

# EOLIENNE : Rotor – Pales – Puissance (1/2)

**1) Energie du vent sur une pale :** Soit une éolienne de rayon R. Considérons un élément de pale de largeur  $dr$  situé au rayon  $r$ . Cet élément est animé d'un mouvement de rotation avec une vitesse angulaire  $\Omega$ . En coupe (voir figure ci-contre), cet élément de pale a localement un profil d'aile d'avion. Cet élément est soumis à un vent relatif  $W$ , composition vectorielle du vent naturel extérieur  $U$  et du vent apparent  $r.\Omega$  que se crée la pale en tournant.

**LEGENDE :** -  $dC_x$  traînée élémentaire du profil  
-  $dC_z$  portance élémentaire du profil -  $dT$  traînée élémentaire de la pale -  $dQ$  couple élémentaire de la pale

Le vent relatif a une incidence  $i$  par rapport à l'axe de la pale (corde de référence), cet axe étant lui-même incliné d'un angle "alpha" par rapport au plan de rotation : "alpha" est l'angle de calage de la pale au rayon  $r$ . L'angle d'inclinaison  $l$  est la somme de l'angle de calage "alpha" et de l'angle d'incidence  $i$ .

Le vent relatif  $W$  induit une poussée élémentaire  $dC_z$  ainsi qu'une traînée élémentaire  $dC_x$ . La force  $dC_z$  tend à faire tourner la pale, la force  $dC_x$  agissant dans le sens opposé. En changeant de coordonnées, le couple de force ( $dC_z$ ,  $dC_x$ ) est équivalent au couple ( $dQ/r$ ,  $dT$ ) avec  $dQ$  le couple élémentaire produit par l'élément de pale et  $dT$  la traînée élémentaire. La **puissance élémentaire  $dP$**  se déduit par la formule :  **$dP = dQ.\Omega$**  .

En fait, l'écoulement étant perturbé suite à la rotation de l'éolienne, on introduit encore deux coefficients d'induction, l'un axial ( $a$ ), l'autre radial ( $a'$ ). La vitesse du vent naturel (le vent extérieur) est ainsi modifiée en  $U.(1-a)$  et la vitesse angulaire en  $\Omega.(1+a')$  .

A noter que le profil évolue le long de la pale : son calage évolue, sa largeur (la corde du profil) diminue, son épaisseur diminue elle aussi. Enfin, on introduit des correctifs expérimentaux pour tenir compte de l'allongement fini de la pale ou des pertes en extrémités (vortex).

**2) Loi de Betz :** La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent . Démonstration faite dans la diapo précédente (**EOLIENNE : La limite de BETZ – Rendement Optimal**) (la **valeur maximale** pour la **puissance extractible du vent** est de **0,59 ou 16/27** de la puissance totale contenue dans le vent)

**3) Paramètres d'une éolienne :** Trois principaux paramètres de fonctionnement permettent de caractériser un capteur éolien et notamment son efficacité. Le **premier paramètre** de fonctionnement est relatif à la vitesse périphérique (ou vitesse en bout de pale)  $U = \omega R$  (avec  $\omega$  la vitesse de rotation de la machine éolienne et  $R$  le rayon d'extrémité de la pale) ; ce **paramètre de rapidité ou vitesse spécifique noté  $\lambda$**  est le rapport de la vitesse périphérique  $U$  en bout de pale à la vitesse  $V$  du vent :

$$\lambda = U / V = (\omega R) / V$$

Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre: si  $\lambda$  est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente; au-delà, l'éolienne est dite rapide. A titre d'exemple, des éoliennes bipales peuvent avoir un paramètre  $\lambda$  égal à 20. Cependant, une grande vitesse de rotation peut entraîner des nuisances sonores.

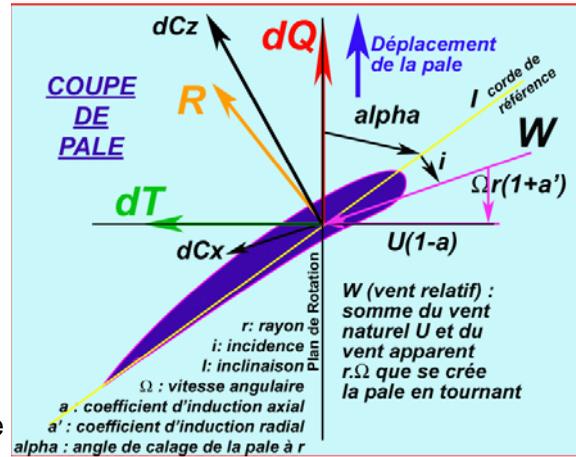
Le **second paramètre** qui caractérise le capteur éolien est le **coefficient de puissance noté  $C_p$** . Il est défini par le rapport de la puissance  $P_m$  recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait dans le disque du rotor en son absence:

$$C_p = P_m / (0.5 \lambda S V^3) \text{ (La valeur maximale du } C_p \text{ définie par la loi de Betz, est égale à 0,592)}$$

Le **troisième paramètre** important est le **coefficient du couple** : c'est le rapport du couple moteur  $C_m$  qui s'exerce sur l'arbre de sortie du capteur éolien ( $C_m = P_m / \omega$ ) au couple aérodynamique  $C_a$ .

$$C_c = C_m / C_a = C_p / \lambda$$

Les paramètres  $C_p$  et  $C_c$  caractérisent les performances du capteur et sont habituellement représentés en fonction de  $\lambda$ .



## 4) Air en mouvement (vent) - Puissance motrice

La force exercée par un courant d'air sur une surface normale à sa direction est proportionnelle à cette surface et au carré de la vitesse relative de l'air par rapport à la surface. Quand le courant d'air n'est pas perpendiculaire à la surface, la pression est proportionnelle :

- 1° à la section droite du courant d'air qui frappe sur la surface, en admettant, pour la direction de ce courant, celle de la vitesse relative de l'air ;
- 2° au sinus de l'angle que fait avec la surface la direction du vent ;
- 3° au carré de la vitesse relative du vent par rapport à la surface .

Il s'en suit la formule empirique donnant la **force F** (en Newton) pour un **vent de vitesse V** (en m/s) frappant normalement une **surface plane S** (en m<sup>2</sup>) :  **$F = 1,2 \cdot S \cdot V^2$**

Le tableau ci-dessous indique les pressions (en bar) pour les vitesses observées :

Désignation des vents	Vitesse (en m/s)	Vitesse (en Km/h)	Pression (en bar)	Désignation des vents	Vitesse (en m/s)	Vitesse (en Km/h)	Pression (en bar)
Vent modéré	2,5	9	0,00075	Vent violent	15	54	0,027
Vent frais	4,7	17	0,00265	Tempête	30	108	0,108
Vent fort	7	25	0,0059	Ouragan	40	144	0,192
				...	47	170	0,265

La pression d'une masse d'air sur la surface d'un cylindre a pour valeur 0,57 de la pression exercée sur une surface plane égale à la projection de ce cylindre.

### Evaluation du travail :

Soient : V (m/s) la vitesse du vent, P (en bar) la pression (10 fois la Force F en Newton divisée par la surface en cm<sup>2</sup>), S (en m<sup>2</sup>) la surface plane mobile sur laquelle s'exerce la force pendant le temps T (en seconde) ; le **travail W (en Joule) recueilli par la surface mobile** a pour expression :  **$W = P \cdot S \cdot V \cdot T$**

Soient maintenant :  $\gamma$  le poids spécifique de l'air, SV le volume d'air qui passe en 1 seconde sur la surface S ;  $\gamma SV$  sera le poids de ce volume et  $\gamma SV/g$  sa masse.

L'expression  **$E = (\gamma SV/g) \cdot V^2/2$**  représente l'**énergie (en Joule) par seconde** emmagasinée dans la masse gazeuse ; cette énergie est **proportionnelle au cube de la vitesse du vent** .

A 0 degré sous une pression atmosphérique normale de 76 cm de mercure, 1 m<sup>3</sup> d'air pèse 1293 g ou 1,3 Kg ; dans ces conditions la quantité d'énergie disponible en J à la seconde ou puissance (en watt) est :

$$E = (\gamma SV/g) \cdot V^2/2 = 0,65SV^3$$

**Exemple** : pour S = 0,049 m<sup>2</sup> ( $\Phi = 25$  cm) : 1 coquille dont R = 12,5cm



Désignation des vents	Vitesse (en m/s)	Vitesse (en Km/h)	Puissance (en Watt)	Désignation des vents	Vitesse (en m/s)	Vitesse (en Km/h)	Puissance (en Watt)
Vent modéré	2,5	9	0,5	Vent violent	15	54	107
Vent frais	4,7	17	3,3	Tempête	30	108	860
Vent fort	7	25	11	Ouragan	40	144	

Si 3 coquilles , on peut espérer „ramasser“ 10 Watt par vent frais ; extrapolé à la journée cela représente 240 Wh (c'est un minimum) : l'expérience est à tenter !!!

Pour des pales, celles-ci reçoivent une pression égale à leur surface réellement exposée au vent .

**Force centrifuge** :  **$F = m\omega^2 r = P(\text{poids de la pale})/g \cdot V^2/r = mV^2/r$**  sachant que g=9,81 (pesanteur)

**Exemple** : soit une pale de 400 grammes, de rayon 70 cm avec une vitesse périphérique de 35 Km/h correspondant à 664 tr/mn = 11tr/s = 69,5 rd/s

Le calcul donne F = 137 Kg (attention aux attaches)