



Conférence sur

« Energie éolienne : les éoliennes urbaines et les éoliennes de puissance »

Ecole d'Ingénieurs Sup'EnR
3ème année

J. Bresson-Pr

Sommaire

MOOC Fév. 2015 - <https://www.canal-u.tv>

Vidéo 1 : Le potentiel éolien

Vidéo 2 : Notions d'aérodynamiques

Vidéo 3 : Les éoliennes à axe horizontal

Vidéo 4 : Les éoliennes à axe vertical

Vidéo 5 : Puissance d'une éolienne

Vidéo 6 : Technologies des éoliennes

Vidéo 7 : Essai en soufflerie

Vidéo 1

LE POTENTIEL ÉOLIEN

- L'origine, l'énergie et la puissance du vent
- Variations temporelles et spatiales du vent
- Potentiel énergétique d'un site éolien

L'origine du vent

Tout comme la majorité des énergies renouvelables, le vent doit son énergie au soleil.

La terre reçoit de la part du soleil une puissance de $1,74 \times 10^{17} \text{ W}$.

Seulement 1 à 2% de cette énergie est convertie en énergie éolienne

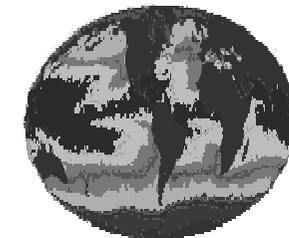


Photo infrarouge des températures de la mer
(prise en juillet 1984 par un satellite)

Source: www.windpower.org

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

L'origine du vent



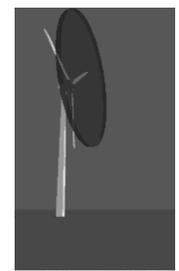
Le soleil réchauffe plus les régions proches de l'équateur que les pôles.

Les masses d'air se déplacent et créent le Vent.

2/12 Source: www.windpower.org

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

L'énergie du vent



Une éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor.

Cette énergie cinétique dépend de 3 facteurs :
- densité ou masse volumique de l'air
- surface balayée par le rotor
- la vitesse du vent

Exemple : Surface balayée par un rotor de 40 mètres de rayon :

S = pi R^2 = 5000 m^2

Masse d'un disque d'air d'une surface de 5000 m^2 et de 10 mètres d'épaisseur pour V=10m/s soit 36km/h :

m = rho * Vol = 1,225 kg/m^3 * 5000 m^2 * 10m = 61250 kg = 61,25 tonnes

soit : Ec = 3,06 . 10^6 Joules soit 3,06 MJ

Ec = 1/2 mV^2

3/12 Source: www.windpower.org

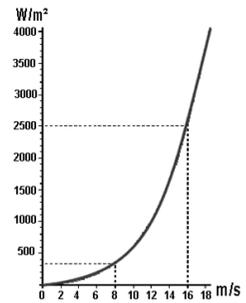
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

La puissance du vent

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée, la puissance instantanée fournie serait, alors :

P_vent = E_c / t = 1s = 1/2 m V^2 = 1/2 rho S V^3

Dans l'exemple précédent : Ec=3 MJoules soit Pvent = 3 MW Permet d'alimenter en énergie entre 600 et 900 foyers



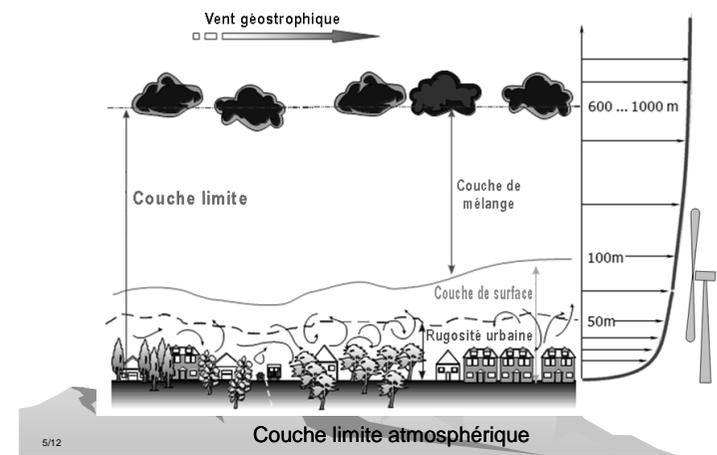
Un doublement de la vitesse du vent correspond à une augmentation de sa capacité énergétique de 2^3 = 8 fois.

4/12

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Variations du vent

1-/ Augmentation du vent avec l'altitude



5/12

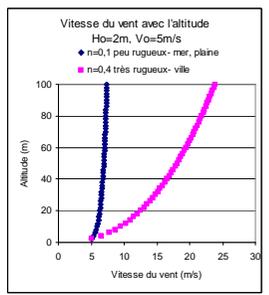
V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Variations du vent

1- Augmentation du vent avec l'altitude

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^n \quad 0,1 < n < 0,4$$

Rugosité
n=0,1 correspond à la mer,
n=0,16 à une plaine,
n=0,28 à une forêt
et n=0,4 à une zone urbaine.



6/12

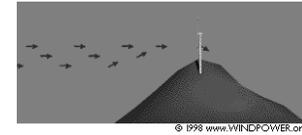
V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Variations du vent

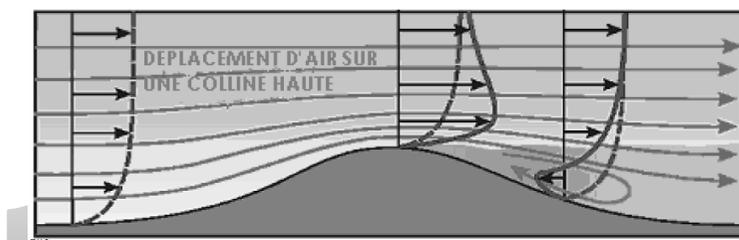
2- Accélération du vent



Effet goulet



Effet colline

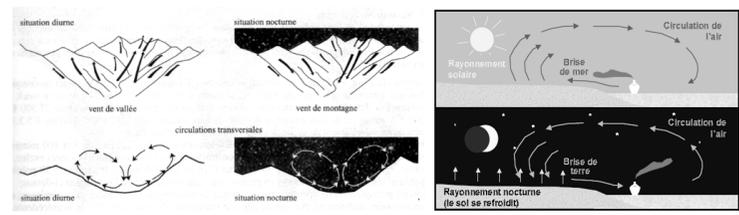


7/12

V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

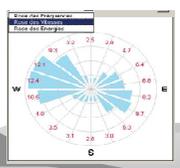
Variations du vent

3- fluctuations temporelles du vent



Vents en montagne

Brises de terre/mer

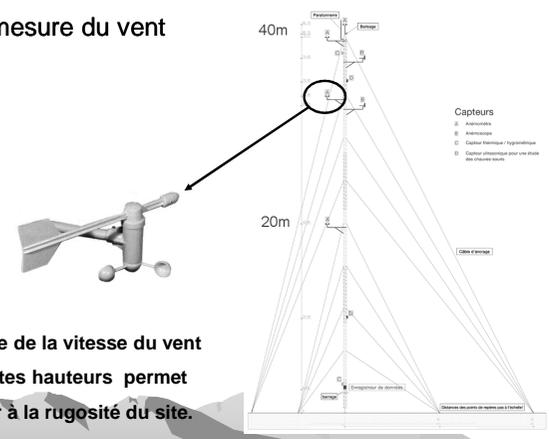


8/12

V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Potentiel éolien d'un site

Mât de mesure du vent



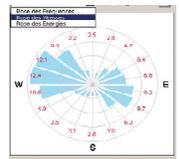
La mesure de la vitesse du vent à différentes hauteurs permet d'accéder à la rugosité du site.

9/12

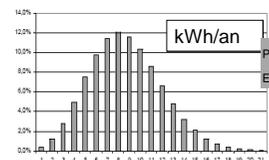
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Vitesse et énergie du vent

L'anémomètre → vitesse du vent
 La girouette → direction du vent



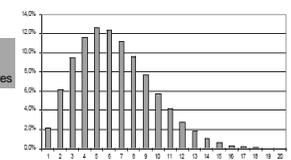
La rose des vents



Distribution de l'énergie du vent sur une année

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

$$E_{vent} = P_{vent} \times Nb \text{ Heures}$$



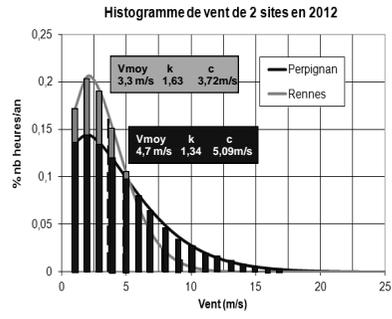
Distribution de la vitesse du vent sur une année

Fréquence en % du nb. d'heures annuelles en fct de V(m/s)

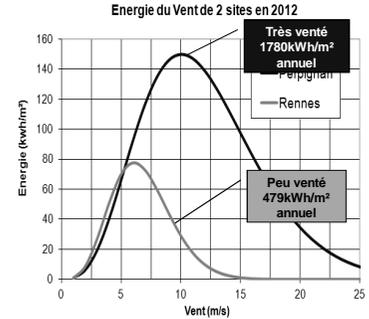


V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Exemples de sites éoliens



11/12



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Potentiel éolien d'un site (vitesse moyenne)



Eolien terrestre



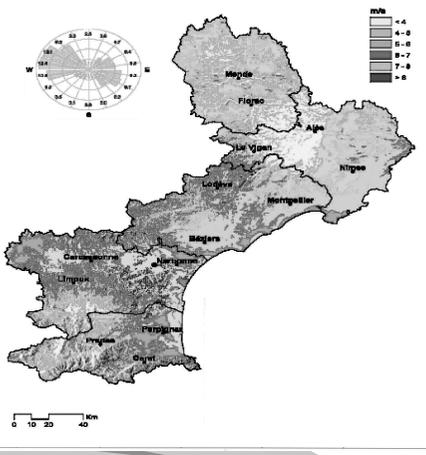
Eolien en mer



Eolien terrestre région L-R

Atlas éolien de la région Languedoc-Roussillon

Application GeoWind sous ArcView - La Compagnie du Vent



Vidéo 2

NOTIONS D'AÉRODYNAMIQUES

- Théorie de Betz
- L'aile portante – Bernoulli
- Portance – Traînée
- Décrochage aérodynamique



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Théorie de BETZ

- Résultats découverts par le physicien Albert BETZ en 1919.

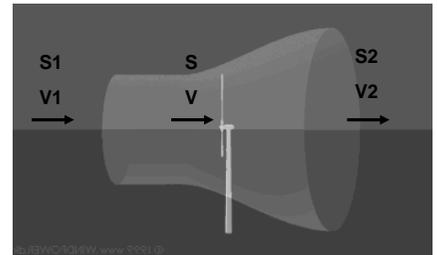


▪ Permet de calculer la puissance du vent que l'éolienne intercepte.



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Le freinage idéal du vent

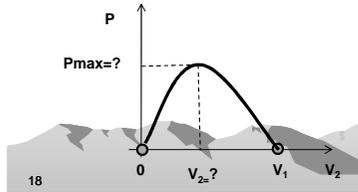


La présence de l'éolienne induit nécessairement un ralentissement du vent, donc :

$$0 < V_2 < V_1$$

Du fait de l'incompressibilité de l'air et de la constance du débit, on en déduit que :

$$S_2 > S > S_1$$



Problématique de BETZ

Chercher pour quelle valeur de V_2 , la puissance au niveau de l'éolienne sera maximale ?

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Théorie de BETZ

On sait $P=F.V$ (Puissance = force . vitesse)

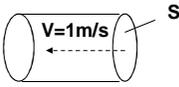
Et que $F=m . \gamma$ (Force=masse . accélération)

Comme il y a décélération $\gamma = (V_1-V_2)/1s$

$$F=m . \gamma = m (V_1-V_2)$$

or $m= \rho . Vol.$ sur 1s, le Volume = $S . V$

$$Donc F= \rho S . V(V_1-V_2)$$



et donc $P = F.V = \rho.S.V^2(V_1-V_2)$

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Théorie de BETZ

On rappelle que $P= F.V=\rho.S.V^2(V_1-V_2)$ (1)

Afin d'exprimer V en fonction de V_1 et V_2 ,

On applique la théorie de l'énergie cinétique : $P=\Delta E/dt$

Sachant que :

$$\begin{aligned} E_1 &= 1/2 . m . V_1^2 & \Delta E &= E_1 - E_2 \\ E_2 &= 1/2 . m . V_2^2 & \Delta E &= 1/2 . m . (V_1^2 - V_2^2) \end{aligned}$$

$$\text{Or } m = \rho . S . V \Rightarrow \Delta E = 1/2 . \rho . S . V . (V_1^2 - V_2^2)$$

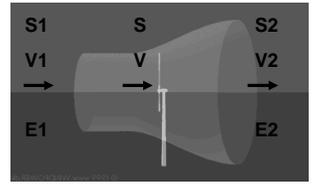
$P = \Delta E/s$ et par unité de temps (1s) soit :

$$P = 1/2 . \rho . S . V . (V_1^2 - V_2^2) \quad (2)$$

On égale (1) et (2) :

$$1/2 . \rho S V . (V_1^2 - V_2^2) = \rho S V^2 . (V_1 - V_2)$$

D'où $V = \frac{V_1 + V_2}{2}$



On peut remplacer V dans F et dans P:

$$\rightarrow F = 1/2 . \rho S . (V_1^2 - V_2^2)$$

$$\rightarrow P = 1/4 . \rho S . (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2)$$

\rightarrow Quelle est la valeur de V_2/V_1 qui donne une puissance optimale ??

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

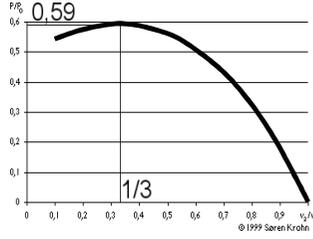
Théorie de BETZ

La puissance extraite est fonction de V1 et V2 :

$$P = 1/4 \cdot \rho S \cdot (V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2)$$

La puissance max est obtenue quand le rapport :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3}$$



Ce qui donne une puissance maximum de :

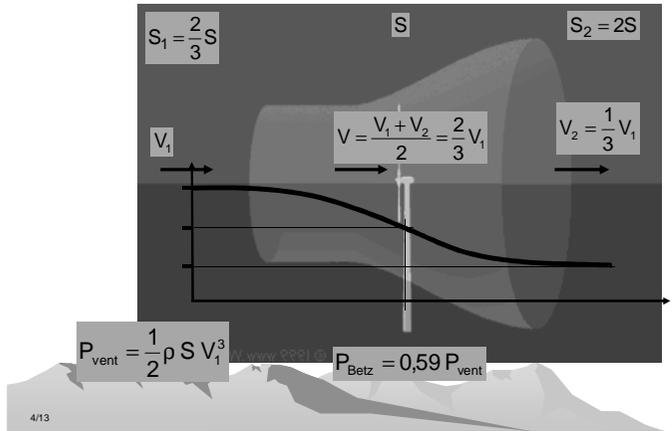
$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{vent} = 0,59 P_{vent} = P_{Betz}$$

Une éolienne idéale ne pourrait récupérer au maximum que 59% de la puissance du vent

3/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Théorie de BETZ



4/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

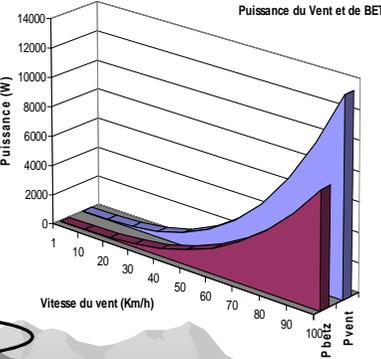
P_{BETZ} en fonction de la vitesse du vent

S = 1m² et ρ = 1,25 Kg/m³

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3$$

$$P_{Betz} = 0,59 P_{vent}$$

| Vent (km/h) | Vent (m/s) | Pvent (W) | Pbetz (W) |
|-------------|------------|-----------|-----------|
| 1 | 0,28 | | |
| 10 | 2,8 | | |
| 20 | 5,6 | | |
| 30 | 8,3 | | |
| 40 | 11,1 | | |
| 50 | 13,9 | | |
| 60 | 16,7 | | |
| 70 | 19,4 | | |
| 80 | 22,2 | | |
| 90 | 25,0 | | |
| 100 | 27,8 | | |



5/13

Permet d'alimenter une habitation

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Comparaison entre éolienne urbaine et éolienne de puissance



Avec un vent de 70 km/h soit 19,5 m/s et P_{Betz} = 0,59 · P_{vent}



Eolienne Urbaine idéale:
S = 1m²
P_{Betz} = 2,75 kW

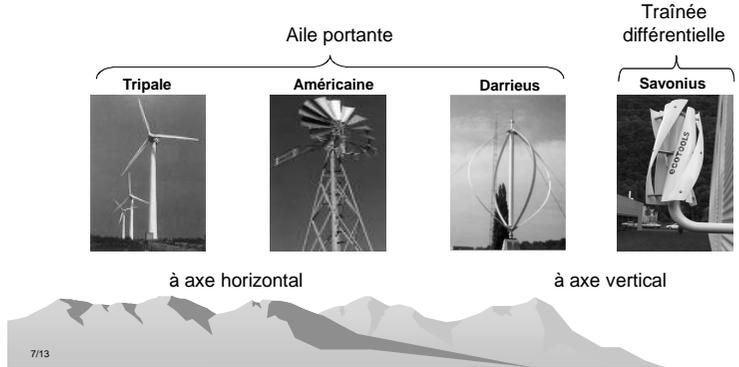
Eolienne de Puissance idéale :
Longueur pale = 30m
S = πR² = 2827m²
P_{Betz} = 7774 kW ≅ 7,8 MW

→ 1500 foyers

6/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

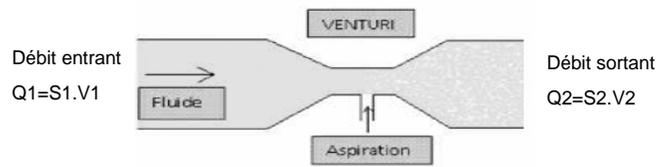
Qu'est ce qui fait tourner les éoliennes ?



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Loi de BERNOULLI

Loi de conservation du débit : $Q1=Q2=Q3$ $S3 \searrow V3 \nearrow$

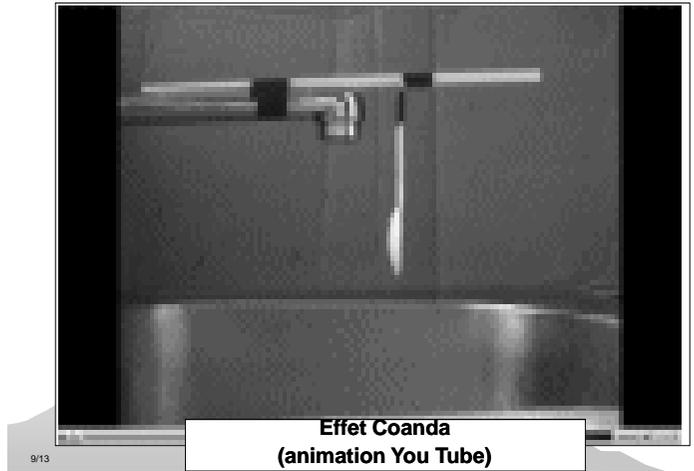


Loi de Bernoulli : sur une ligne de courant
Pression totale = pression locale (p) + pression dynamique ($1/2\rho V^2$) = Cte

Ce qui implique que lorsque :
 V augmente $\Leftrightarrow p$ diminue
 V diminue $\Leftrightarrow p$ augmente

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Loi de BERNOULLI Quelques applications domestiques

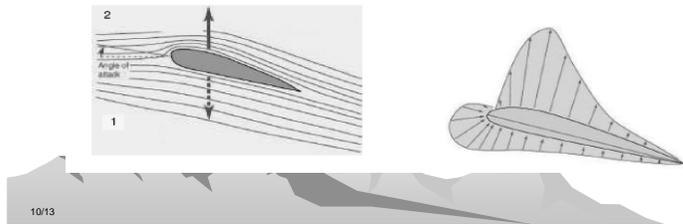


V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

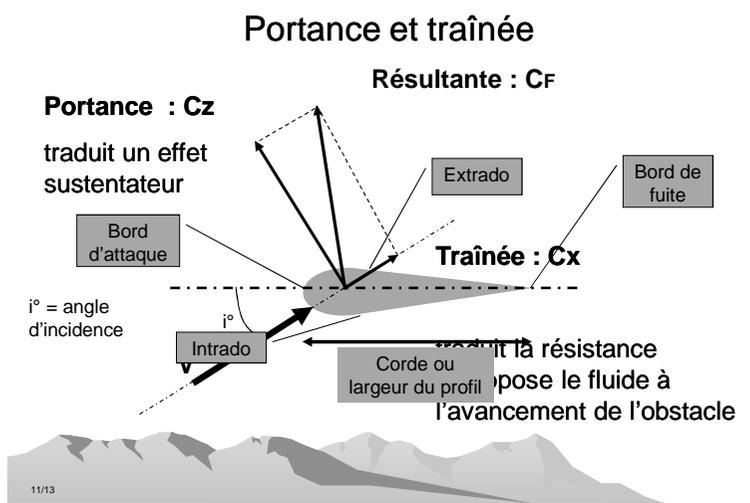
Théorie de l'aile portante

Lorsqu'on diminue la section de l'écoulement d'un fluide :
- sa vitesse d'écoulement augmente (débit=Cte)
- sa pression diminue (Bernoulli)

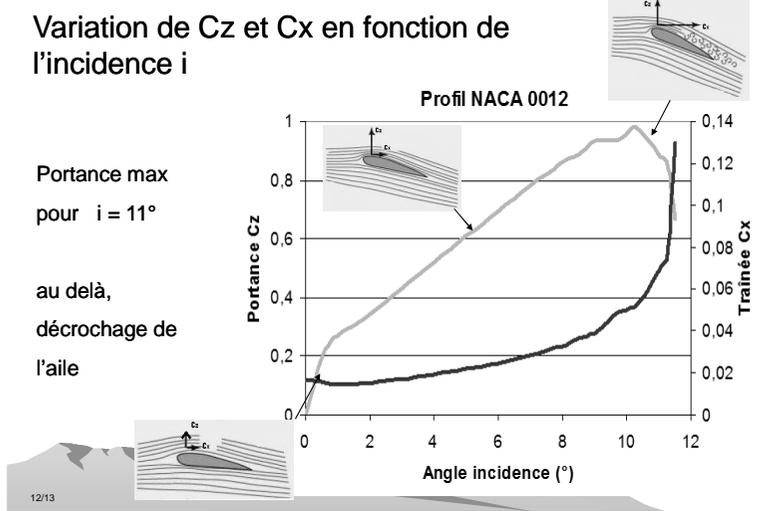
Il y a une dépression sur le dessus de l'aile \rightarrow sustentation ou aspiration de l'aile vers le haut.



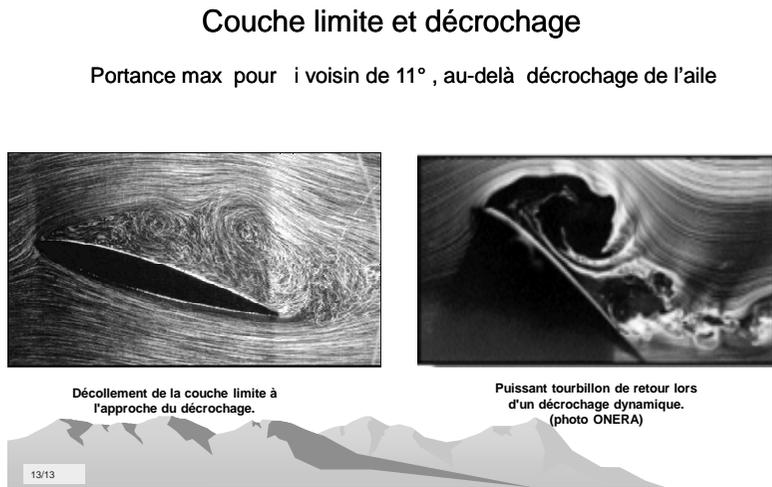
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes



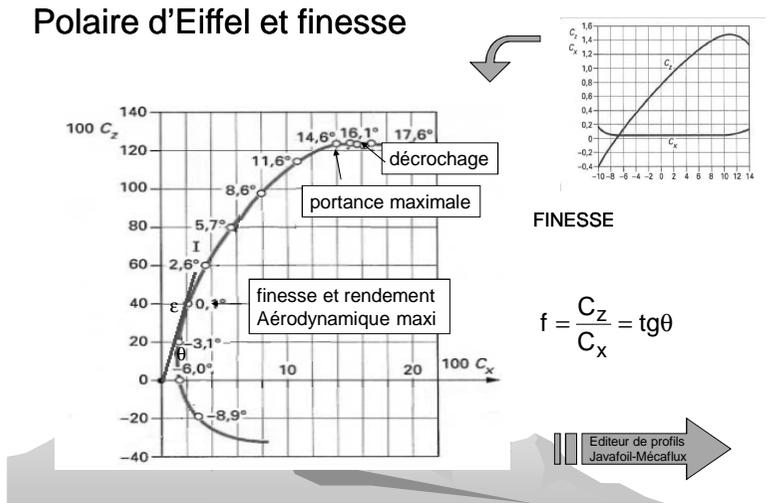
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes



Vidéo 3

LES ÉOLIENNES À AXE HORIZONTAL

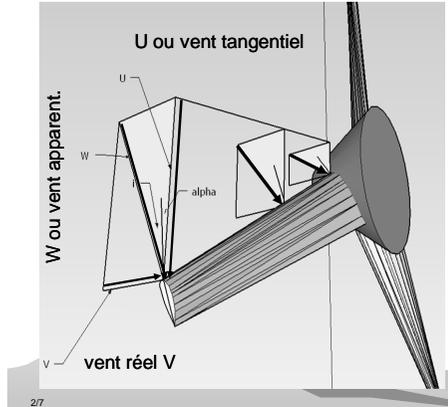
- Aérodynamique de la pale
- Les forces en jeu
- Vitesse tangentielle et spécifique
- Calcul d'une pale vrillée
- Eoliennes rapide et lente



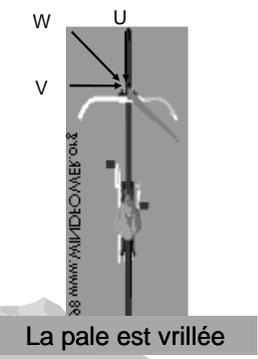
Les éoliennes à axe horizontal



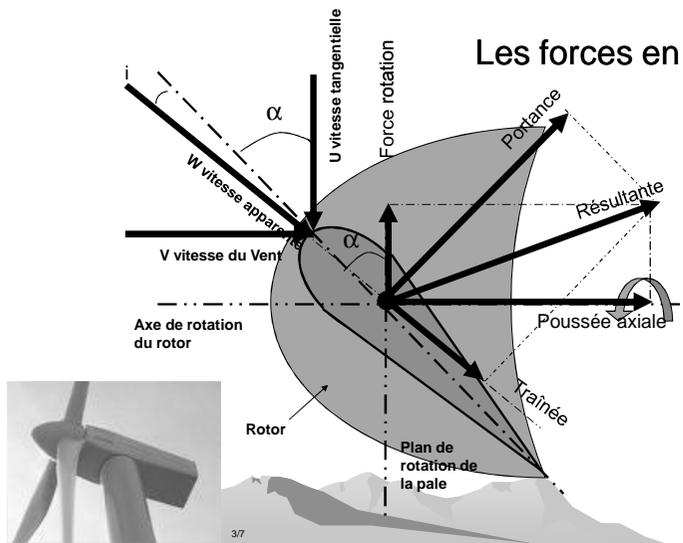
Aérodynamique de la pale



Le vent apparent W n'étant pas constant le long de la pale, pour garder une incidence comprise entre 0 et 12°, l'angle de calage α augmente lorsque l'on se rapproche de l'axe du rotor.



Les forces en jeu



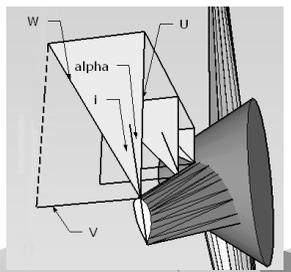
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Vitesse tangentielle

Soit une pale d'éolienne de 30m

- Si $N=1$ tr/s : Calculer la vitesse de déplacement du bout de pale ?
 en 1s le bout de pale parcourt $2\pi R = 188,5m$ soit une vitesse tangentielle de $188,5m/s$ soit $678,6km/h \rightarrow$ trop élevée \rightarrow risque de casse !!!
- On limite la vit. tangentielle à $300 km/h$ ($83m/s$) : Recalculer N ?
 $\rightarrow N=0,44$ tr/s

$$U_o = 2\pi R.N$$



Vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{\text{Vit. tangentielle}}{\text{Vit. du vent}} \quad \lambda_o = \frac{U_o}{V_i} = \frac{2\pi NR}{V_i}$$

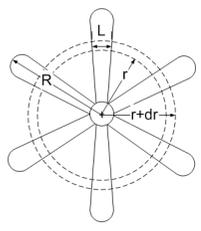
lente $< \lambda_o = 3 <$ rapide

Eolienne Tripale : $\lambda_o=7 \rightarrow$ éolienne rapide
 Eolienne Américaine : $\lambda_o=1,5 \rightarrow$ éolienne lente

4/7

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Angle d'inclinaison et largeur de la pale Théorie simplifiée



Après calcul de la poussée axiale sur les profils compris entre r et $r+dr$, on trouve, pour une distance r/R à l'axe, une expression reliant les caractéristiques aérodynamiques du profil de l'aile à la vitesse spécifique λ_o

$$C_z p L = \frac{16\pi}{9} \frac{R}{\lambda_o \sqrt{\lambda_o^2 \left(\frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}\right)}}$$

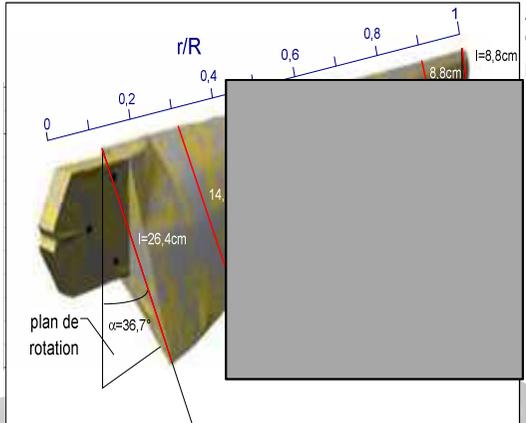
C_z : coefficient de portance
 p : nombre de pales
 L : largeur

5/7

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Calculs pale vrillée (Théorie simplifiée)

nb.pales $p=2$
 $R=0,5m$
 $V_i=9m/s$
 $N=18tr/s$
 $\lambda_o = \frac{2\pi NR}{V_i} = 628$



A partir de 2 relations, on calcule :

la largeur de pale $L=f(r/R)$

$$C_z p L = \frac{16\pi}{9} \frac{R}{\lambda_o \sqrt{\lambda_o^2 \left(\frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}\right)}} \quad (1)$$

C_z : coefficient de portance
 p : nombre de pales
 L : largeur de la pale

et l'angle de calage

$$\alpha = l-i = f(r/R)$$

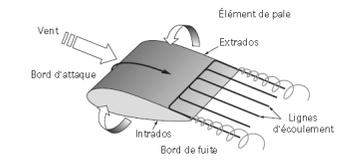
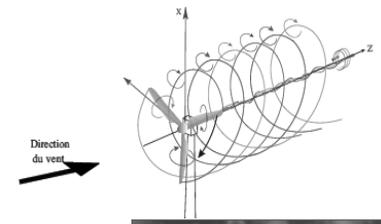
$$\cot g i = \frac{3}{2} \lambda_o \frac{r}{R} \quad (2)$$

5/7

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Théorie tourbillonnaire (Logiciels industriels)

Cette théorie développée par Glauert prend en compte la rotation de la veine à la traversée de l'hélice \rightarrow perte d'énergie



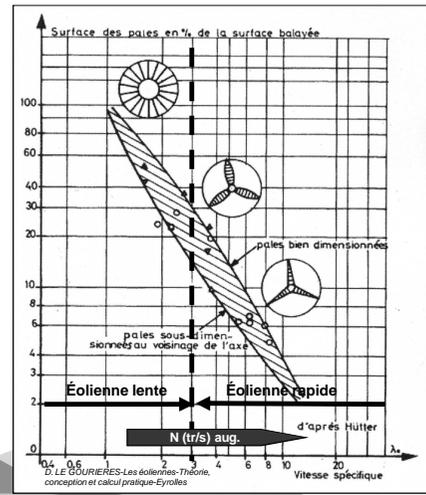
Visualisation de lâchés de fumée dans le sillage d'une éolienne. Jet de fumée sur une seule pale. (NREL, USA)

6/7

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Eolienne rapide
Eolienne lente

*Les machines
tourneront d'autant
plus vite qu'elles
seront légères.*



1/7

Vidéo 4

LES ÉOLIENNES À AXE VERTICAL

- Eolienne SAVONIUS
- Eolienne DARRIEUS



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Les éoliennes à axe vertical

Eoliennes lentes SAVONIUS



Trainée différentielle

Eoliennes rapides DARRIEUS



Aile portante

1/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Les éolienne lentes à traînée différentielle



2/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Coefficient de traînée Cx

| | | | | | | | | | | | |
|--------|--|------|-----|---|---|---|-----|---|-----|--|--|
| | Barres infiniment longues, de sections différentes | | | | | | | | | | |
| vent → | | | | | | | | | | | |
| | 1,20 | 0,46 | 0,2 | 2 | 0 | 2 | 1,6 | 2 | 1,6 | | |

| | |
|---|--|
| | |
| <ul style="list-style-type: none"> Goutte d'eau : Cx = 0,05 Coccinelle (Volkswagen) : Cx = 0,46 Austin Mini : Cx = 0,42 Citroën DS : Cx = 0,31 Porsche 911 Turbo : Cx = 0,31 | <ul style="list-style-type: none"> 1,43 0,38 1, |

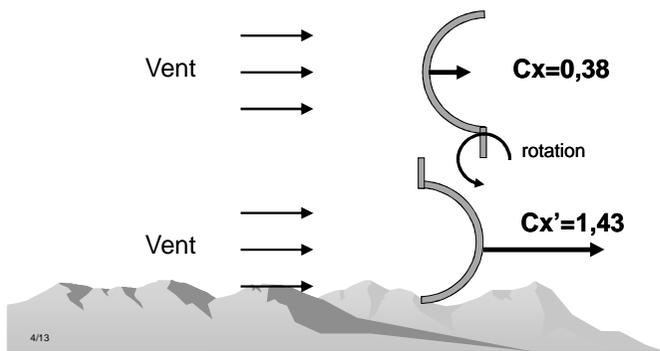
voiture JCB DIESELMAX qui a battu le record du monde de vitesse **Cx=0,174**

3/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Principe de la traînée différentielle

Le vent exerce une force de traînée égale à : $F_x = 1/2 C_x \cdot \rho S V^2$

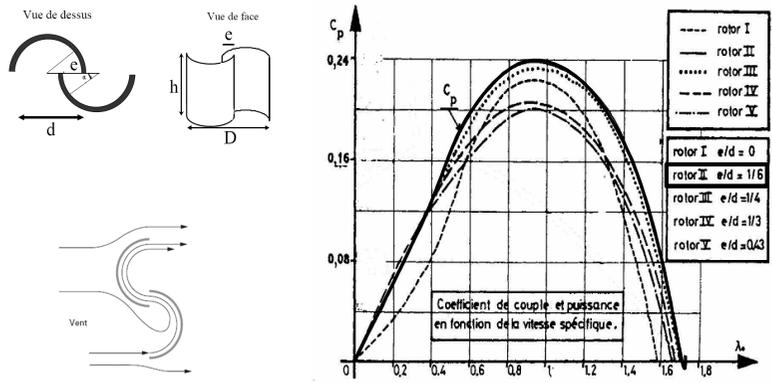


4/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Le rotor Savonius

Inventé en 1924 par l'ingénieur finnois Sigurd SAVONIUS



Les conditions optimales de fonctionnement lorsque $\lambda_0 = U_0/V_1 = 1$ et $e/d = 1/6$

5/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

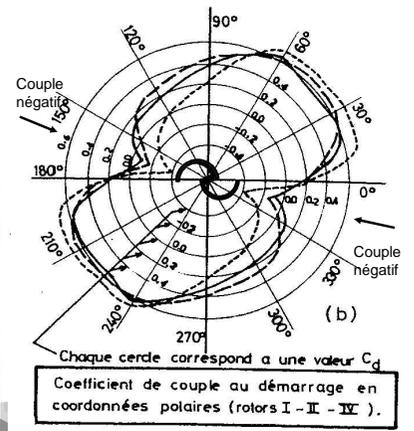
Le rotor Savonius

Couple négatif → risque d'inversion de sens de rotation

Pour éviter cela, on positionne 2 Savonius décalée de 90° ou, on vrille le rotor.

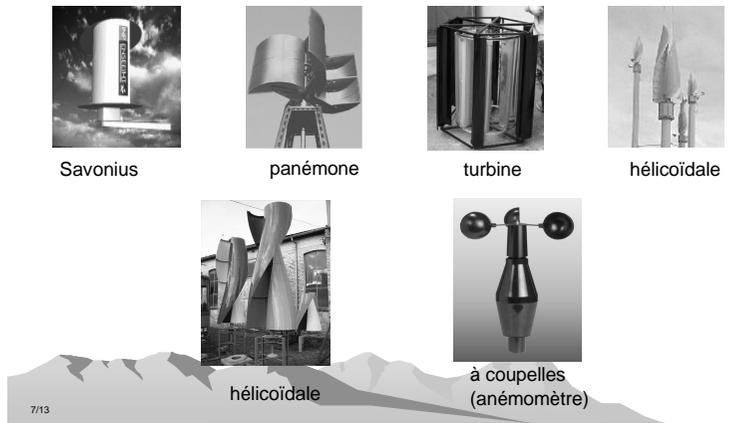


6/13



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

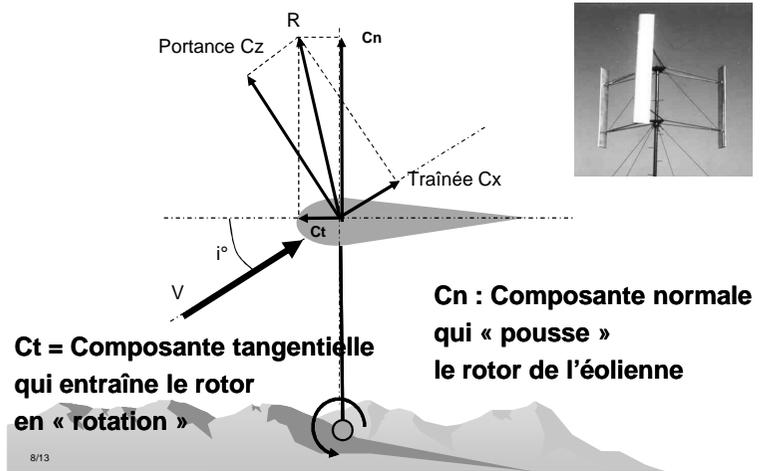
Autres types d'éolienne à traînée différentielle



7/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

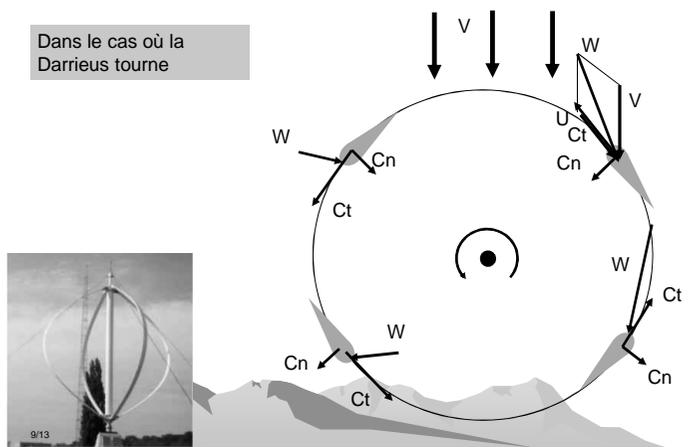
Eolienne rapide de type DARRIEUS Inventé par l'ingénieur français Georges DARRIEUS en 1927



8/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

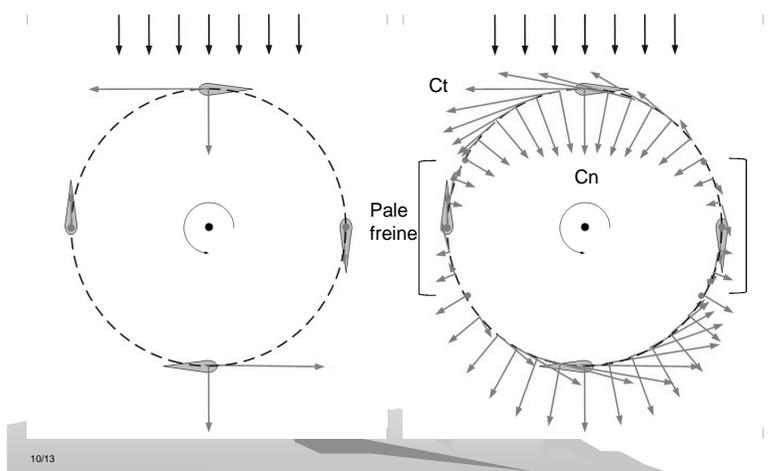
Les forces tangentiels et normales



9/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

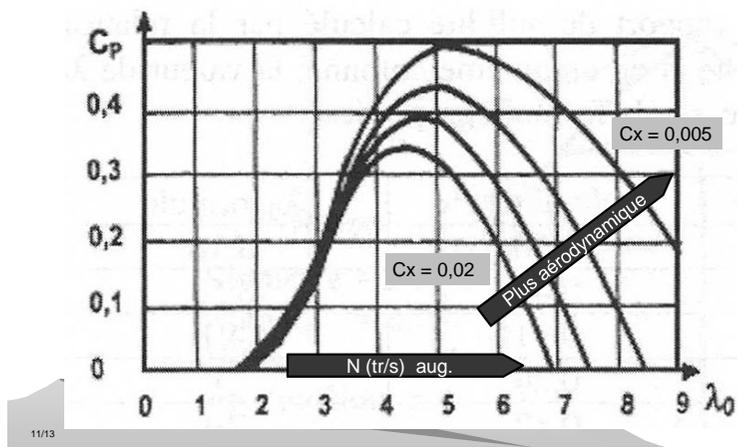
Action du vent sur les pales



10/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Influence du Cx

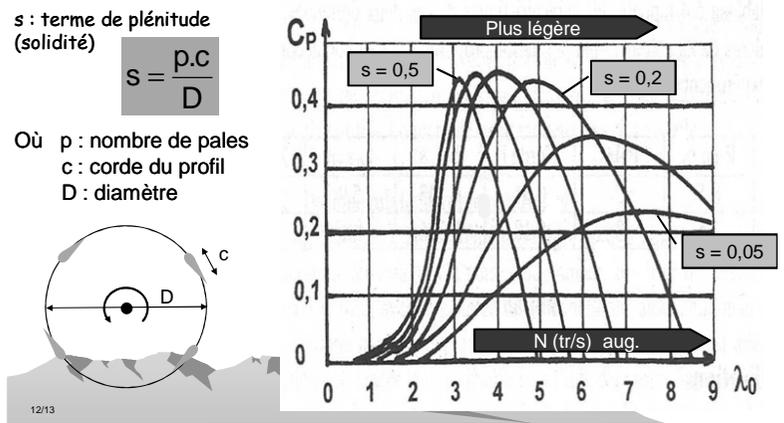


11/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Influence de la largeur et du nombre de pales

Encombrement en % de la largeur de vent intercepté D



12/13

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Calcul de la corde et de l'épaisseur des pales

De la relation précédente :

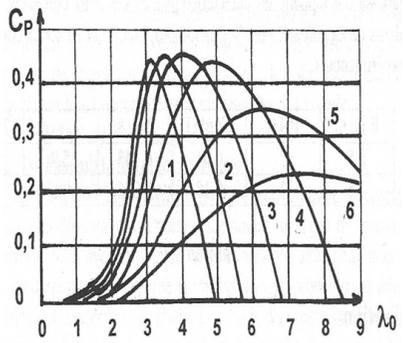
$$C_{z,p,c} = \frac{16\pi}{9} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 \left(\frac{r^2}{R^2} + \frac{d}{9} \right)}}$$

Si on considère $C_z \approx 1$ et λ_0 grand, alors, en bout de pale :

$$\frac{pc}{R} \approx \frac{5}{\lambda_0^2}$$

Epaisseur pour un profil NACA 0012:

$$e = \frac{12}{100} c$$



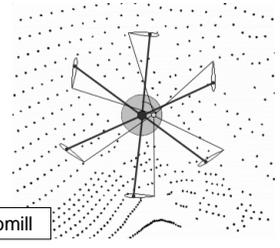
Profil 1,2,3,4,5,6 → s = 0,5-0,4-0,3-0,2-0,1-0,05



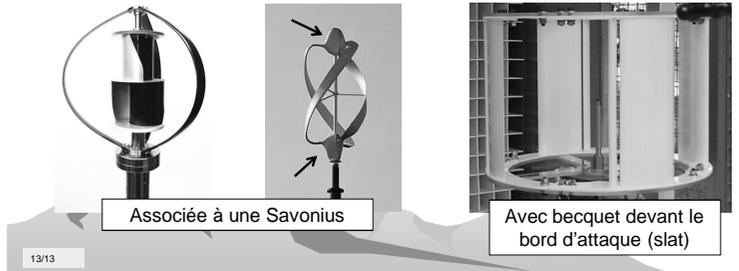
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

L'éolienne Darrieus a des difficultés à démarrer → nécessite une aide au démarrage

- Inversion de la génératrice en moteur pour lancer la Darrieus



Darrieus à pales mobiles-Giromill



13/13

Vidéo 5

PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE

- Puissance et coefficient de puissance
- Courbe de puissance
- Régulation de puissance – Pitch – Stall
- Energie récupérée par l'éolienne
- Facteur de charge ou disponibilité d'une éolienne



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Coefficient de puissance

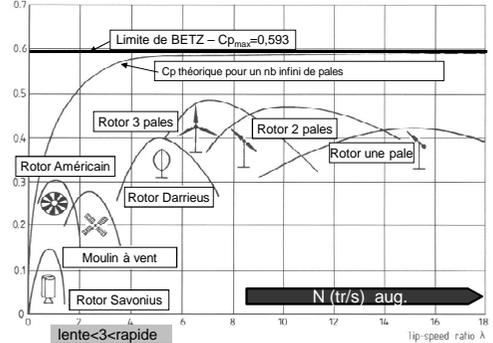
La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine, et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ_0 :

$$\lambda_0 = \frac{U_0}{V_1} = \frac{2\pi NR}{V_1}$$

U_0 (m/s): vitesse tangentielle en bout de pale
 N (tr/s): vitesse de rotation du rotor

Le rendement aérodynamique est alors donné par la relation :

$$\eta_a = \frac{C_p}{0,593}$$



Les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de Betz : au final, on ne récupère donc globalement que 40 à 50% de l'énergie due au vent.

2/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Puissance récupérable par une éolienne

A cause de la vitesse non nulle de l'air derrière l'aéromoteur $P_{éolienne} < P_{vent}$

On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur

par la relation :

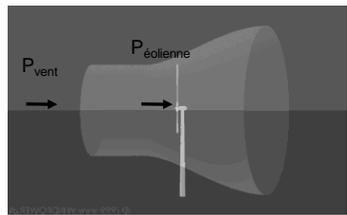
$$C_p = \frac{P_{éolienne}}{P_{vent}}$$

Ainsi la puissance de l'éolienne s'écrit : $P_{éolienne} = C_p P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S C_p V_1^3$

Avec comme puissance maximum récupérable celle donnée par la limite de BETZ

$$P_{Betz} = \frac{16}{27} P_{vent} = 0,59 P_{vent} \quad \text{ainsi :} \quad 0 < C_p_{éolienne} < 0,59$$

^{1/8} Une éolienne réelle pourra récupérer moins de 59% de l'énergie du vent.

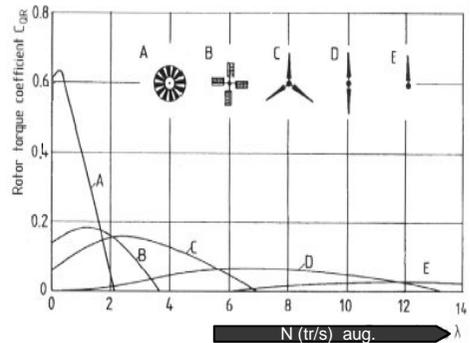


V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Coefficient de moment

$$P = C\omega = C2\pi N$$

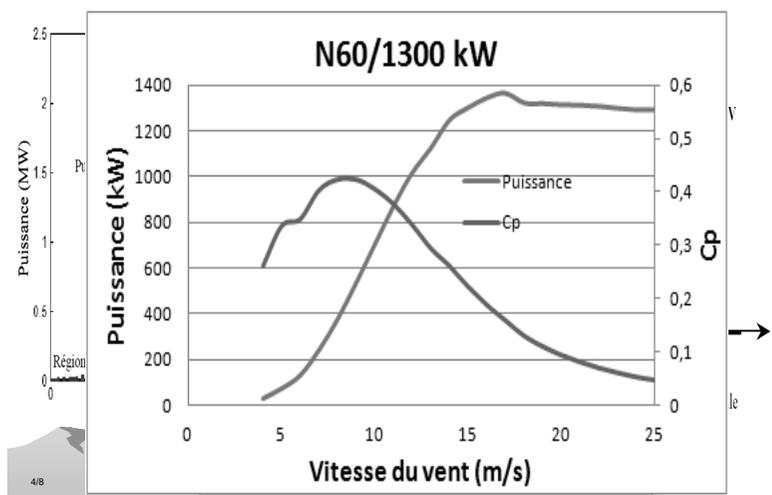
Où
 C : couple moteur (Nm)
 N : vitesse de rotation (tr/s)



3/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Courbe de puissance d'une éolienne tripailes



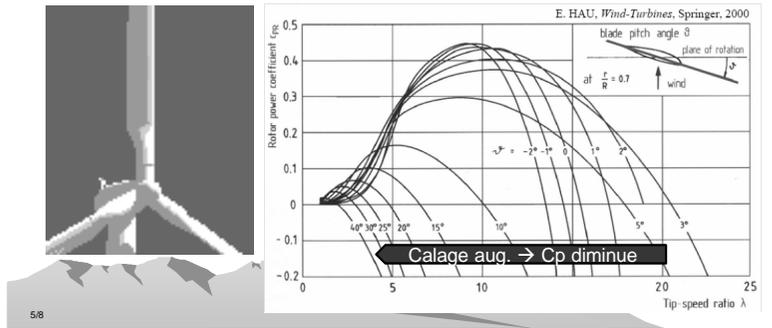
4/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Régulation de puissance

Système pitch à pas variable

- Orientation des pales pour réduire N (tr/s) et donc la puissance à haute vitesse de vent
- Efficace, complexe et coûteux, de plus en plus utilisé pour quelques 100 kW

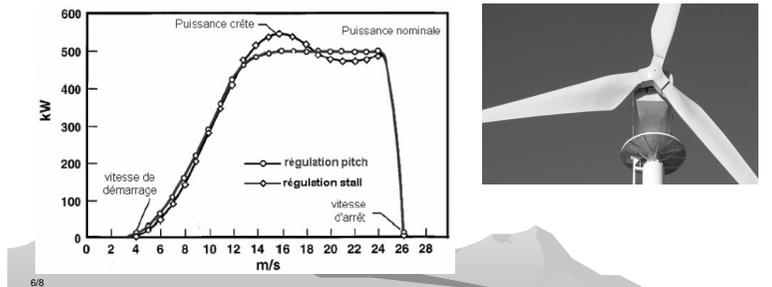


5/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Régulation de puissance – système stall à décrochage passif aérodynamique

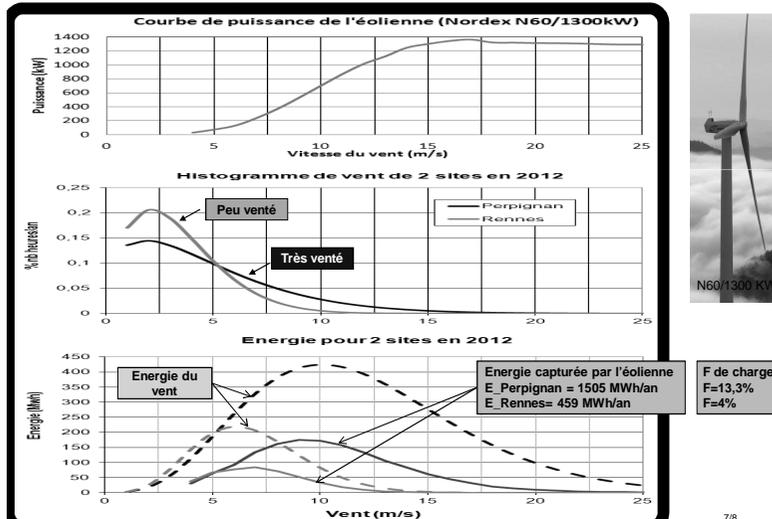
- Profil des pales fixes vrillées tel que au-delà d'une certaine vitesse de vent, le décrochage aérodynamique ($C_z \searrow$) fait naturellement chuter la puissance
- Système simple, fiable, mais moins bonne exploitation de la puissance aux vents forts



6/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Energie récupérée par une même éolienne sur 2 sites éoliens différents



7/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Facteur de charge ou disponibilité d'une éolienne ou d'un parc éolien

Correspond au rapport pour une période donnée entre la production effective et la capacité maximale de production :

$$F_{charge} (\%) = \frac{E_{produite}}{E_{max}}$$

Compris habituellement entre 20 et 40%

Exemple : Une éolienne de puissance nominale de 1,3 MW produit annuellement sur un site donné une énergie d'environ 1505 MWh son facteur de charge est alors de :

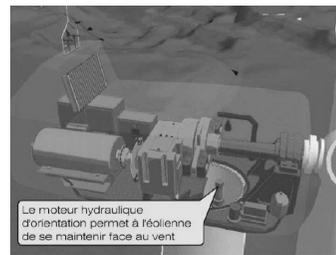
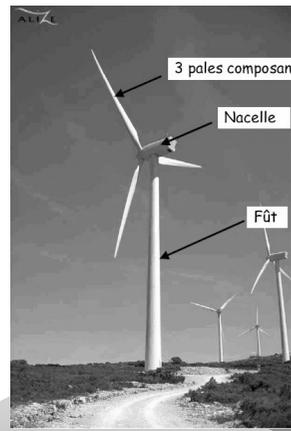
$$F_{charge} (\%) = \frac{1505 \text{ MWh}}{1,3 \text{ MW} \times 8760 \text{ h}} = 0,133 \quad \text{Soit : } F_{charge} = 13,3 \%$$

Correspond à environ 1158 h à pleine puissance sur une année de fonctionnement

8/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Éléments d'une éolienne de puissance



Vitesse de rotation du rotor : environ 20-30 tr/mn
Vitesse de rotation en sortie de multiplicateur : 1500 tr/mn



1/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Vidéo 6

TECHNOLOGIES DES ÉOLIENNES

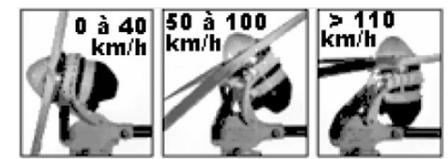
- Éléments d'une éolienne de puissance
- Systèmes d'arrêt d'une éolienne
- Production d'électricité
- Dimensions – Production
- Projet éolien urbain
- Impact acoustique des éoliennes



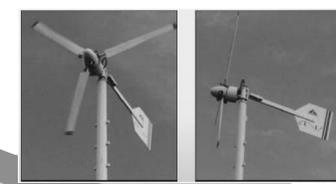
Régulation de puissance des petites machines

Pales fixes vrillées → régulation par décrochage aérodynamique (stall)

Effacement vertical



Effacement latéral



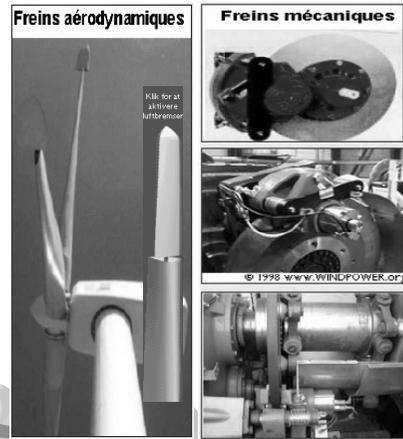
2/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Système d'arrêt des éoliennes

- L'arrêt des éoliennes se fait :
- En cas de vents excessifs (et mise en drapeau éventuelle)
 - En cas de problème réseau (sur ou sous-tension)
 - En cas de vibrations (arrêt d'urgence)

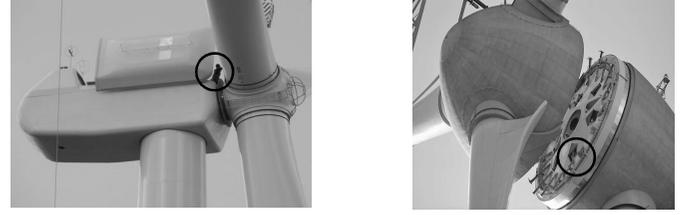
- Deux types de freins existent :
- **Freins aérodynamiques** : dissipe une grande partie de l'énergie cinétique sans usure
 - **Freins mécaniques** : à disques en cas d'urgence



3/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Production d'électricité – Eolienne de puissance



Eolienne à génératrice asynchrone

Eolienne à génératrice synchrone à attaque directe

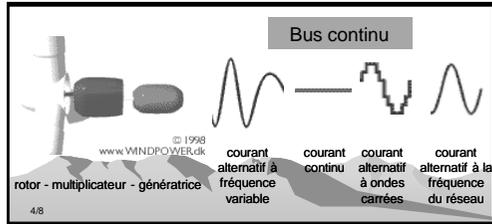
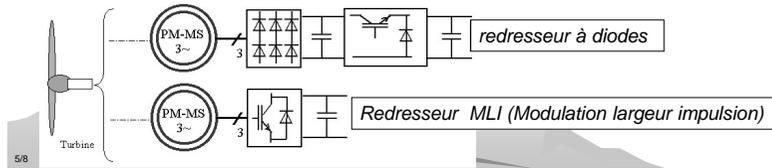
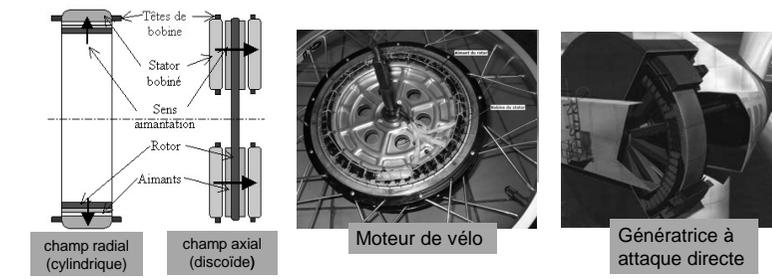


Schéma général de la chaîne de conversion de puissance

4/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

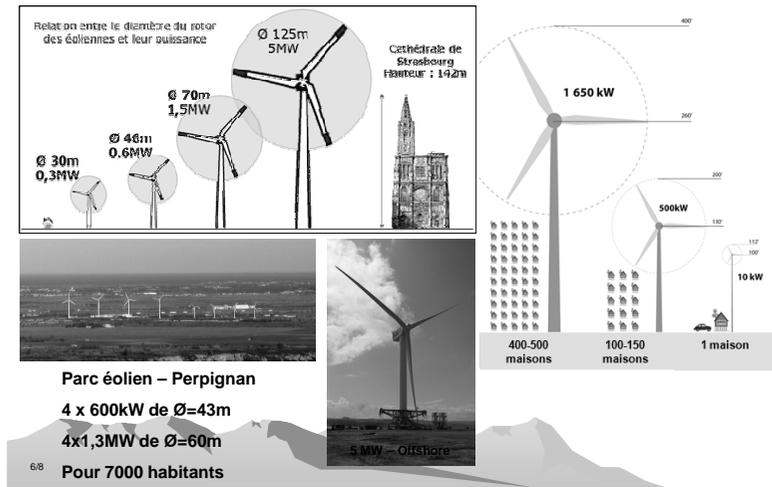
Production d'électricité – Machines à aimants permanents ou brushless



5/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

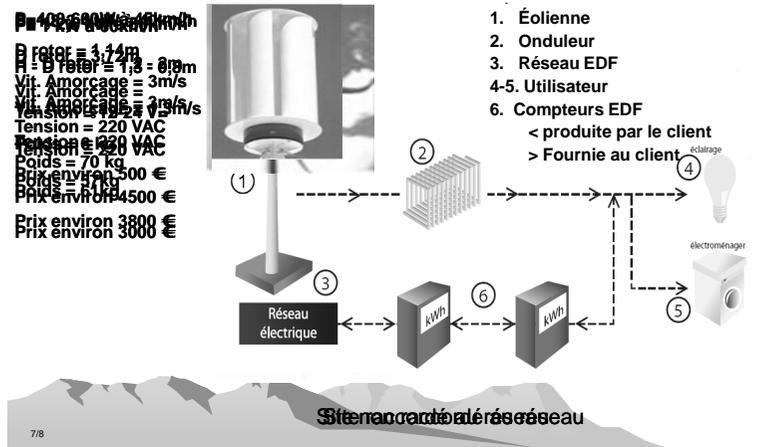
Dimensions - Production



6/8

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

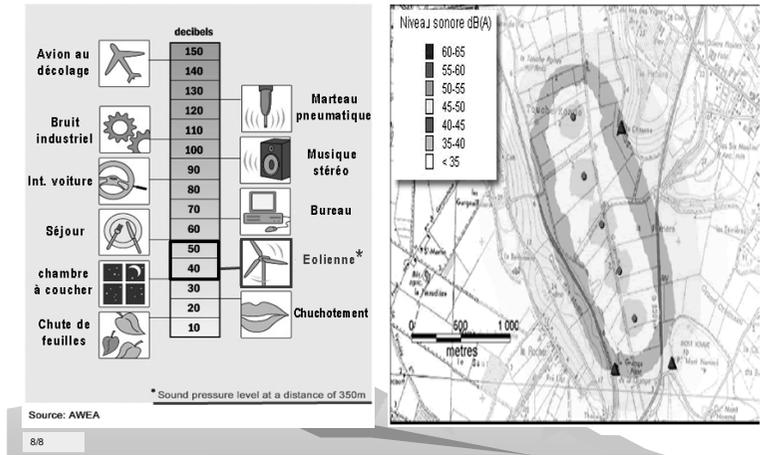
Projet éolien urbain



7/8

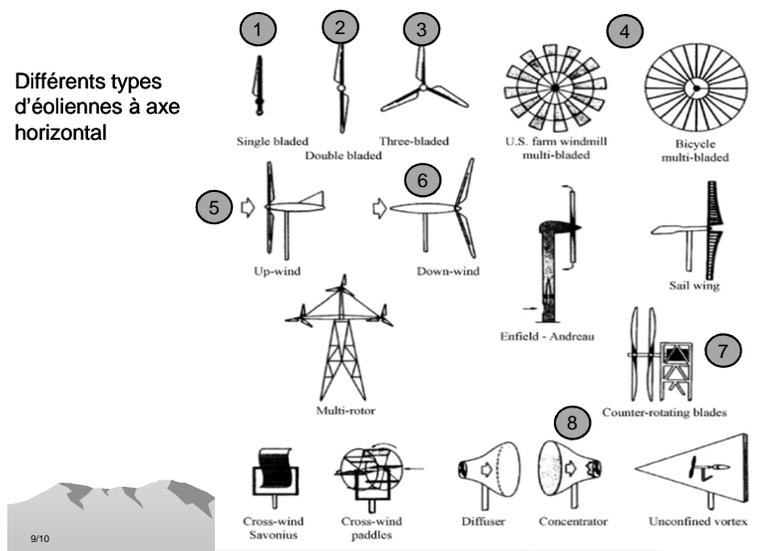
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Impact acoustique des éoliennes



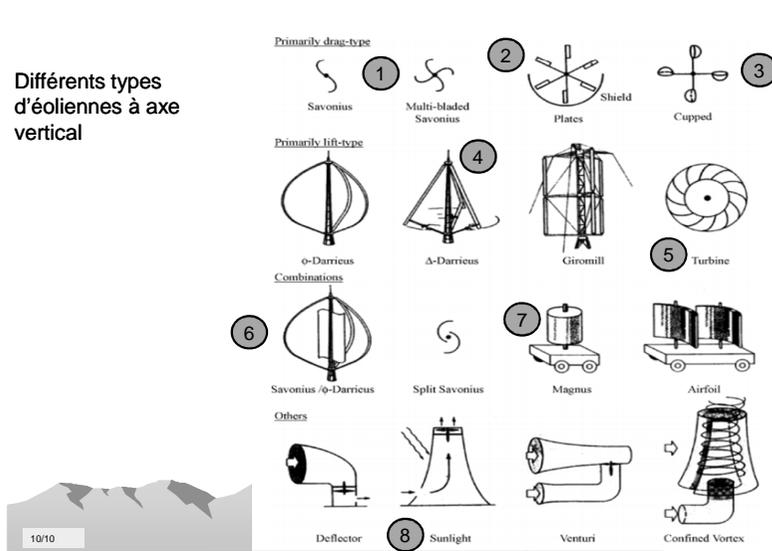
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Différents types d'éoliennes à axe horizontal



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Différents types d'éoliennes à axe vertical



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Concours national GimEole 2008 20-21 mars Cherbourg



Eolienne Américaine



Eolienne Turbine
à rotor et stator



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Concours national GimEole 2009 20-21 mars Cherbourg



Eolienne Américaine
à pales vrillées



Eolienne Turbine
à rotor et stator

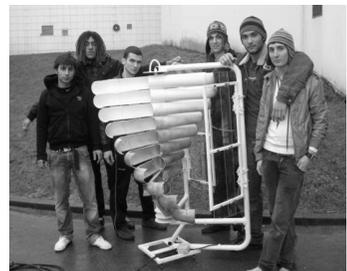


V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

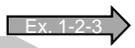
Concours national GimEole 2010 19-20 mars Cherbourg



Eolienne Venturi
à pales vrillées

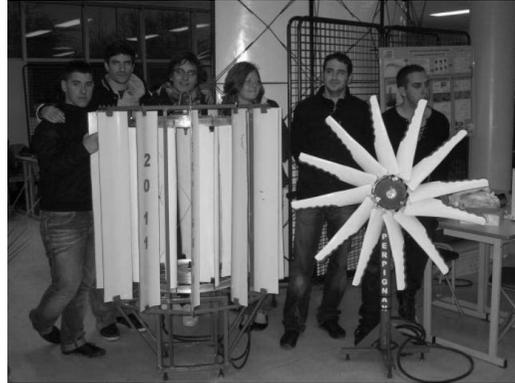


Eolienne Savonius
à rotor vrillé



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Concours national GimEole 2011 18-19 mars Cherbourg



Eolienne de type "Turbine"
à stator et rotor
avec double génératrices

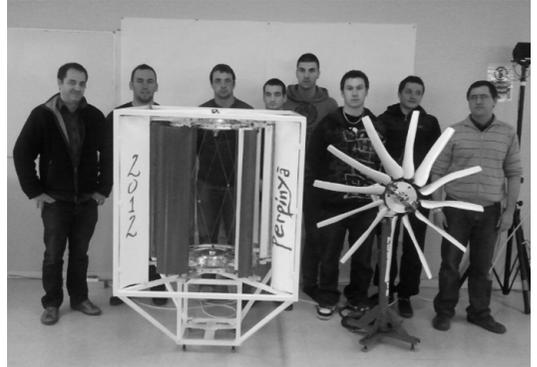


Eolienne de type "Américaine"
Sous le vent à pales vrillées avec
générateurs de Vortex



V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Concours national GimEole 2012 23-24 mars Cherbourg



*Eolienne à axe vertical
Savo-Darrieus à géométrie variable* *Eolienne Américaine à axe horizontal
sous le vent à « pas variable »*

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Concours national GimEole 2014 28-29 mars Lyon



*Eolienne à axe horizontal
à pales annulaires* *Eolienne à axe vertical
Darrieus avec slat*

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Concours national GimEole 2015 26-27 mars Lyon



*Eolienne à axe vertical
Darrieus avec slat* *Eolienne à axe horizontal
à pales annulaires*

V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Concours national GimEole 2016 26-27 mars Roanne



*Eolienne à axe vertical
Darrieus avec slat* *Eolienne à axe horizontal
à pales annulaires*

Formulaire

| | |
|---|--|
| $P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3$ | $C_P = \frac{P_{éolienne}}{P_{vent}}$ |
| $v = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{2}{3} V_1$ $V_2 = \frac{V_1}{3}$ | $C_{Pmax} = \frac{16}{27} = 0,593$ |
| $P_{Betz} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3$ | $P_{éolienne} = C_P P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S C_P V_1^3$ |
| $\lambda = \frac{U}{V_1} = \frac{\omega r}{V_1} = \frac{2\pi N r}{V_1}$ | $M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi N}$ |
| $\lambda_0 = \frac{U_0}{V_1} = \frac{\omega R}{V_1} = \frac{2\pi N R}{V_1}$ | $C_m = \frac{C_P}{\lambda_0}$ |
| $F_z = \frac{1}{2} \rho C_z S V_1^2$ | $\eta_a = \frac{C_P}{0,593}$ |
| $F_x = \frac{1}{2} \rho C_x S V_1^2$ | |



Exercice 1

Ex1 : Longueur d'une pale

Question : Nous souhaitons dimensionner les pales d'une éolienne à vitesse fixe pour obtenir une puissance mécanique de 750 kW pour une vitesse de vent de 13,8 m/s. On considère un coefficient de puissance Cp égal à 0,2. Quel sera la longueur de notre pale ou le rayon de la surface balayée par la turbine ?

Réponse :



Bibliographie

D. Le Gourrières – *Les éoliennes : théorie, conception et calcul pratique*. Edition du Moulin Cadiou, diffusion Eyrolles-Geodif/Sodis 1979, 267pp



Exercice 2

Ex3 : Paramètres d'une éolienne à vitesse fixe de 300 kW

- On donne quelques paramètres d'une éolienne de 300 kW:
- Diamètre des pales : 28 m
- Surface balayée par le rotor : 615 m²
- Vitesse nominale du vent : 14 m/s
- Vitesse nominale de rotation du rotor : 43 tr/min
- Vitesse nominale de la MAS : 1515 tr/min

Par ailleurs, la densité de l'air est de 1,225 kg/m³



Exercice 2 suite

Ex3 : Paramètres d'une éolienne à vitesse fixe de 300 kW

Question 1 : Quel pourcentage de l'énergie du vent récupère t-on au point de fonctionnement nominal ?

Réponse 1:



Exercice 2 suite

Ex3 : Paramètres d'une éolienne à vitesse fixe de 300 kW

Question 2 :
De quel type d'éolienne s'agit-il : éolienne lente ou éolienne rapide ?

Réponse 2 :



Exercice 3 suite

Ex3 : Paramètres d'une éolienne à vitesse fixe de 300 kW

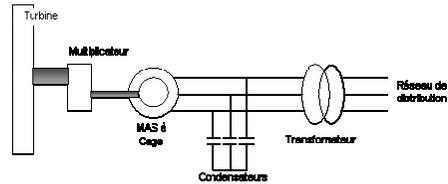
Question 3 :
Quelle est le rapport du multiplicateur k ?

Réponse 3 :



Exercice 3

Ex2 : Vitesse de rotation et puissance électrique d'une éolienne



Soit l'installation suivante : La turbine de l'éolienne entraîne une génératrice asynchrone (MAS) à cage qui débite sur un réseau de distribution.

- Les données sont :
 Densité de l'air : $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$
 Rayon des pales : $R = 45 \text{ m}$
 Coefficient du multiplicateur : $k = 70$
 Nombre de paires de pôles de la MAS : $p = 2$
 Fréquence du réseau : $f = 50 \text{ Hz}$

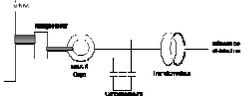


Exercice 3 suite

Ex2 : Vitesse de rotation et puissance électrique d'une éolienne

Question 1 :

- Calculer pour un glissement g de -1% :
- La vitesse N_r du rotor de la génératrice asynchrone en tr/min et tr/s.
- La vitesse de l'arbre primaire de l'éolienne en rad/s et en tr/min.



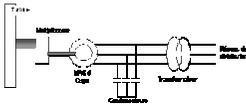
Réponse 1 :



Exercice 3 suite

Ex2 : Vitesse de rotation et puissance électrique d'une éolienne

Question 2 : On suppose que la vitesse du vent est constante et égale à 10 m/s . La valeur maximale du coefficient de puissance C_p réel est $0,4$. Calculez pour une vitesse de rotation des pales de $N=21\text{ tr/min}$ la vitesse spécifique et la puissance électrique maximum P_e fournie au réseau par l'éolienne. On prendra un rendement de multiplicateur à 97% et de la génératrice de 96% .



Réponse 2 :



Merci de votre attention

