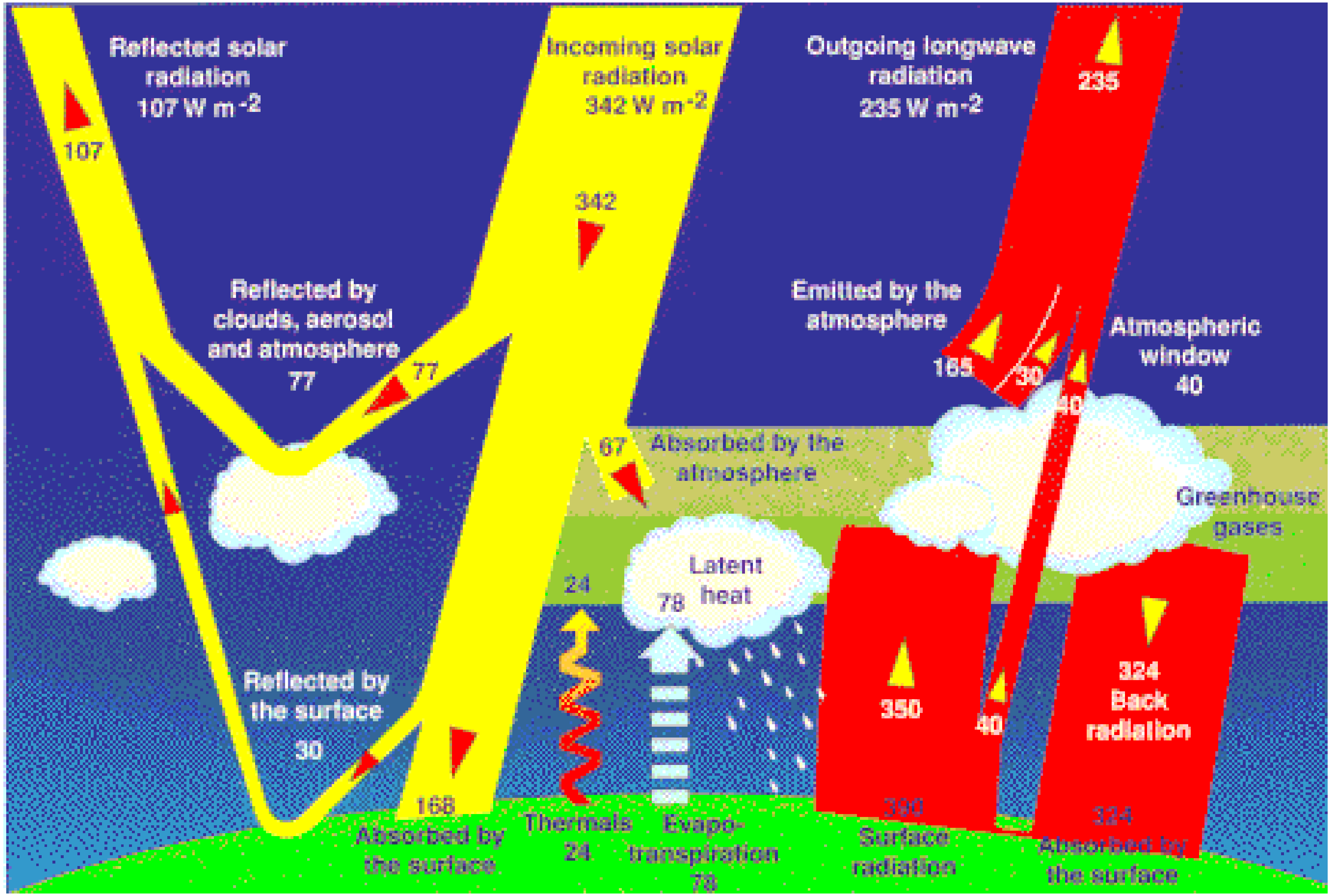
jean-charles.dupont@ipsl.polytechnique.fr

Structure verticale de l'atmosphère

- A l'échelle météorologique, l'atmosphère se divise en 2 régions :
  - **<u>La Stratosphère (z>11-12 km)</u>**
    - peu de mouvement d'air
  - **<u>La Troposphère (0<z<11-12 km)</u>**
    - Région où se produit tous les phénomènes météorologiques
    - Contient entre 80 et 85% de la masse totale de l'atmosphère
    - Contient presque toute l'eau atmosphérique

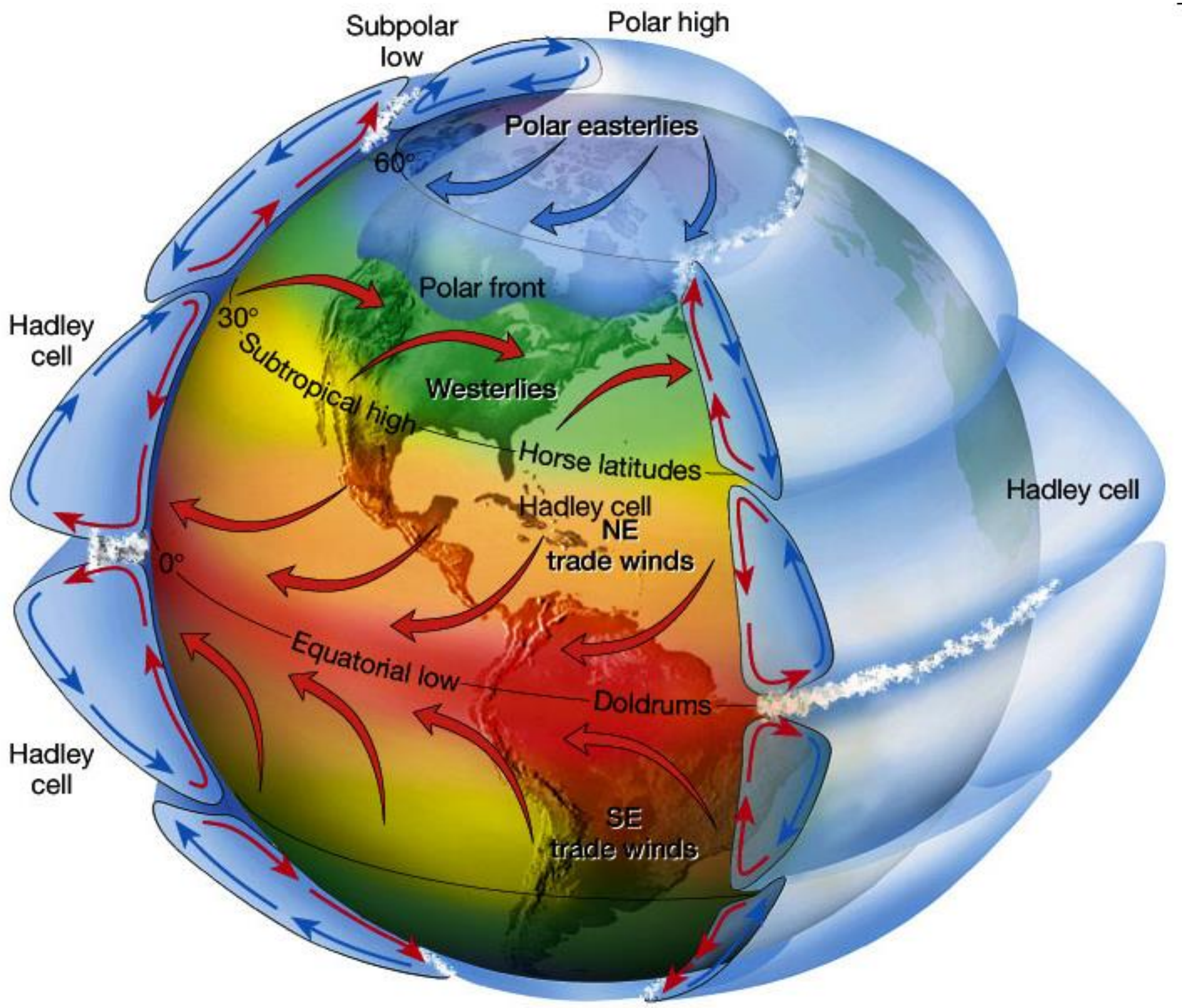


Bilan d'énergie de la Terre

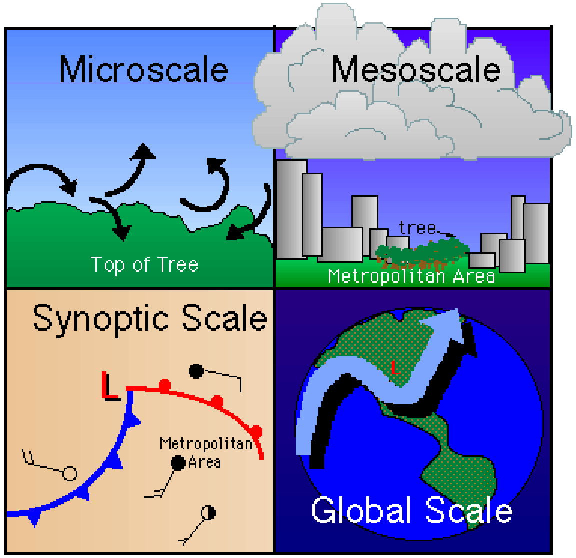


- The Sun heats the equatorial regions much more than the polar regions. In response to this, three cells develop.

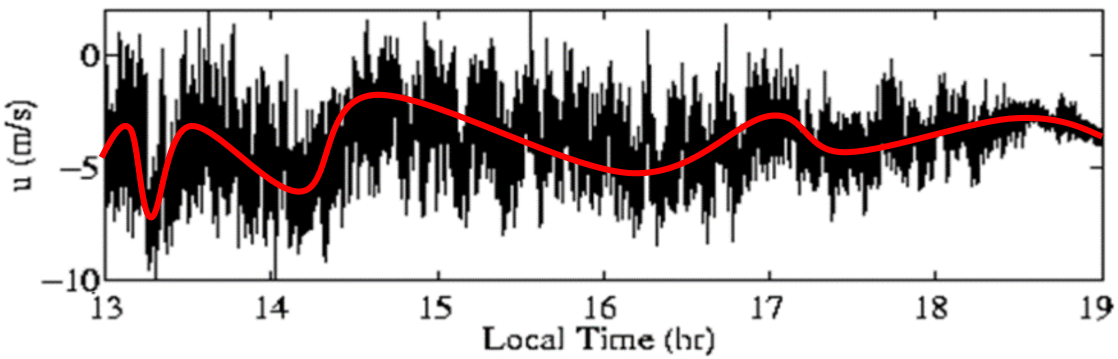
- The Earth rotates so air traveling southward from the north pole will be deflected to the right. Air traveling northward from the south pole will be deflected to the left.

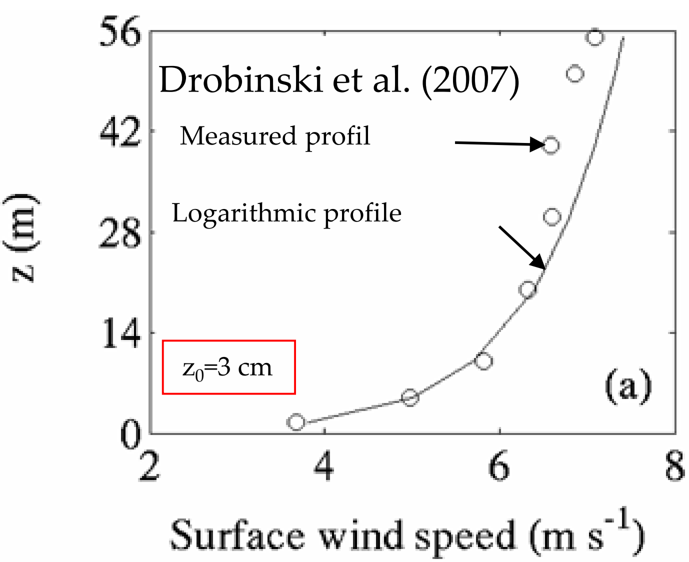


Variabilité du vent à différentes échelles 1/2



Scale separation ($\overline{q} = \mathbf{q} + q'$)





Logarithmic profile of the horizontal wind speed (up to about 100 m height)

$$\overline{U}(z) = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Roughness length z_0 : Whilst it is not a physical length, it can be considered as a length-scale a representation of the roughness of the surface: ice: 10^{-5} m; ocean ($10^{-4} - 10^{-3}$ m); trees ($2\times10^{-2} - 10^{-1}$ m); towns ($6\times10^{-1} - 2$ m)

Caractéristiques du vent

Vitesse moyenne

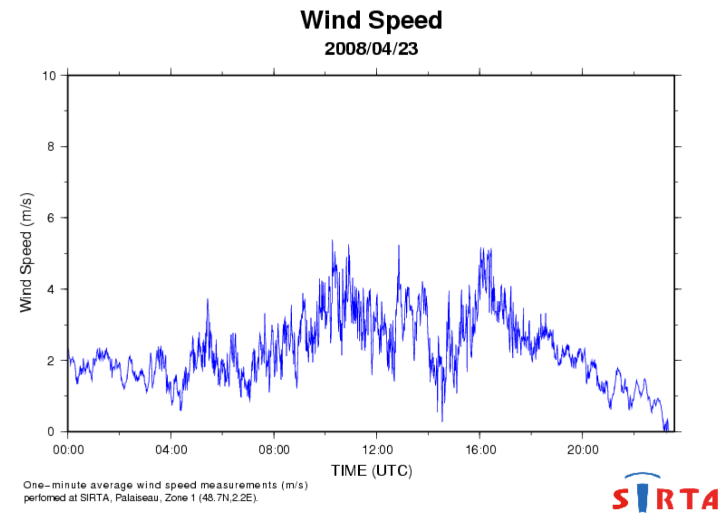
$$u = U + \widetilde{u}$$

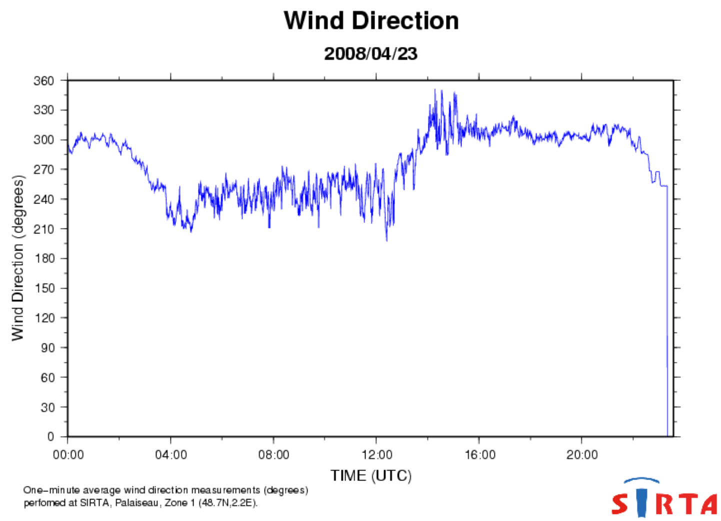
$$U = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} u_i$$

Fluctuation de vitesse de vent

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\times\sum_{i=1}^{n}(u_i - U)^2}$$

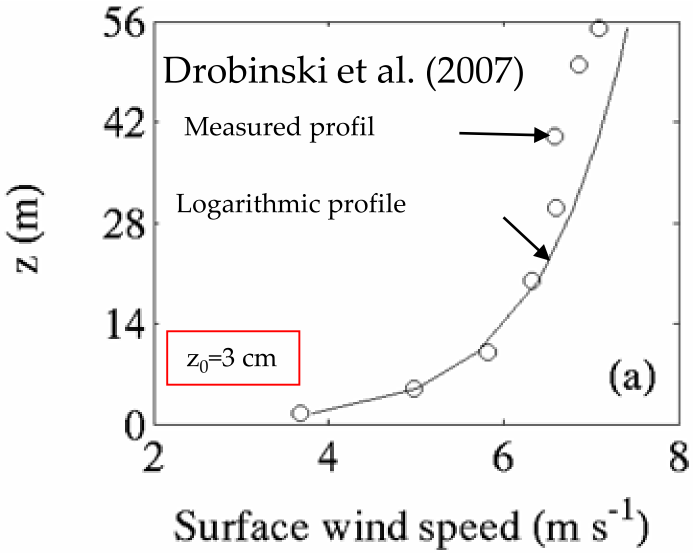
Variations à court terme importantes à considérer pour les charges maximales, la fatigue et la qualité de la puissance



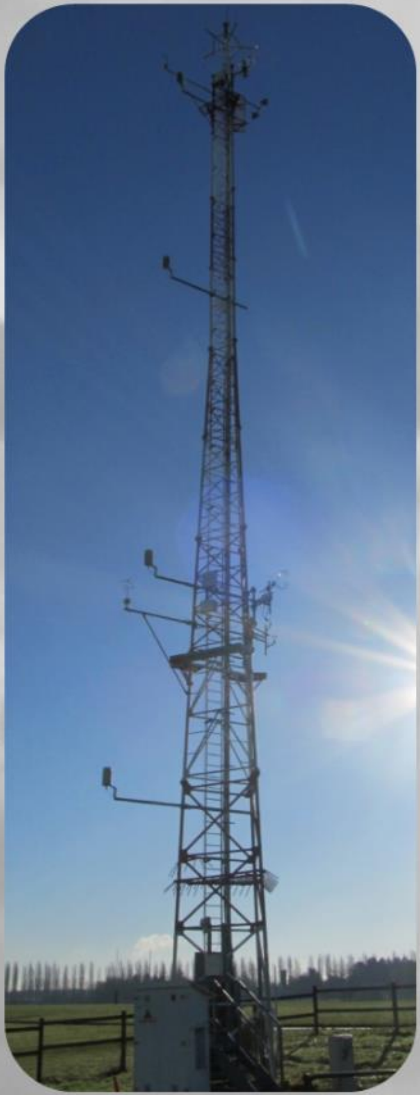


Sous-couche rugueuse et hauteur de rugosité z_0

Sites caractéristiques	Classes de rugosité	z_0 (m)
Grandes étendues d'eau (mer, océan, lac)	I	de 0,001 à 0,01
Rases campagnes, aéroports	II	de 0,01 à 0,10
Zones faiblement urbanisées, bocages	III	de 0,10 à 0,50
Zones urbanisées, industrielles ou forestières	IV	de 0,50 à 1,50
Centres des villes	V	de 1,50 à 2,50



Moyens de mesures



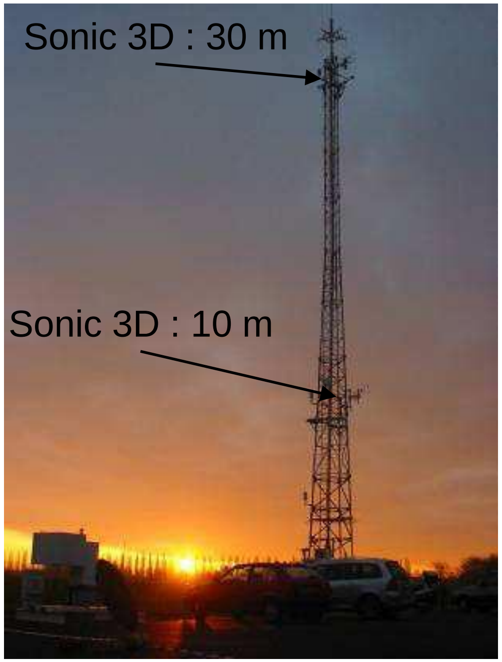
Mesure du profil vertical du vent sur un mât de 30 m

Mesure du vent par anémométrie sonique

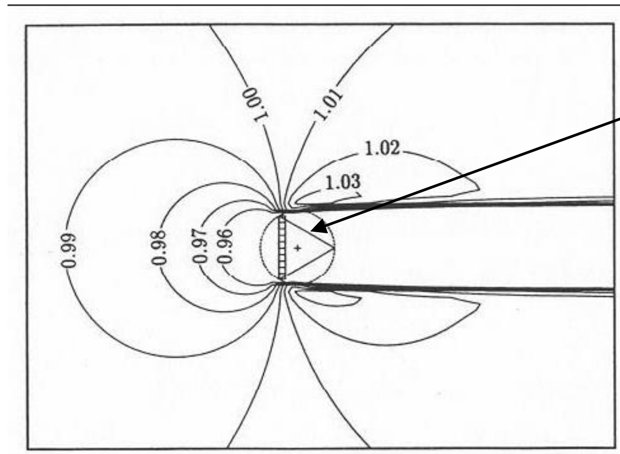
Mesure du vent par lidar

Mesure du vent par sodar

Mesure de la vitesse du vent sur le SIRTA
Influence du mât de mesure



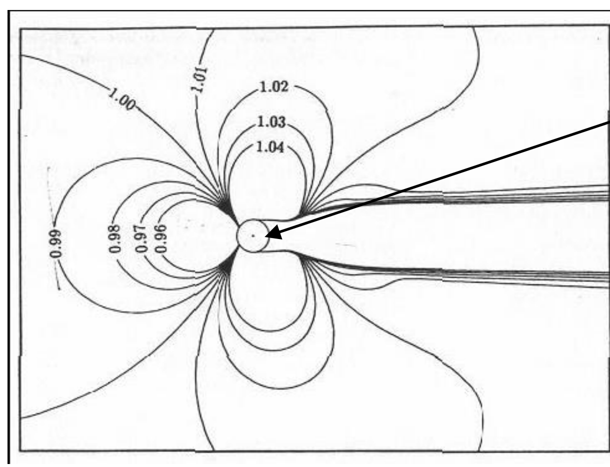
Mât météorologique de 30 m



Tour en treillis

<u>Instruments installés</u> :

- à 90 ° par rapport au vent dominant
- à 6 diamètres de la tour



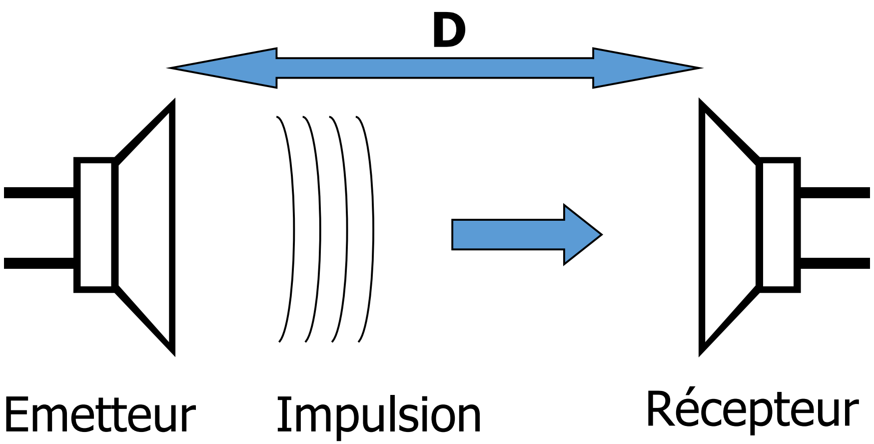
Tour tubulaire

<u>Instruments installés</u> :

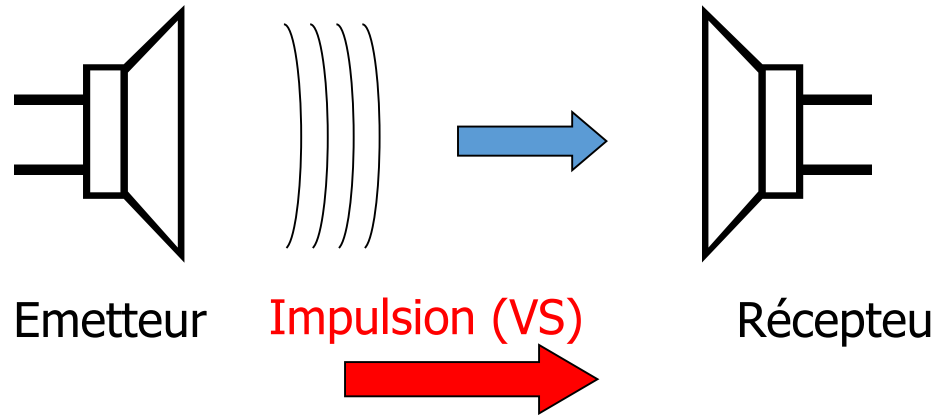
- à 45 ° par rapport au vent dominant
- à 8.5 diamètres de la tour

Exemple de capteur

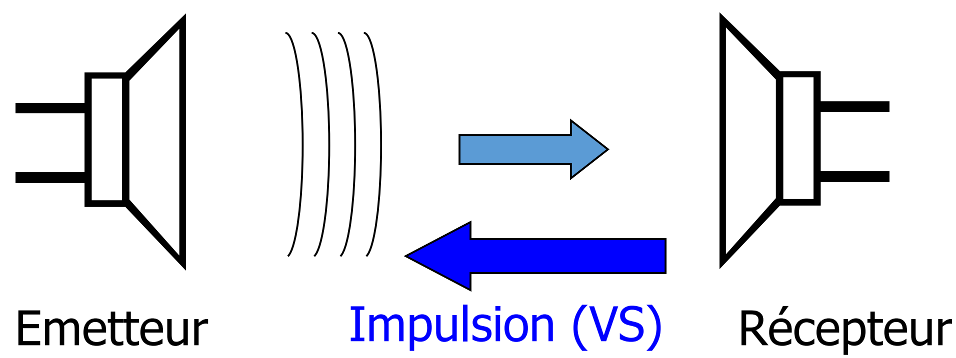
Principe de la mesure ultrasonique



Cas n°1: Composante du vecteur vent sur l'axe de mesure.



Cas n°2: Composante du vecteur vent sur l'axe de mesure.



<u>Trajet aller :</u>

$D=(V_S+V_V)\ t_1$ (Cas 1)

<u>Trajet retour :</u>

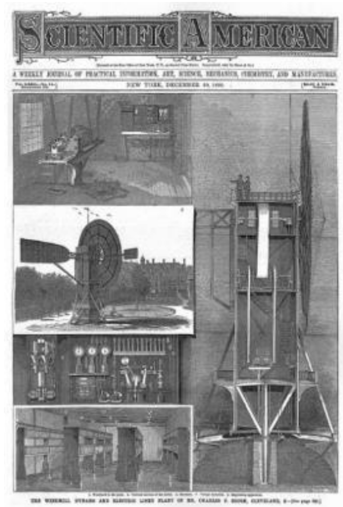
$D=(V_S-V_V)\ t_2$ (Cas 2)

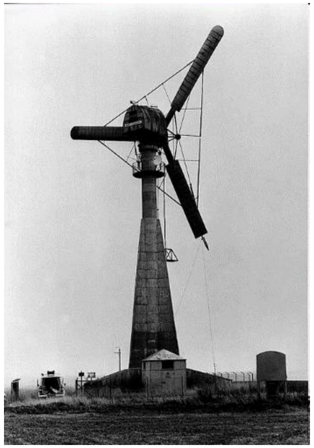
⇨ V_S : calcul de T et Hr

⇨ V_V : *u*, *v* et *w* : 3D

- t_1 et t_2 sont des grandeurs mesurées par le système.
- D est une grandeur connue par fabrication.

Un peu d’histoire…





Antiquity — Windmills used as a grinding mill

1100 — In Europe, first windmills used as pumps.

1887 — Charles F. Brush (USA) builds first windturbine producing electricity.

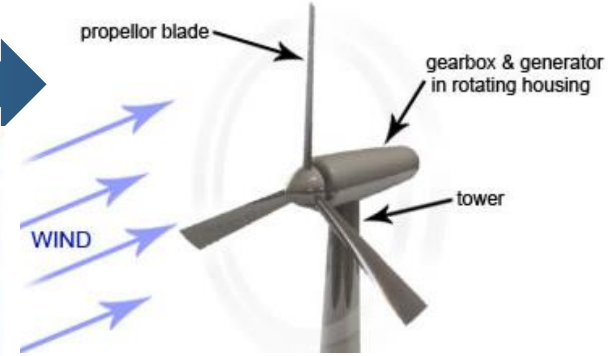
Poul la Cour develops several experimental windmills and conduct research in wind tunnels.

1957 — Johannes Juul buids the Gedser windturbine, precursor of the modern windmills.

First half of XXth century, windmills confronted to tough competition with fossil fuel power plants and the national electricity network. Because of the lack of coal and petroleum during the world wars, wind power production remains used.

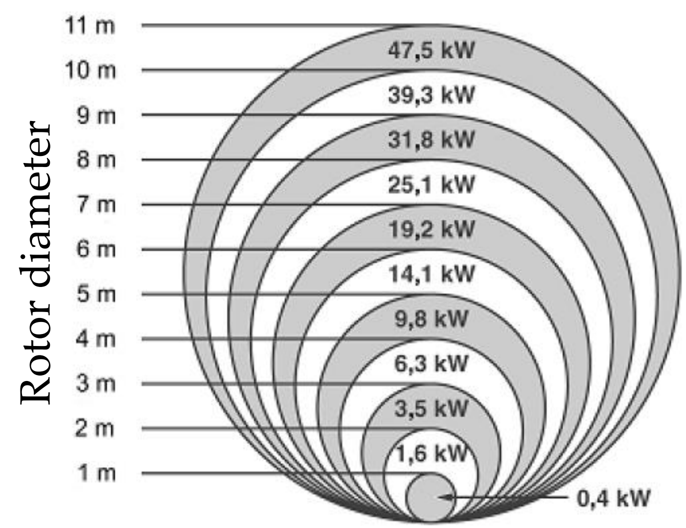
Eolienne à axe horizontale

Large windturbine → Small windturbine



Rotation speed: 10 to 25 per minute → production ~**2MW** (~electricty for 2000 homes, except heating).

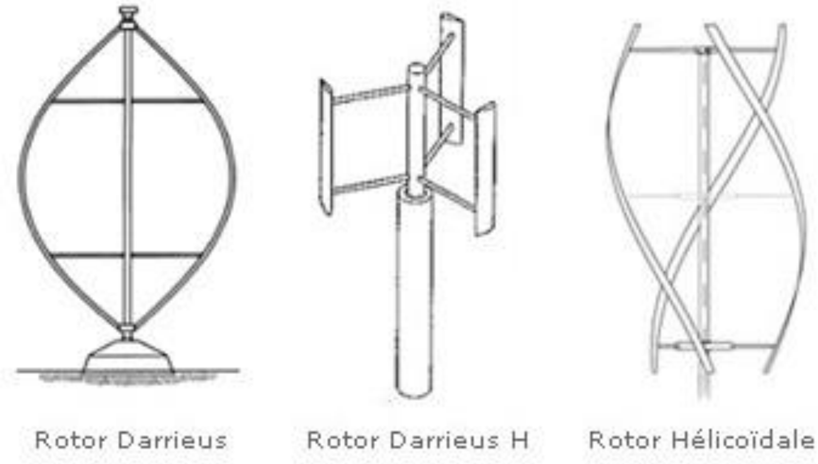
Theoretical wind power production

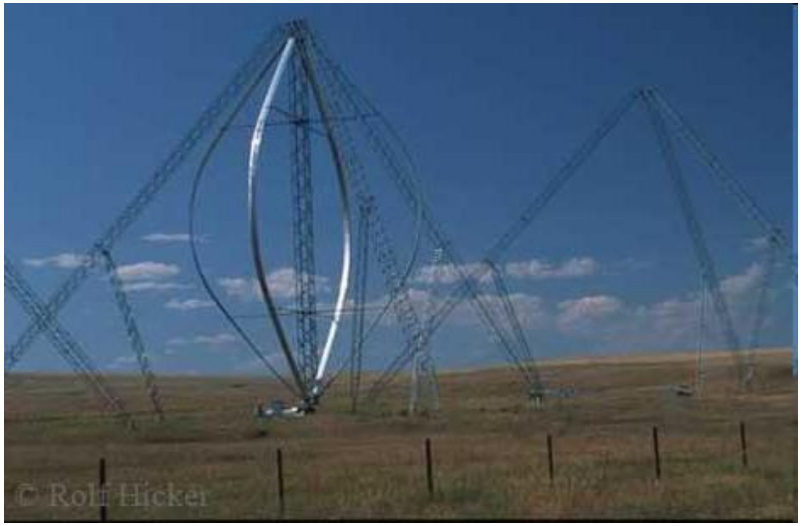


Eolienne à axe vertical

The main rotor shaft is arranged vertically:
→does not need to be pointed into the wind to be effective (advantage on sites with highly variable wind direction).
→generator and gearbox placed near the ground (more accessible for maintenance).

Drawbacks are that some designs produce pulsating torque.





- Wind turbine regulation → extremely variable: definition of wind turbine zones, wind energy price, constraints (environmental protection,…).
- Wind turbine production within the national electricty network
  - When the turbine produces more power than house needs, the extra electricity is sold to the local utility (EDF in France). The electricty price is set by the local utility.
  - Capacity factor: one element in measuring **the productivity of a wind turbine**. It compares the plant's actual production over a given period of time with the amount of power the plant would have produced if it had run at full capacity for the same amount of time.

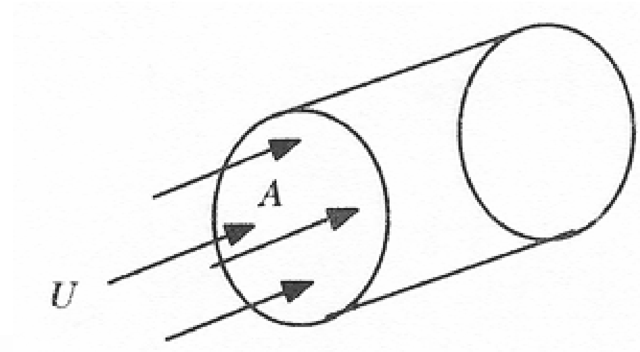
$$\text{Capacity Factor} = \frac{\text{Actual amount of power produced over time}}{\text{Power that would have been produced if turbine operated at maximum output 100\% of the time}}$$

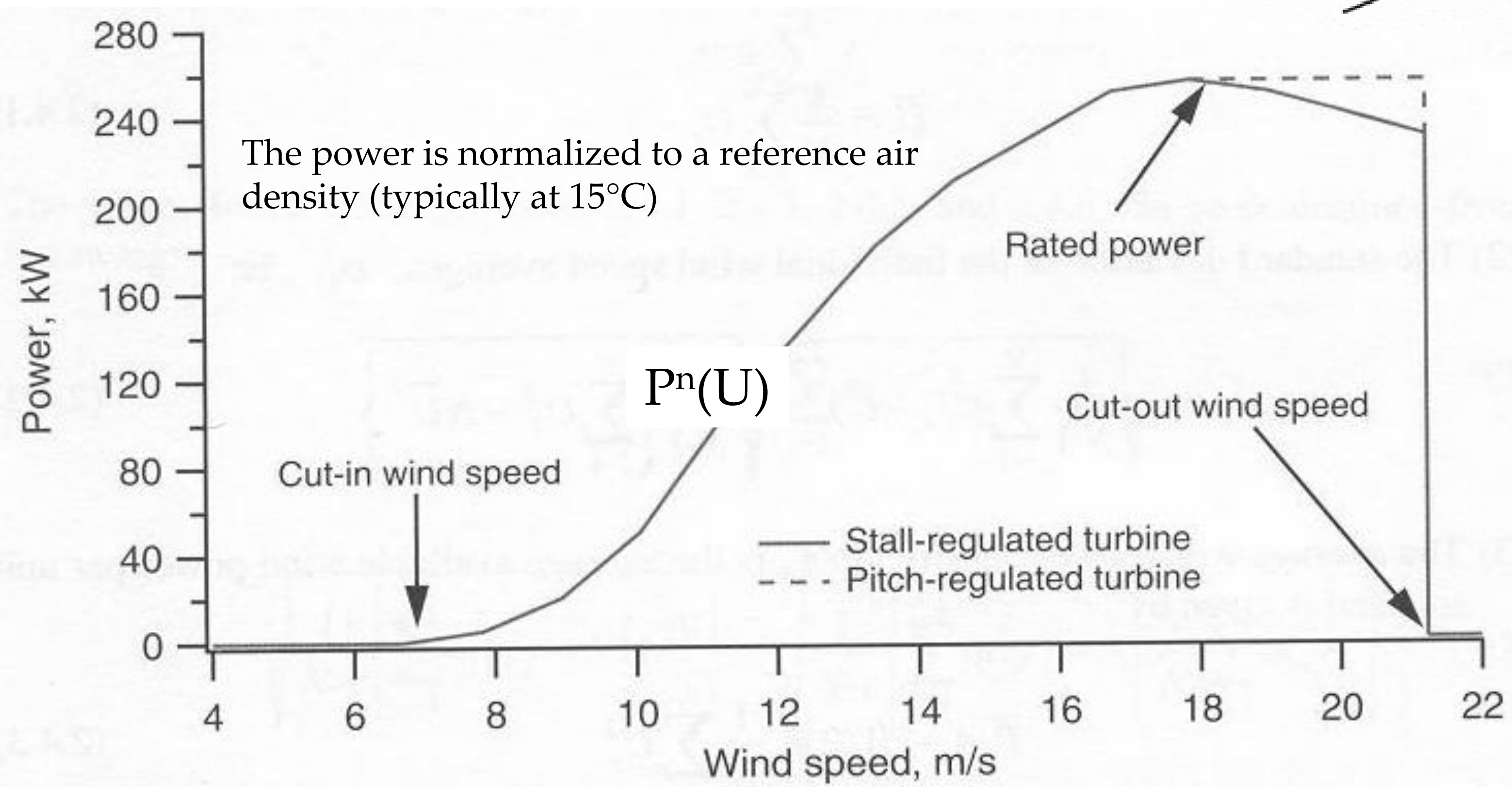
A wind plant is "fueled" by the wind, which blows steadily at times and not at all at other times. Although modern utility-scale wind turbines typically operate 65% to 90% of the time, they often run at less than full capacity. Therefore, a capacity factor of 25% to 40% is common, although they may achieve higher capacity factors during windy weeks or months.

Energie éolienne disponible

Power curve

$$P^n = \frac{1}{2}\rho U^3 A$$ (kinetic energy per unit of time through surface A)





- The total energy available in the wind through a surface A is:

$$P^n = (1/2)\rho A U^3$$

- Wind turbines extract energy by slowing down the wind (it however cannot extract the total energy available in the wind otherwise it would need to stop 100% of the wind; see Betz law). The energy produced by the wind turbine is thus:

$$P_w^n = (1/2) C_p \rho A U^3$$

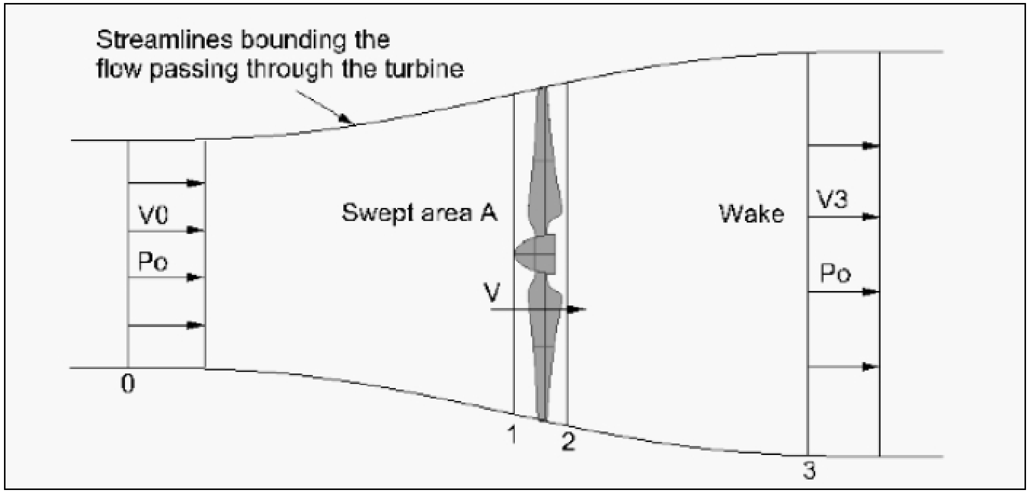
- The coefficient of power of a wind turbine C_p is thus a measurement of how efficiently the wind turbine converts the energy in the wind into electricity

$$C_p = \frac{P_w^n}{P^n} = \frac{\text{Energy produced by wind turbine}}{\text{Total energy available in the wind}}$$

- The idealized Betz law

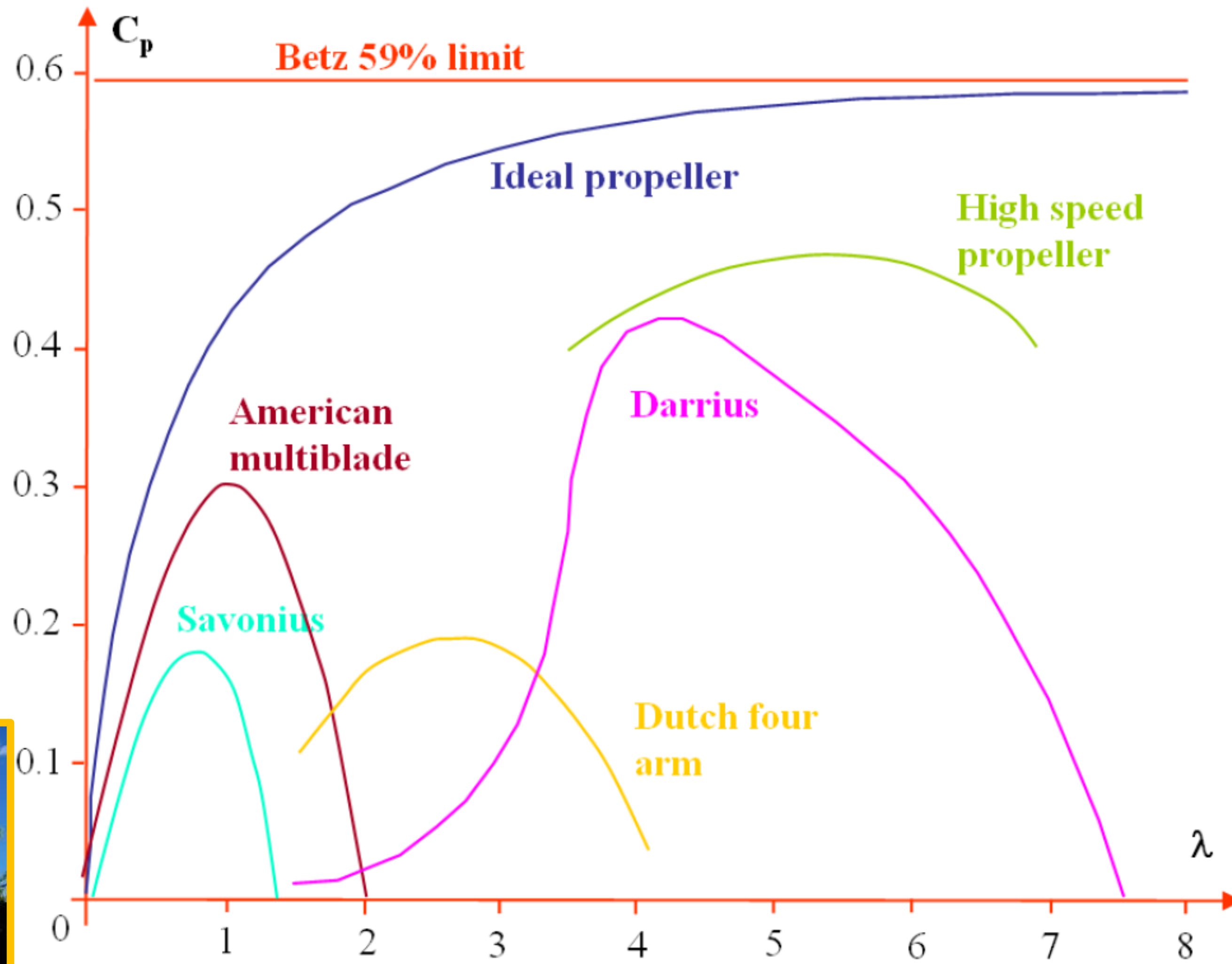
Albert Betz derived in 1920 a theoretical efficiency limit for hydraulic turbines (both wind and water turbines). The main assumption are

1. idealized fluid: we neglect viscous or turbulent dissipation;
2. steady and uniform flow: we neglect spatial and temporal velocity variations;
3. barotropic fluid: the fluid density remains constant.



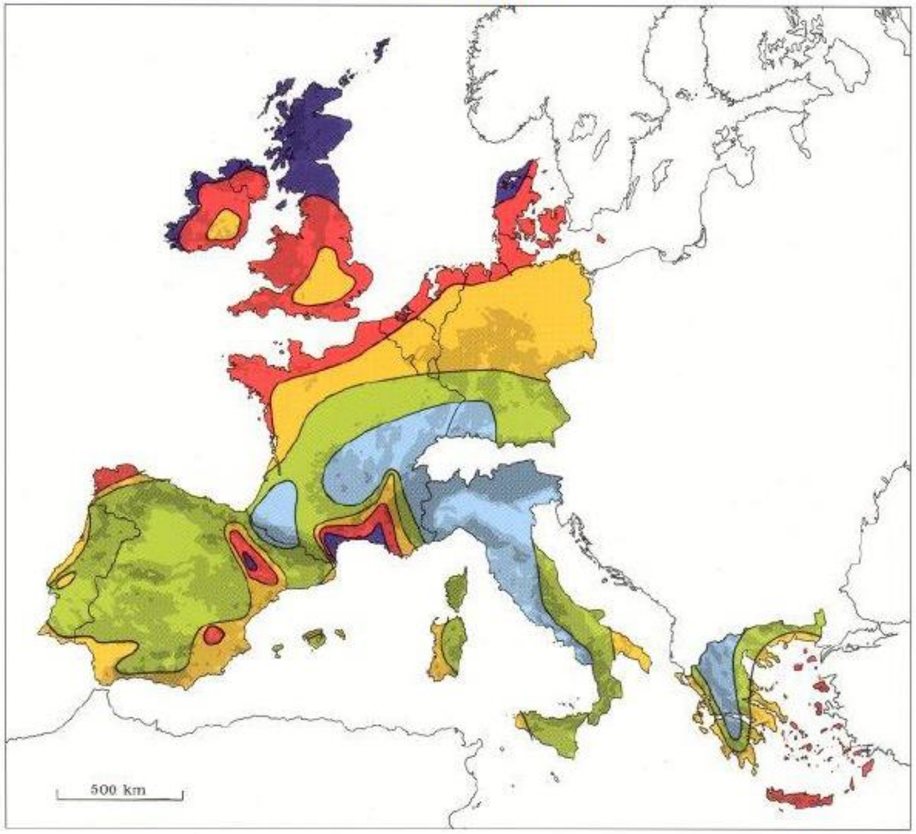
The theoretical efficiency limit is $C_p=16/27{\sim}0.6$

Coefficient de puissance Cp 3/3



Gisement éolien en Europe

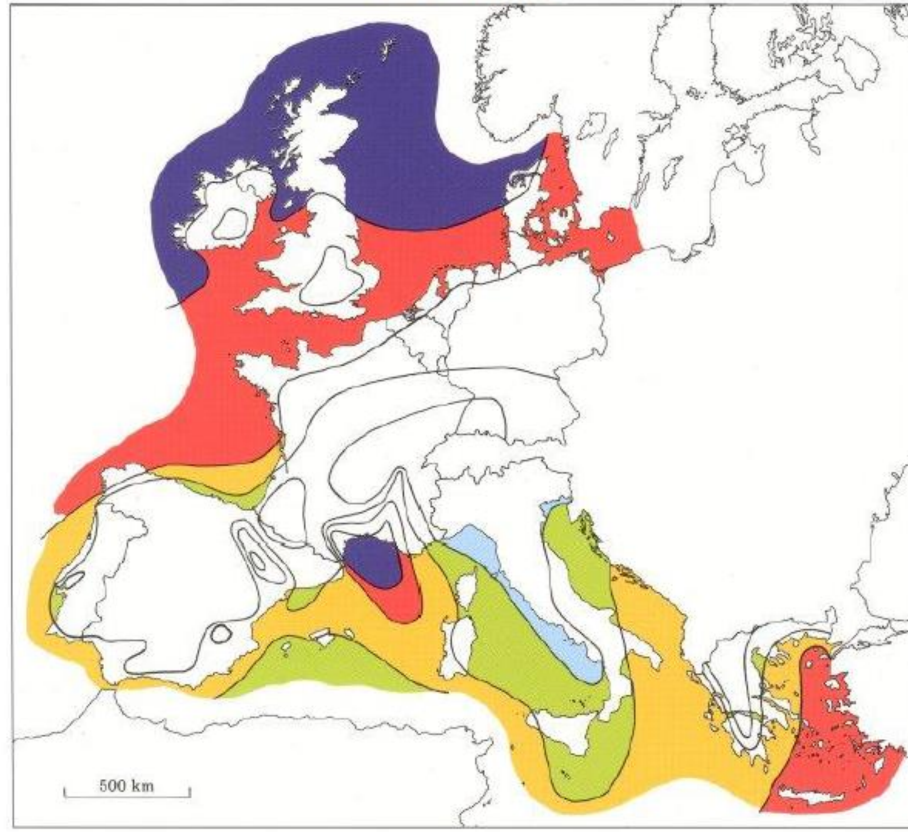
Onshore



	Sheltered terrain[2]		Open plain[3]		At a sea coast[4]		Open sea[5]		Hills and ridges[6]	
	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-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

Wind resources[1] at 50 metres above ground level for five different topographic conditions

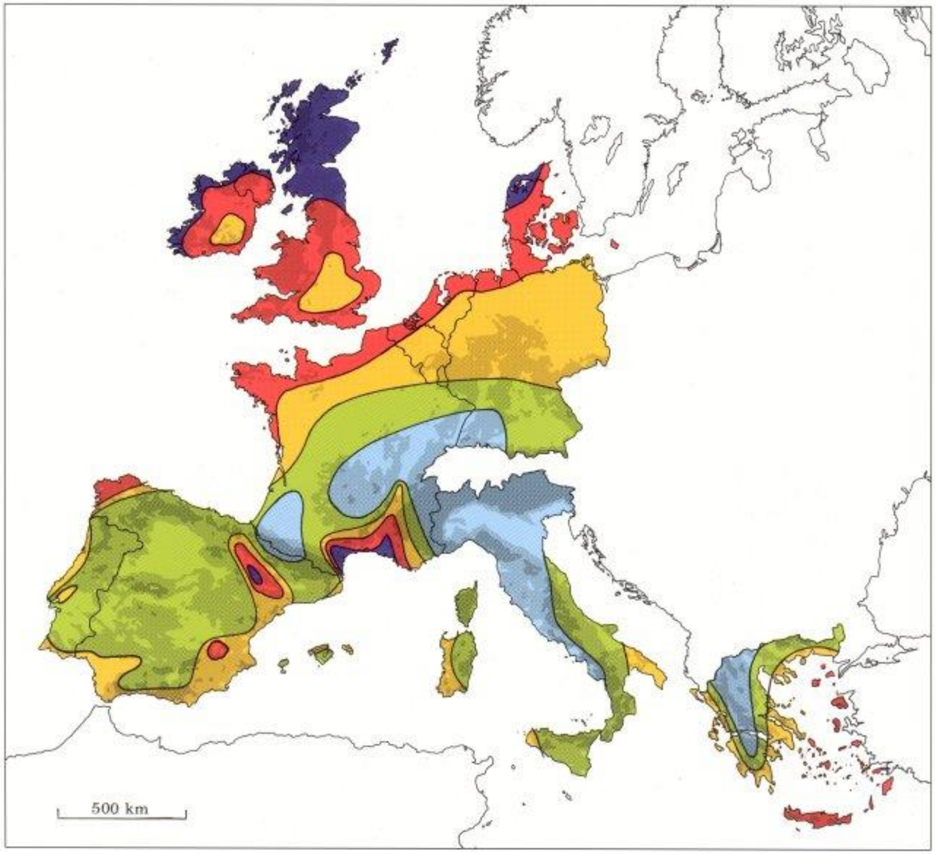
Offshore



	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}
	> 8.0	> 600	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 10.0	> 1100	> 11.0	> 1500
	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
	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
	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
	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

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

Gisement éolien et extrapolation verticale



	Wind resources[1] at 50 metres above ground level for five different topographic conditions									
	Sheltered terrain[2]		Open plain[3]		At a sea coast[4]		Open sea[5]		Hills and ridges[6]	
	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-2}	$m\,s^{-1}$	Wm^{-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

Classes of wind power density at 50 m from the Batelle Wind Energy Resource Atlas.

- Vertical extrapolation of wind speed is based on the 1/7 power law.

$$M(z) = M_{ref}\left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\alpha}$$

- Mean wind speed is based on the Rayleigh speed distribution of equivalent wind power density.

$$p_{Ra}(M) = \frac{k}{c}\left(\frac{M}{c}\right)\exp\left[-\left(\frac{M}{c}\right)^{2}\right]$$

Quelques actions menées au SIRTA

Caractéristiques de l'éolienne installée au SIRTA

Jean-Charles Dupont (jean-charles.dupont@ipsl.polytecnique.fr)
M-C. Gonthier (IPSL), J-L. Queri (EDF)

OBJECTIFS – ENJEUX

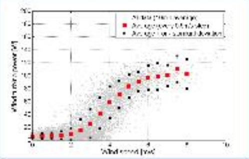
L'observatoire atmosphérique SIRTA (http://sirta.ipsl.fr/) a installé en 2014 une éolienne sur sa plateforme météorologique principale avec une acquisition de la puissance produite en continu. L'objectif de cette installation financée par le SIRTA, le département de mécanique de l'Ecole Polytechnique et EDF-HELP est la caractérisation fine des spécificités de l'éolienne dans le cadre de projets pédagogiques ou encore de travaux pratiques. Le poster présente les résultats utilisant les données enregistrées sur la période janvier-septembre 2015.

Spécifications techniques
Puissance nominale = 400W
Tension de sortie = 24V
Hauteur du rotor = 6m
Longueur des pales = 1,5m
Nombre de pales : 3

Acquisitions
Echantillonnage toutes des 15sec
Tensions, Intensité, vitesse de rotation

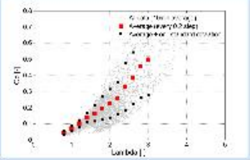
RESULTATS – CARACTERISTIQUES DE L'EOLIENNE

Courbe de puissance de l'éolienne



- Moyennes du vent et de la puissance produite à 10min
- Vitesse de démarrage autour de 2m/s
- Puissance nominale de 200W à 7-8 m/s, 50W pour un vent de 4m/s
- Vitesse de coupure non atteinte

Courbe du coefficient de puissance de l'éolienne



- Le coefficient de puissance reste toujours inférieur à la limite de Betz (16/27 ou 59%).
- Pour notre éolienne, il est de l'ordre de 25% pour une vitesse spécifique de 2

Définitions / Notations

- La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité, noté λ, en anglais Tip Speed Ratio, est le rapport entre la vitesse de l'extrémité de la pâle (notée U) et la vitesse du vent (notée v).
Soit $\lambda = \frac{U}{v} = \frac{w.R}{v} = \frac{2.\pi.f.R}{v}$ avec R la longueur de la pâle et f la fréquence de rotation en Hz.
- Le coefficient de puissance ou coefficient de performance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Il est noté Cp et est égal au rapport entre l'énergie électrique produite (noté Pw) et l'énergie disponible dans le vent (noté Pm).
Soit $Cp = \frac{Pw}{Pm} = \frac{Pw}{\frac{1}{2}\rho.A.v^3} = \frac{Pw}{\frac{1}{2}\rho.v.\pi.R^2.v^3}$ avec R la longueur de la pâle et ρ la densité de l'air.

Evaluation de la ressource éolienne au SIRTA

Jean-Charles Dupont (jean-charles.dupont@ipsl.polytecnique.fr)
A. Faucheux, Y. Lefranc (CEREA)

OBJECTIFS – ENJEUX

L'observatoire atmosphérique SIRTA (http://sirta.ipsl.fr/) possède un dispositif instrumental complet permettant de documenter très finement la ressource éolienne sur le campus de l'Ecole Polytechnique. Des technologies complémentaires de télédétection active (lidar Doppler, sodar, radar UHF) ou encore de mesures in-situ (anémomètres à augets ou soniques) permettent de mesurer les champs de vent 3D de la surface à plusieurs centaines de mètres d'altitude. Ce poster se focalise spécifiquement sur les vents jusqu'à une altitude de 300m.

DISPOSITIF INSTRUMENTAL SUR LE SIRTA

Instruments	Variables	Résolution temporelle	Résolution spatiale / altitude
Anémomètre coupelle	Vent 2D	10sec, 1min	1m, 10m, 25m, 30m
Anémomètre sonique	Vent 3D	[illegible], 10min	2m, [illegible], 10m, [illegible]
Lidar Doppler WLS??	Vent 3D 1sec, 10min		40 à 290m, pas de 20m
Lidar Doppler WLS70	Vent 3D	[illegible], 10 min	100 à 2000 m, pas de 50m
Sodar STAS	Vent 3D	10min	10 à 100m, pas de 5m
Radar UHF	Vent 3D	[illegible]	75 m à 3000 m, pas de 75m
Radiosondages (Trappes)	Vent 2D	2 fois par jour	0 à 25 [illegible], pas de 1sec

RESULTATS - COMPARAISONS

Base de données totale Aout 2014 –Aout 2015

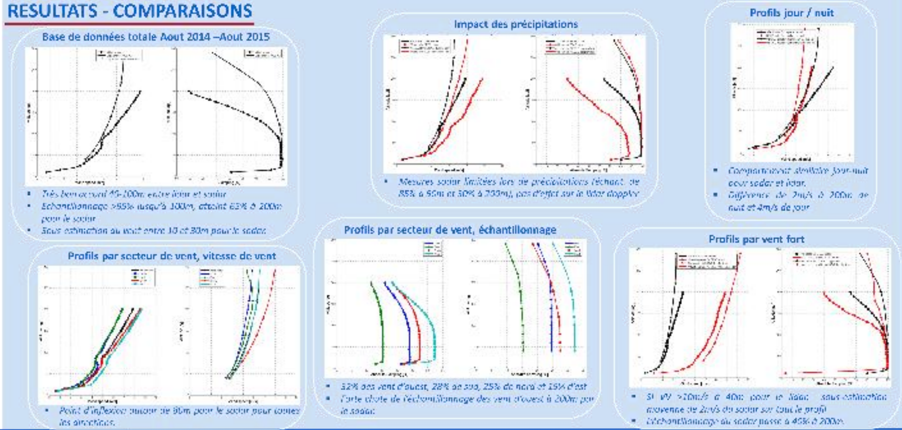
Impact des précipitations

Profils jour / nuit

Profils par secteur de vent, vitesse de vent

Profils par secteur de vent, échantillonnage

Profils par vent fort



Questions CLE sur le vent…

1. Comment évolue le vent sur la verticale ? Pourquoi ?

2. Comment peut-on le paramétriser ? Quelle précision ?

3. Quel impact sur la ressource éolienne ? Quel potentiel sur l'Ecole Polytechnique ?