



Conférence sur

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

Diplôme d'Université
« Technicien Installations Energies Renouvelables »
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

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

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 $1,74 \times 10^{17}$ W .



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

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

Source: www.windpower.org

1/12

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

V1 : Le potentiel éolien

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.

Source: www.windpower.org

2/12

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

V1 : Le potentiel éolien

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 : $S = \pi R^2 = 5000 \text{ m}^2$
 Masse d'un disque d'air d'une surface de 5000 m² et de 10 mètres d'épaisseur pour $V=10\text{m/s}$ soit 36km/h :
 $m = \rho \cdot V \cdot S = 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot 5000 \text{ m}^2 \cdot 10 \text{ m} = 61250 \text{ kg} = 61,25 \text{ tonnes}$
 soit : $E_c = 3,06 \cdot 10^6 \text{ Joules}$ soit $3,06 \text{ MJ}$

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

Source: www.windpower.org

3/12

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

V1 : Le potentiel éolien

La puissance du vent

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

$$P_{\text{vent}} = \frac{E_c}{t = 1\text{s}} = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

Dans l'exemple précédent :
 $E_c = 3 \text{ MJoules}$ soit $P_{\text{vent}} = 3 \text{ MW}$
 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

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

V1 : Le potentiel éolien

Variations du vent

1- Augmentation du vent avec l'altitude

Couche limite atmosphérique

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

V1 : Le potentiel éolien

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.

Vitesse du vent avec l'altitude
 Ho=2m, V0=5m/s
 • n=0,1 peu rugueux- mer, plaine
 ■ n=0,4 très rugueux- ville

Terrain peu rugueux n=0,1

Terrain très rugueux n=0,4

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

V1 : Le potentiel éolien

Variations du vent

2- Accélération du vent

Effet goulet

Effet colline

DEPLACEMENT D'AIR SUR UNE COLLINE HAUTE

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

V1 : Le potentiel éolien

Variations du vent

3- fluctuations temporelles du vent

Vents en montagne

situation diurne / situation nocturne
 vent de vallée / vent de montagne
 circulations transversales

Brises de terre/mer

Rayonnement solaire / Brise de mer / Circulation de l'air
 Rayonnement nocturne (le sol se refroidit) / Brise de terre / Circulation de l'air

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

V1 : Le potentiel éolien

Potentiel éolien d'un site

Mât de mesure du vent

40m / 20m

Capteurs:
 A. Anémomètre
 B. Anémographe
 C. Capteur thermique / hygrométrique
 D. Capteur ultrasonique pour une mesure des turbulences

9/12

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

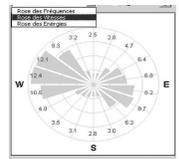
V1 : Le potentiel éolien

Vitesse et énergie du vent

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



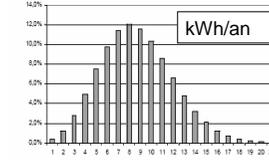
La rose des vents



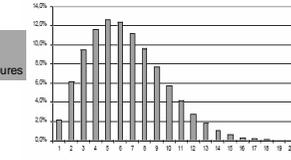
$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V^3$

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

kWh/an



Distribution de l'énergie du vent sur une année



Distribution de la vitesse du vent sur une année

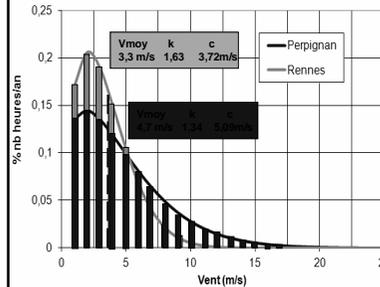
Fréquence en % du nb. d'heures annuelles en fct de V(m/s)

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

Exemples de sites éoliens

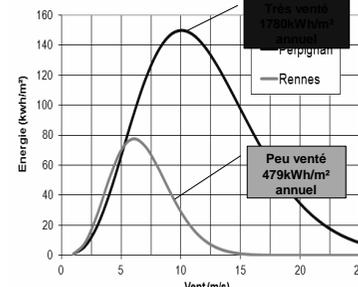
Histogramme de vent de 2 sites en 2012



Vmoy k c
 3.3 m/s 1.63 3.72m/s

— Perpignan
 — Rennes

Energie du Vent de 2 sites en 2012



— Perpignan
 — Rennes

Peu venté
 479kWh/m² annuel

11/12

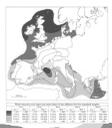
V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Eoliennes à Axe Horizontal V4 : Eoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

V1 : Le potentiel éolien

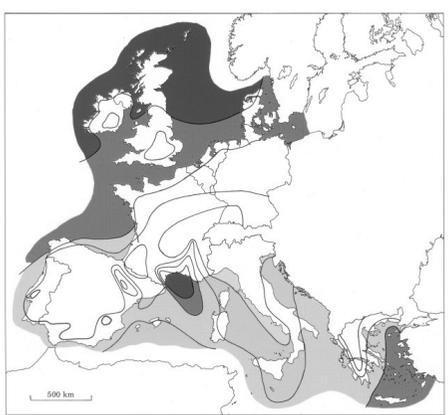
Potentiel éolien d'un site (vitesse moyenne)



Eolien terrestre



Eolien en mer



500 km

Wind resources over open sea (more than 10 km offshore) for five standard heights							
10 m		25 m		50 m		100 m	
ma ⁻¹	Wm ⁻²	ma ⁻¹	Wm ⁻²	ma ⁻¹	Wm ⁻²	ma ⁻¹	Wm ⁻²
> 8.0	> 300	> 8.5	> 300	> 9.0	> 300	> 10.0	> 1100
7.0-8.0	350-600	7.5-8.5	450-700	8.0-9.0	600-800	8.5-10.0	650-1100
6.0-7.0	250-300	6.5-7.5	300-450	7.0-8.0	400-600	7.5-8.5	450-650
4.5-6.0	100-250	5.0-6.5	150-300	5.5-7.0	200-400	6.0-7.5	250-450
< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250

12/12

Vidéo 2

NOTIONS D'AÉRODYNAMIQUES

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

13/12

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

- Résultats découverts par le physicien Albert BETZ en 1919.



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



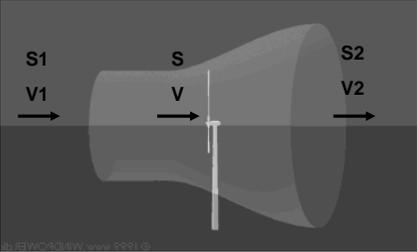
1/13

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

Le freinage idéal du vent

Hypothèses impossibles

- si $V_2 = V_1 \rightarrow$ pas d'éolienne donc $P_{\text{récupérée}}=0$
- si $V_2=0$ c.à.d $V=V_1 \rightarrow$ l'hélice ne tourne pas donc $P_{\text{récupérée}}=0$



Donc $0 < V_2 < V_1$

Incompressibilité de l'air
Le débit entrant =débit sortant

$$S_1 \cdot V_1 = S \cdot V = S_2 \cdot V_2$$

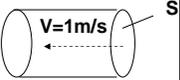
On en déduit que $S_2 > S_1$

2/13

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

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

1/13

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

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 :

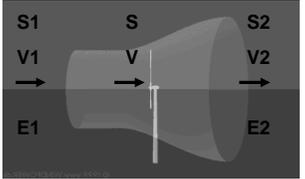
$E_1=1/2 . m.V_1^2$	$\Delta E= E_1-E_2$
$E_2=1/2 . m.V_2^2$	$\Delta E=1/2 . m.(V_1^2-V_2^2)$

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

2/13

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 de BETZ

La puissance extraite est fonction de V_1 et V_2 :

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

La puissance max est obtenue quand le rapport :

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

Ce qui donne une puissance maximum de :

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

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 : Éoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Théorie de BETZ

$S_1 = \frac{2}{3} S$ S $S_2 = 2S$

V_1 $V = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{2}{3} V_1$ $V_2 = \frac{1}{3} V_1$

$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3$ $P_{\text{Betz}} = 0,59 P_{\text{vent}}$

4/13

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

P_{BETZ} en fonction de la vitesse du vent

$S = 1\text{m}^2$ et $\rho = 1,25 \text{ Kg/m}^3$

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

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

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		

Permet d'alimenter une habitation

5/13

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

Comparaison entre éolienne urbaine et éolienne de puissance

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

Eolienne Urbaine idéale:

$S = 1\text{m}^2$

$P_{\text{Betz}} = 2,75 \text{ kW}$

Eolienne de Puissance idéale :

Longueur pale = 30m

$S = \pi R^2 = 2827\text{m}^2$

$P_{\text{Betz}} = 7774 \text{ kW} \cong 7,8 \text{ MW}$

→ 1500 foyers

6/13

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

Qu'est ce qui fait tourner les éoliennes ?

Aile portante

Tripale



Américaine



Darrieus



à axe horizontal

Trainée différentielle

Savonius

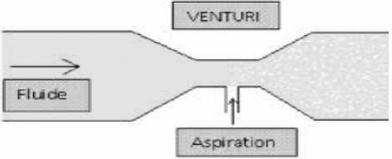


à axe vertical

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

Loi de BERNOULLI

Loi de conservation du débit : $Q_1=Q_2=Q_3$ $S_1 \searrow \quad \nearrow S_3$ $v_3 \nearrow$



Débit entrant $Q_1=S_1.V_1$ Débit sortant $Q_2=S_2.V_2$

Aspiration

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

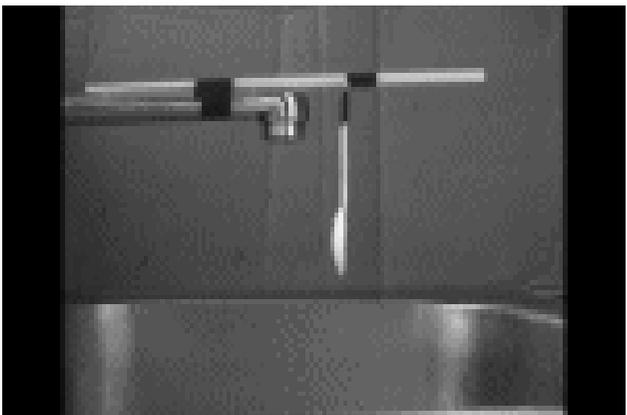
Ce qui implique que lorsque : V augmente $\Leftrightarrow p$ diminue
 V diminue $\Leftrightarrow p$ augmente

8/13

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

Loi de BERNOULLI

Quelques applications domestiques



Effet Coanda
(animation You Tube)

9/13

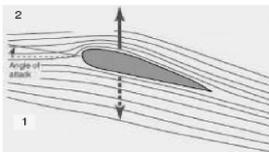
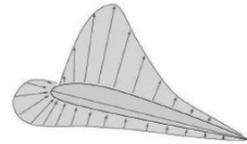
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

Théorie de l'aile portante

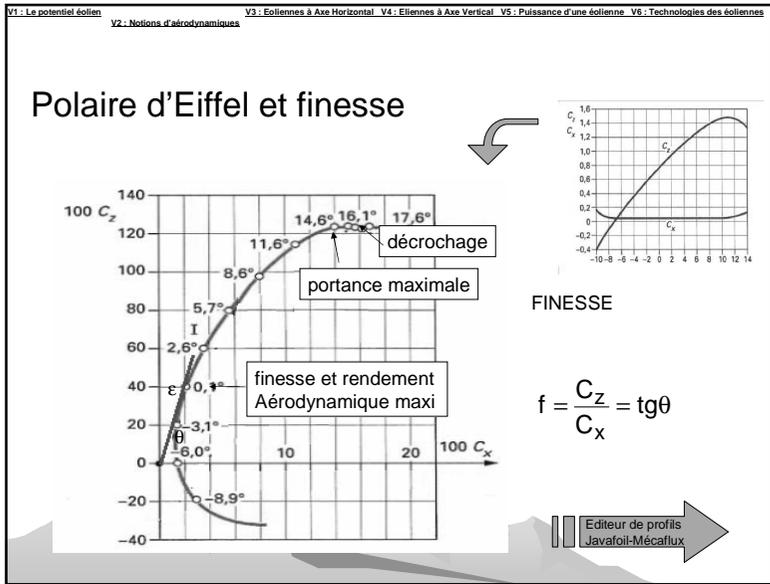
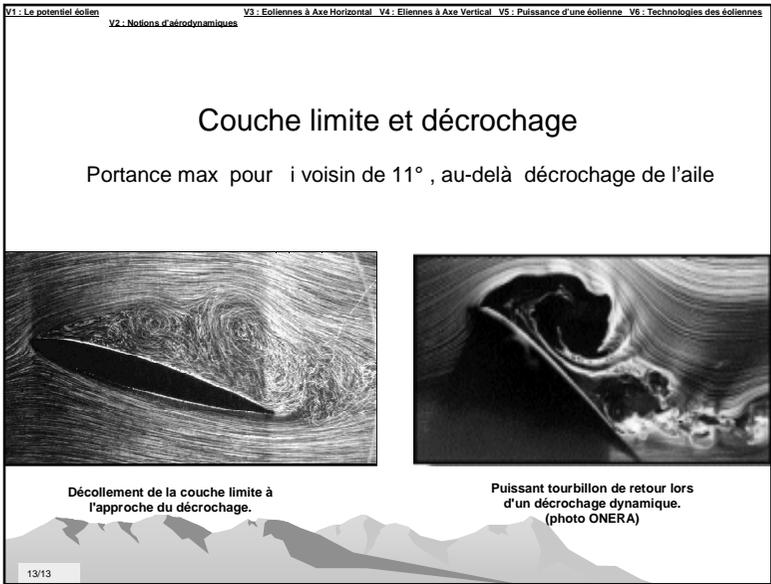
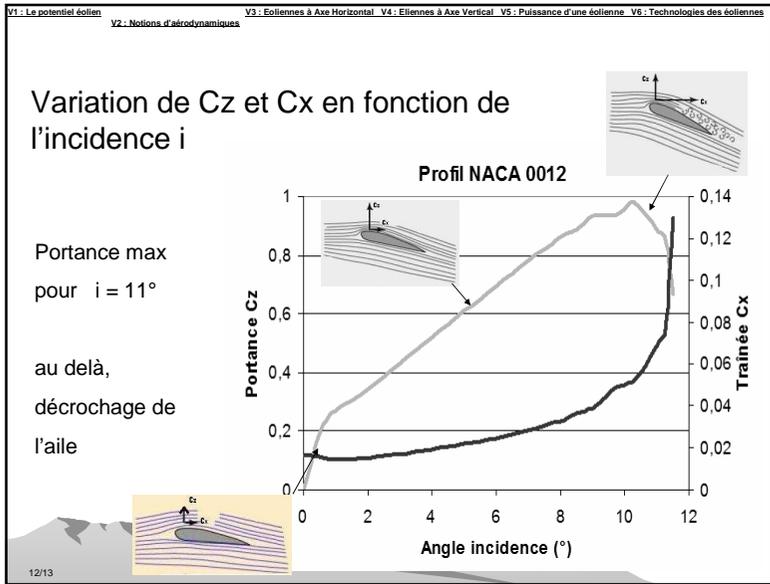
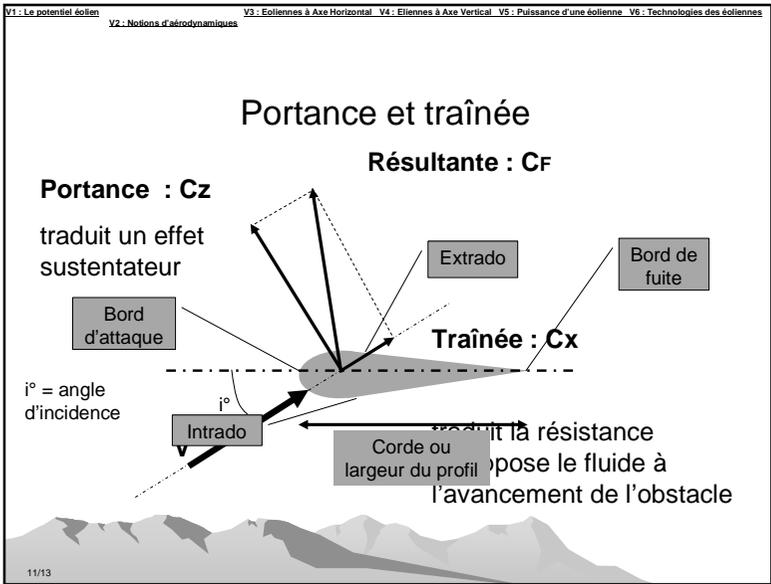
Lorsqu'on diminue la section de l'écoulement d'un fluide :

- sa vitesse d'écoulement augmente (débit=Cte)
- sa pression diminue (Bernoulli)

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

10/13



Vidéo 3

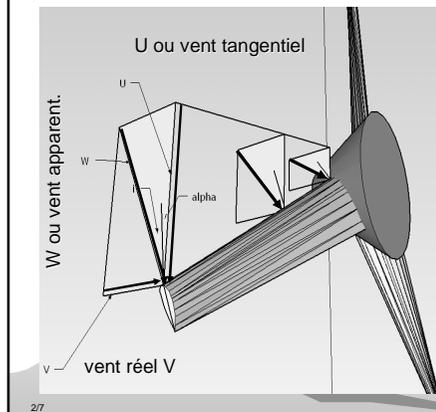
LES ÉOLIENNES À AXE HORIZONTAL

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

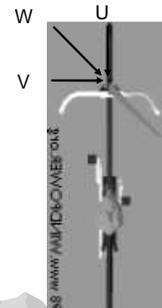
Les éoliennes à axe horizontal



Aérodynamique de la pale

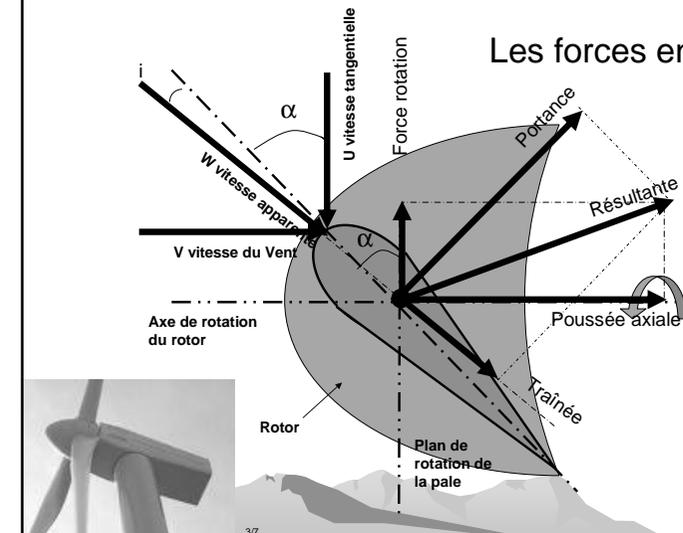


Le vent apparent W n'étant pas constant le long de la pale, pour garder une incidence comprise entre 0 et 12°, l'angle de calage α augmente lorsque l'on se rapproche de l'axe du rotor.



La pale est vrillée

Les forces en jeu



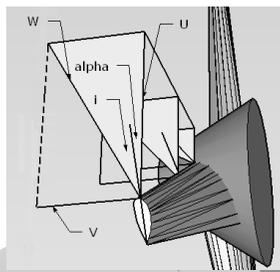
V1 : Le potentiel éolien V2 : Notions d'aérodynamiques V3 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éoliennes à Axe Vertical V5 : Puissance d'une éolienne V6 : Technologies des éoliennes

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 $678,6km/h$ → trop élevée → risque de casse !!!
- On limite la vit. tangentielle à $300 km/h$ ($83m/s$) : Recalculer N ?
 → $N=0,44$ tr/s

$U_o = 2\pi R.N$



Vitesse spécifique

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

lente $< \lambda_o = 3 <$ rapide

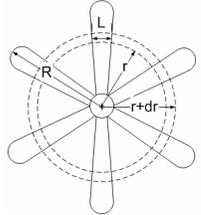
Eolienne Tripale : $\lambda_o=7$ → éolienne rapide
 Eolienne Américaine : $\lambda_o=1,5$ → éolienne lente

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

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

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

6/7

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

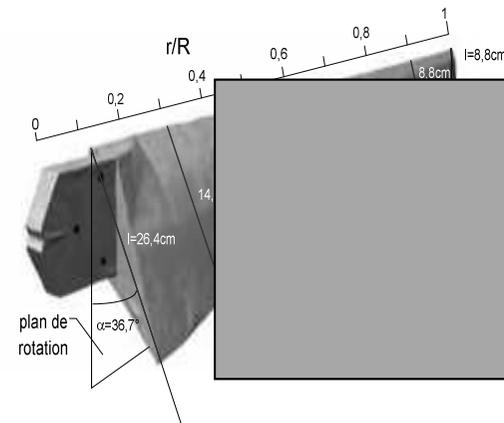
Calculs pale vrillée

(Théorie simplifiée)

nb.pales $p=2$
 $R=0,5m$
 $V_i=9m/s$
 $N=18tr/s$

$\lambda_o = \frac{2\pi NR}{V_i} = 628$

Pale vrillée



A partir de 2 relations, on calcule :

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

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

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

et l'angle de calage

$\alpha = I-i = f(r/R)$
 $\cot g I = \frac{3}{2} \lambda_o \frac{r}{R}$ (2)

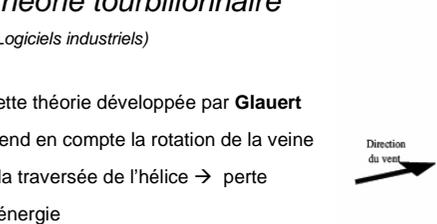
5/7

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 → 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	2
				0	2	1,6	2	1,6	2	2

Demi-sphère creuse

	1,43	0,38	1,
	1,43	0,38	

De

	1,
--	----

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

- 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

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 : $F_x = 1/2 C_x \cdot \rho \cdot S \cdot V^2$

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

Vue de dessus

Vue de face

Coefficient de couple et puissance en fonction de la vitesse spécifique.

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.

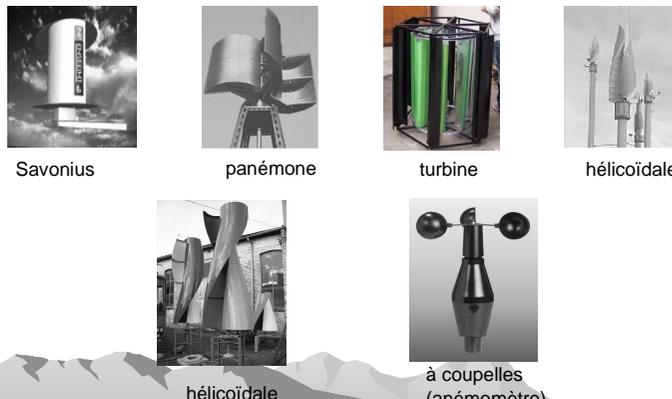
Chaque cercle correspond à une valeur C_d

Coefficient de couple au démarrage en coordonnées polaires (rotors I - II - IV).

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



Savonius panémone turbine hélicoïdale

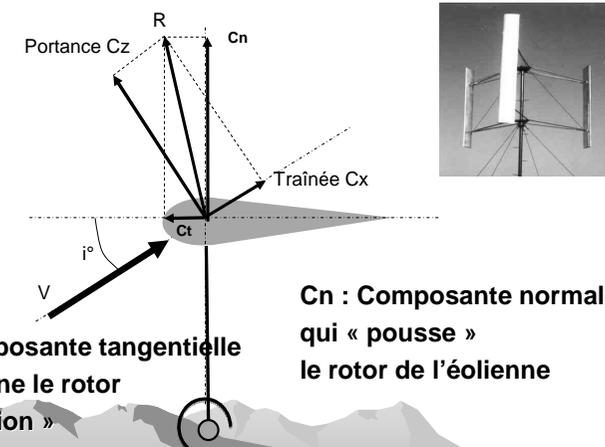
hélicoïdale à coupelles (anémomètre)

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



Cn : Composante normale qui « pousse » le rotor de l'éolienne

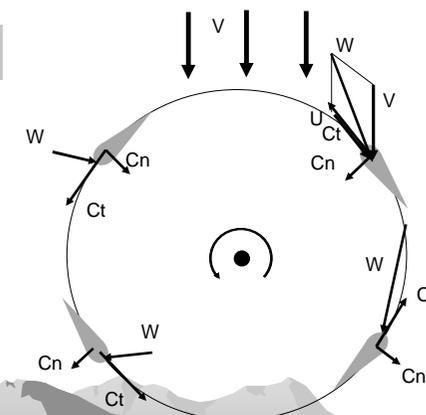
Ct = Composante tangentielle qui entraîne le rotor en « rotation »

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

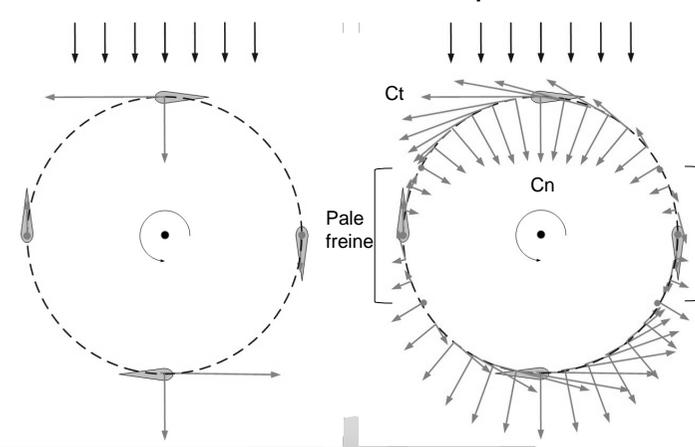
Dans le cas où la Darrieus tourne



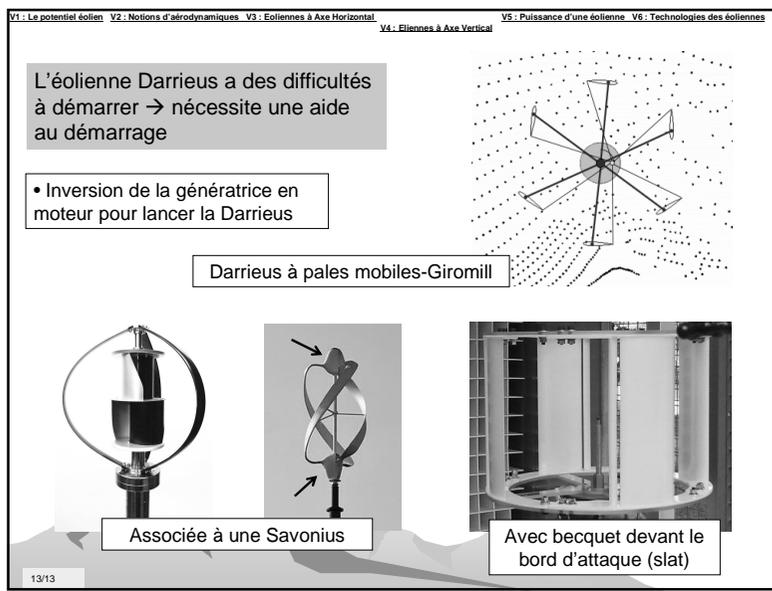
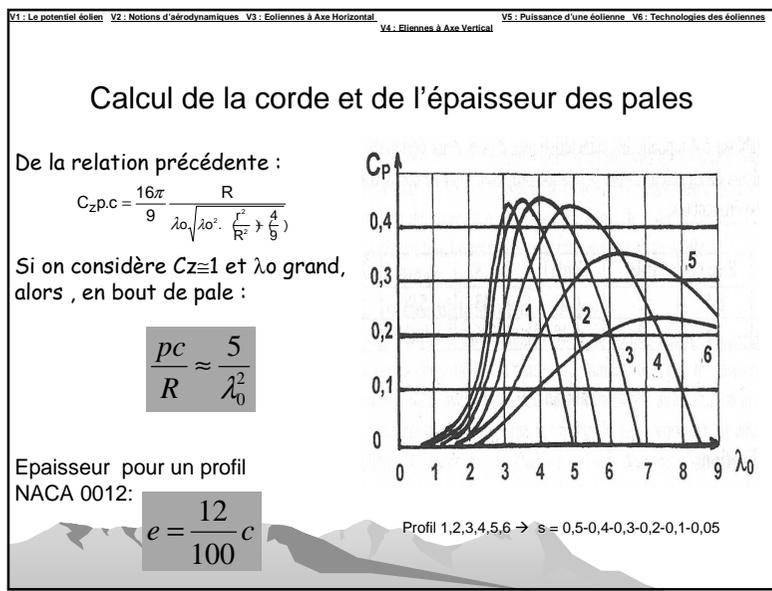
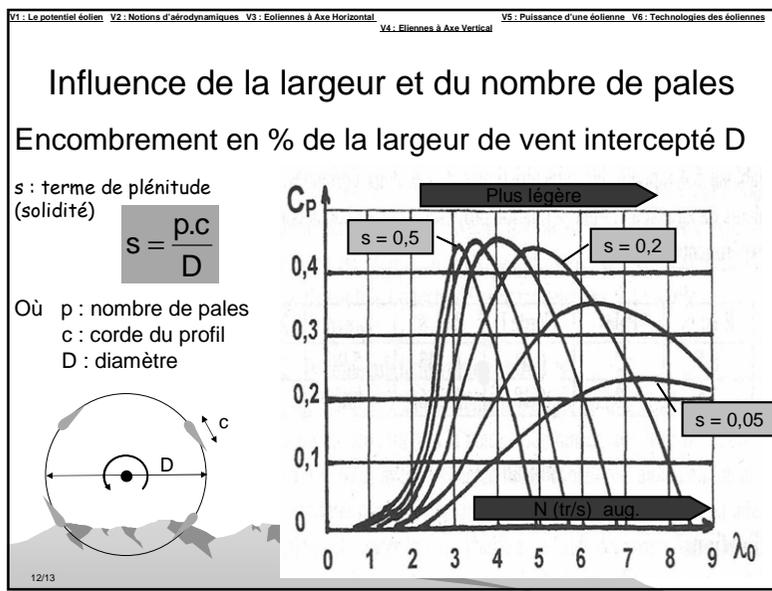
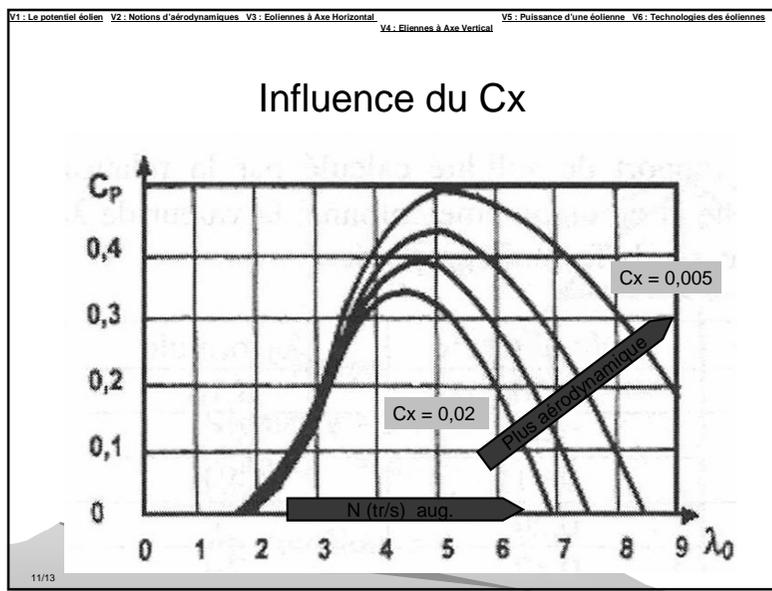
9/13

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



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

Puissance récupérable par une éolienne

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

On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur par la relation :

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

Ainsi la puissance de l'éolienne s'écrit :

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

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

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

^{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 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 :

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

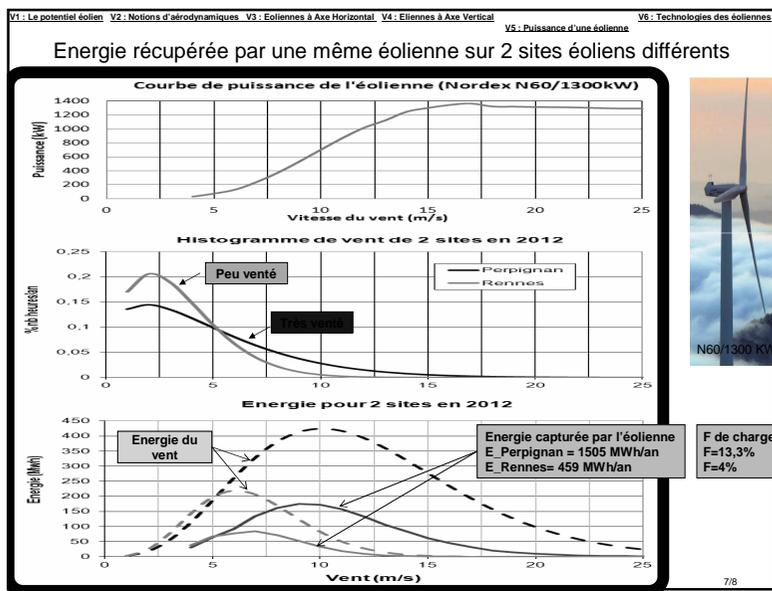
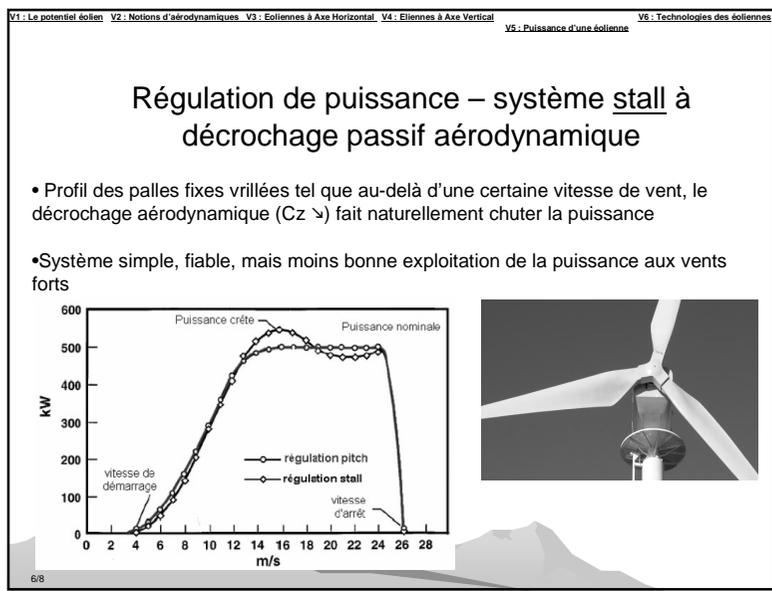
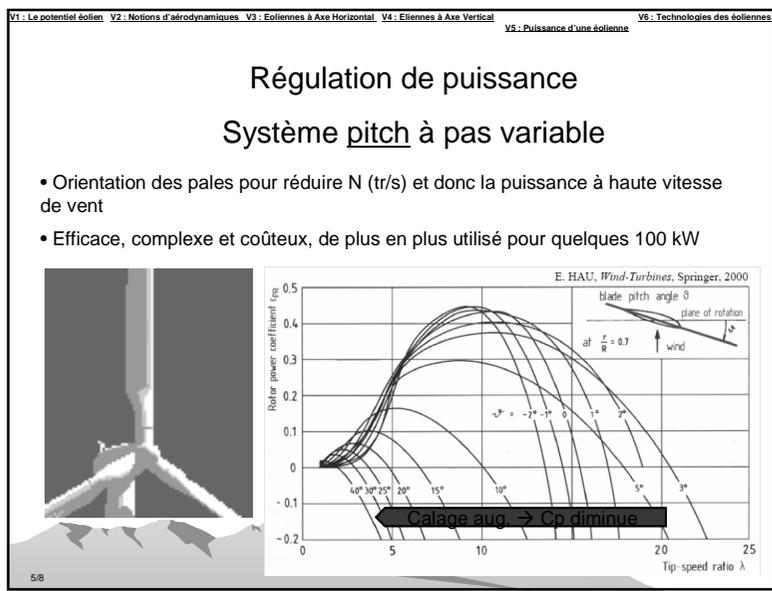
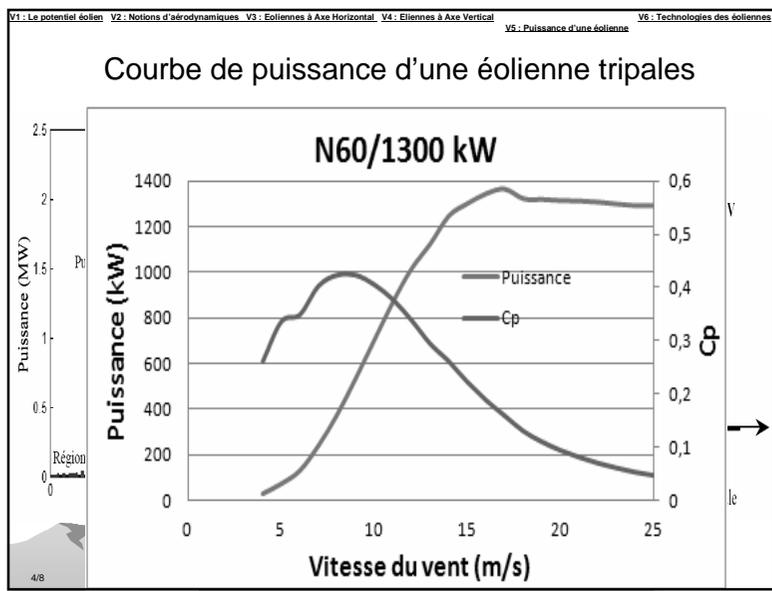
Les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65 % de la limite de Betz : au final, on ne récupère donc globalement que 40 à 50% de l'énergie due au vent.

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)



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

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

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

3 pales composant le rotor

Nacelle

Fût

Le moteur hydraulique d'orientation permet à l'éolienne de se maintenir face au vent.

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

Régulation de puissance des petites machines

Pales fixes vrillées → régulation par décrochage aérodynamique (stall)

0 à 40 km/h

50 à 100 km/h

> 110 km/h

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** : dissipent une grande partie de l'énergie cinétique sans usure
- **Freins mécaniques** : à disques en cas d'urgence

Freins aérodynamiques

Freins mécaniques

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

Bus continu

rotor - multiplicateur - génératrice - courant alternatif à fréquence variable - Bus continu - courant continu - courant alternatif à ondes carrées - courant alternatif à fréquence du réseau

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

champ radial (cylindrique)

champ axial (discoïde)

Moteur de vélo

Génératrice à attaque directe

redresseur à diodes

Redresseur MLI (Modulation largeur impulsion)

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

Relation entre le diamètre du rotor des éoliennes et leur puissance

Ø 30m
0,3MW

Ø 45m
0,6MW

Ø 70m
1,5MW

Ø 125m
5MW

Cathédrale de Strasbourg hauteur : 142m

1 650 kW

400-500 maisons

500kW

100-150 maisons

10 kW

1 maison

Parc éolien – Perpignan

4 x 600kW de Ø=43m

4x1,3MW de Ø=60m

Pour 7000 habitants

5 MW – Offshore

6/8

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

Projet éolien urbain

$P = 400\ 600\ W \text{ à } 40\ 000\ W$
 $P = 4\ 000\ kWh \text{ à } 400\ kWh$
 $R \text{ rotor} = 4,14\ m$
 $R \text{ total} = 11,3 = 8,19\ m$
 Vit. Amorçage = 3m/s
 Vit. Amorçage = 3m/s
 Vit. Amorçage = 3m/s
 Tension = 220 VAC
 Tension = 220 VAC
 Poids = 70 kg
 Prix environ 500 €
 Prix environ 4500 €
 Prix environ 3800 €
 Prix environ 3000 €

1. Éolienne
2. Onduleur
3. Réseau EDF
- 4-5. Utilisateur
6. Compteurs EDF

< produite par le client >
 > Fournie au client <

éclairage
 électroménager

Réseau électrique kWh kWh

Site raccordé au réseau

7/8

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

Impact acoustique des éoliennes

Avion au décollage	150
Bruit industriel	120
Int. voiture	80
Séjour	60
chambre à coucher	40
Chute de feuilles	10
Marteau pneumatique	130
Musique stéréo	100
Bureau	70
Eolienne*	50
Chuchotement	20

Niveau sonore dB(A)

- 60-65
- 55-60
- 50-55
- 45-50
- 40-45
- 35-40
- < 35

Source: AWEA

* Sound pressure level at a distance of 350m

8/8

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

Différents types d'éoliennes à axe horizontal

9/10

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

Différents types d'éoliennes à axe vertical

10/10

Panorama de l'électricité renouvelable

Site de RTE
(Réseau de Transport de l'électricité)

<http://www.rte-france.com/fr/article/panorama-de-l-electricite-renouvelable>

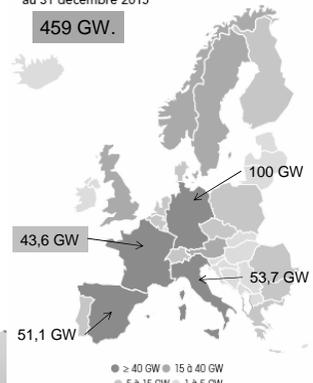


77

Puissance installée et consommation des EnR en Europe

Puissance renouvelable raccordée en Europe au 31 décembre 2015

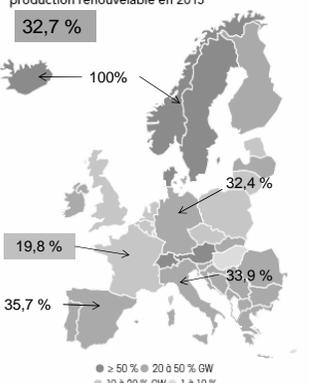
459 GW.



● ≥ 40 GW ● 15 à 40 GW
● 5 à 15 GW ● 1 à 5 GW

Couverture de la consommation par la production renouvelable en 2015

32,7 %



● ≥ 50 % ● 20 à 50 % GW
● 10 à 20 % GW ● 1 à 10 %

78

La filière Eolienne en Europe (30/06/2016)



L'ÉOLIEN EN EUROPE La filière éolienne au 30/06/2016

Puissance éolienne raccordée en Europe au 31 décembre 2015

142 GW



● > 25 GW ● 10 à 25 GW ● 5 à 10 GW
● 1 à 5 GW ● < 1 GW

Production éolienne en Europe en 2015

256 TWh



● > 30 TWh ● 10 à 30 TWh ● 1 à 10 TWh ● < 1 TWh

Couverture de la consommation par la production éolienne en 2015

7,9 %



● > 15 % ● 5 à 15 % ● 0,5 à 5 % ● < 3 %

79

Production et couverture des besoins EnR en France (30/06/2016)

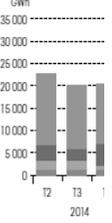
94 TWh
27 705 GW

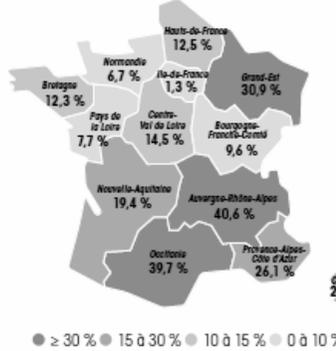
Couverture de la consommation par la production renouvelable, en année glissante

AN
T2 2015

Production renouvelable

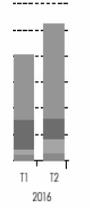
● Bioénergies ● Solaire

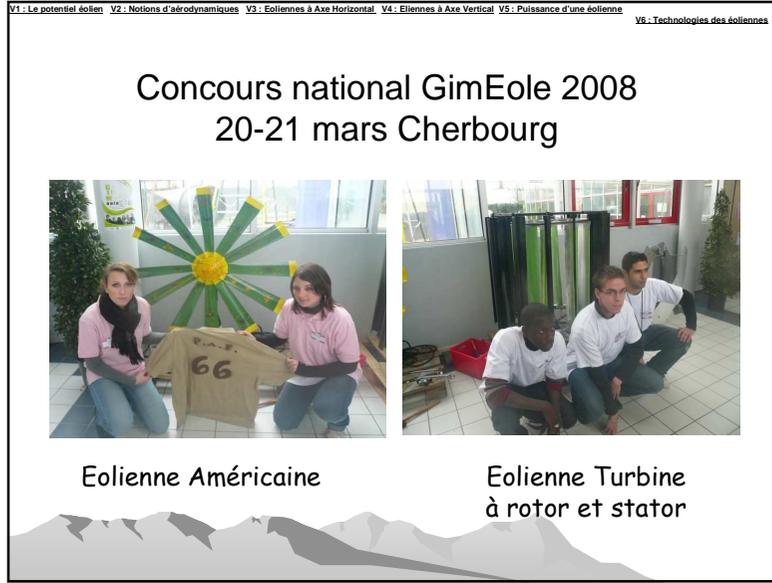
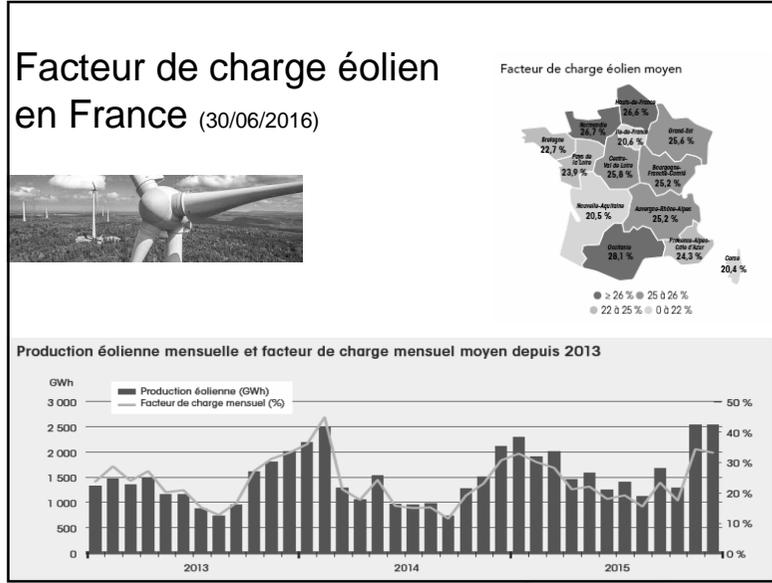
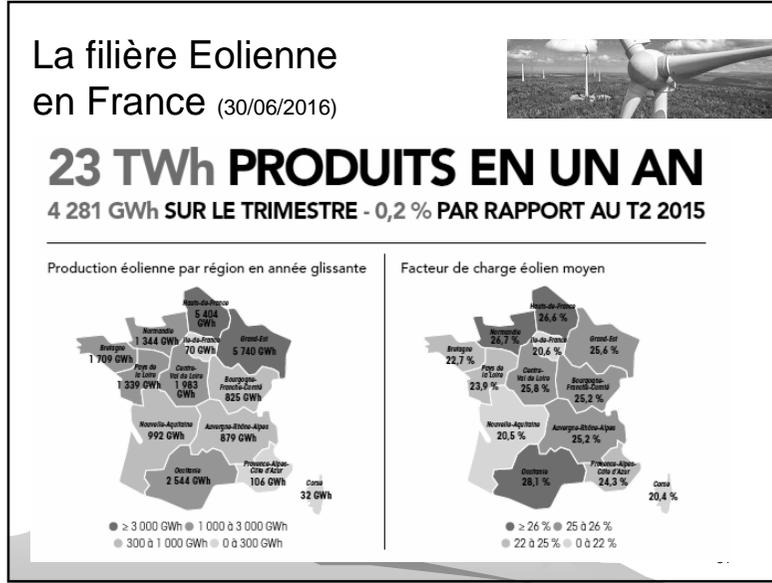




● ≥ 30 % ● 15 à 30 % ● 10 à 15 % ● 0 à 10 %

Évolution de la production par région





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

Ex. 1-2-3

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

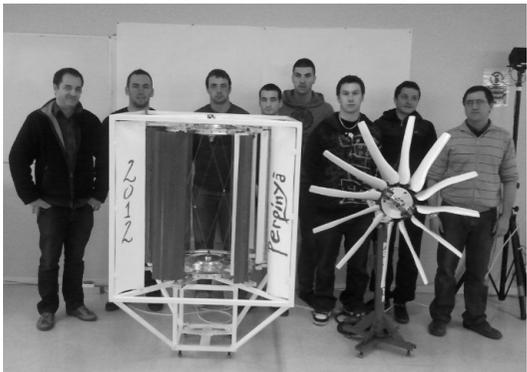


Eolienne de type "Turbine"
à stator et rotor
avec double génératrices

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 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éoliennes 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 : Éoliennes à Axe Horizontal V4 : Éoliennes 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

Puissance du Vent	$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3$	Coefficient de puissance	$C_p = \frac{P_{éolienne}}{P_{vent}}$
Puissance max V1 vent amont V vent sur le rotor V2 vent aval	$v = \frac{V1+V2}{2} = \frac{2}{3}V1 \quad V2 = \frac{V1}{3}$	Coefficient de puissance max.	$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0,593$
Puissance max ou de BETZ	$P_{Betz} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3$	Puissance éolienne	$P_{éolienne} = C_p P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S C_p V_1^3$
Vitesse spécifique à r	$\lambda = \frac{U}{V_1} = \frac{\omega r}{V_1} = \frac{2\pi N r}{V_1}$	Moment (couple)	$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi N}$
Vitesse spécifique en bout de pale R	$\lambda_0 = \frac{U_0}{V_1} = \frac{\omega R}{V_1} = \frac{2\pi N R}{V_1}$	Coefficient de moment	$C_m = \frac{C_p}{\lambda_0}$
Force de portance	$F_Z = \frac{1}{2} \rho C_Z S V_1^2$	Rendement aérodynamique	$\eta_a = \frac{C_p}{0,593}$
Force de traînée	$F_X = \frac{1}{2} \rho C_X S V_1^2$		

Bibliographie

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

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 C_p égal à 0,2. Quel sera la longueur de notre pale ou le rayon de la surface balayée par la turbine ?

Réponse :

A partir de la formule du cours du coefficient de puissance C_p :



Avec : $P = 750.10^3 \text{ W}$

$$V = 13,8 \text{ m/s}$$



$$C_p = 0,2$$



Exercice 2

Ex2 : 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

Rapport du multiplicateur : 35

Vitesse nominale de la MAS : 1515 tr/min

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



Exercice 2 suite

Ex2 : 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:

On calcule le coefficient de puissance de l'éolienne :



Exercice 2 suite

Ex2 : 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 :

On calcule la vitesse spécifique de l'éolienne :



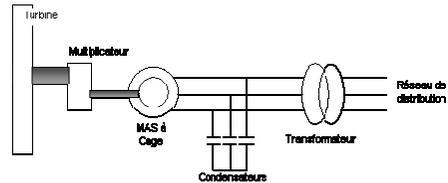
Exercice 2 suite
Ex2 : Paramètres d'une éolienne à vitesse fixe de 300 kW

Question 3 :
 Quelle est la vitesse nominale N du rotor de la génératrice ?

Réponse 3 :



Exercice 3
Ex3 : 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.

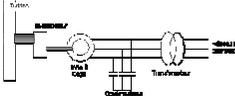
Les données sont :
 Densité de l'air : $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$
 Rayon des pales : $R = 45 \text{ m}$

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
Ex3 : Vitesse de rotation et puissance électrique d'une éolienne

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

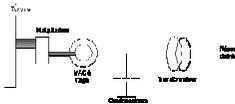


Réponse 1 : si $p=2$ alors $N_s=1500 \text{ tr/mn}$



Exercice 3 suite
Ex3 : 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 $N=21 \text{ tr/mn}$ 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 : $C_p \text{ max} = 0,4$ à cause de la limite de Betz, pour une éolienne de puissance réelle.

La puissance mécanique à la sortie de la turbine est :

La puissance électrique à la sortie de la génératrice est :



