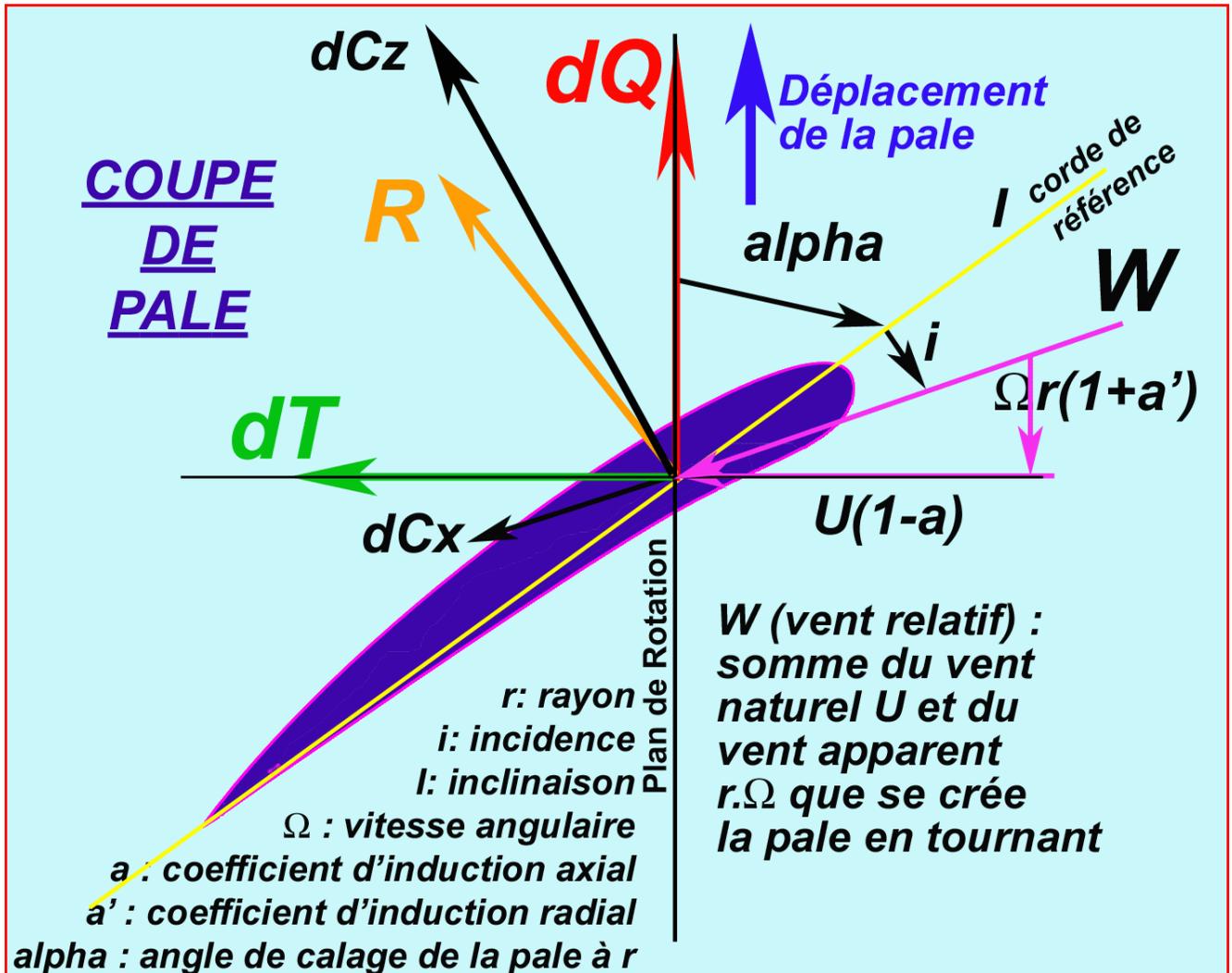


EOLIENNE : ROTOR - PALES - PUISSANCE

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 Ω .

En coupe (voir figure ci-dessous), 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 :

dCx traînée élémentaire du profil - dCz 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 : $dP = dQ \cdot \Omega$.

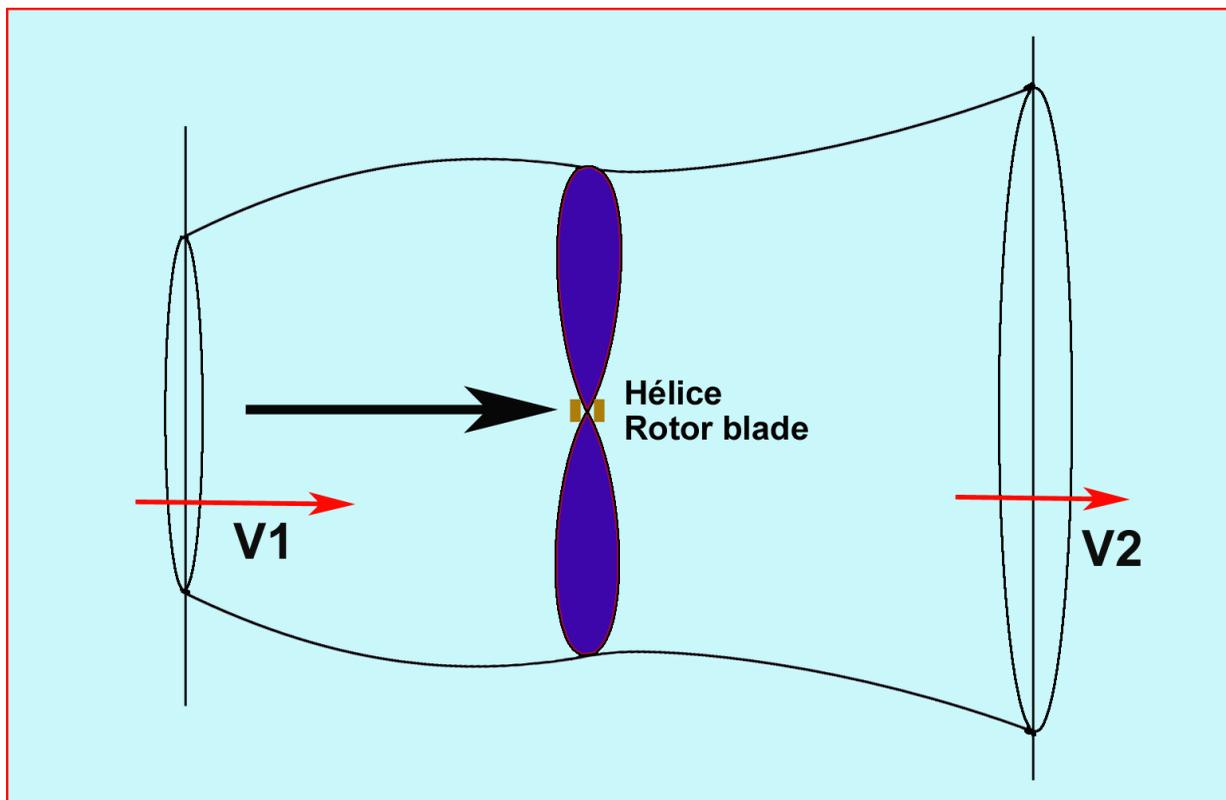
En fait, l'écoulement étant perturbé suite à la rotation de l'éolienne, on introduit encore deux coefficients d'induction, l'un axial (a), l'autre radial (a'). La vitesse du vent naturel (le vent extérieur) est ainsi modifiée en $U \cdot (1-a)$ et la vitesse angulaire en $\Omega \cdot (1+a')$.

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.

Supposons que la vitesse moyenne du vent traversant la surface balayée par le rotor est égale à la moyenne de la vitesse moyenne du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne (v_1), et de sa vitesse après le passage à travers le plan de rotor (v_2), soit $1/2 \cdot (v_1 + v_2)$.



La masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde est égale à :

$$m = 1/2 \cdot \rho F (v_1 + v_2)$$

où m est la masse par seconde, ρ la densité de l'air, F la surface balayée par le rotor,

et $[1/2(v_1 + v_2)]$ la vitesse moyenne du vent traversant le rotor. La puissance extraite du vent par le rotor est égale à la masse multipliée par le carré de la diminution de la vitesse du vent (selon la seconde loi de Newton) : « Dans un référentiel Galiléen, si le vecteur vitesse V_g du centre d'inertie d'un solide varie, la somme $F = \Sigma f$ des forces qui agissent sur lui n'est pas nulle. Sa direction et son sens sont ceux de la variation de V_g entre deux instants proches. »

$$P = (1/2) m (v_1^2 - v_2^2)$$

En substituant m (de la première équation) dans cette expression, nous obtenons l'expression suivante de la puissance extraite du vent :

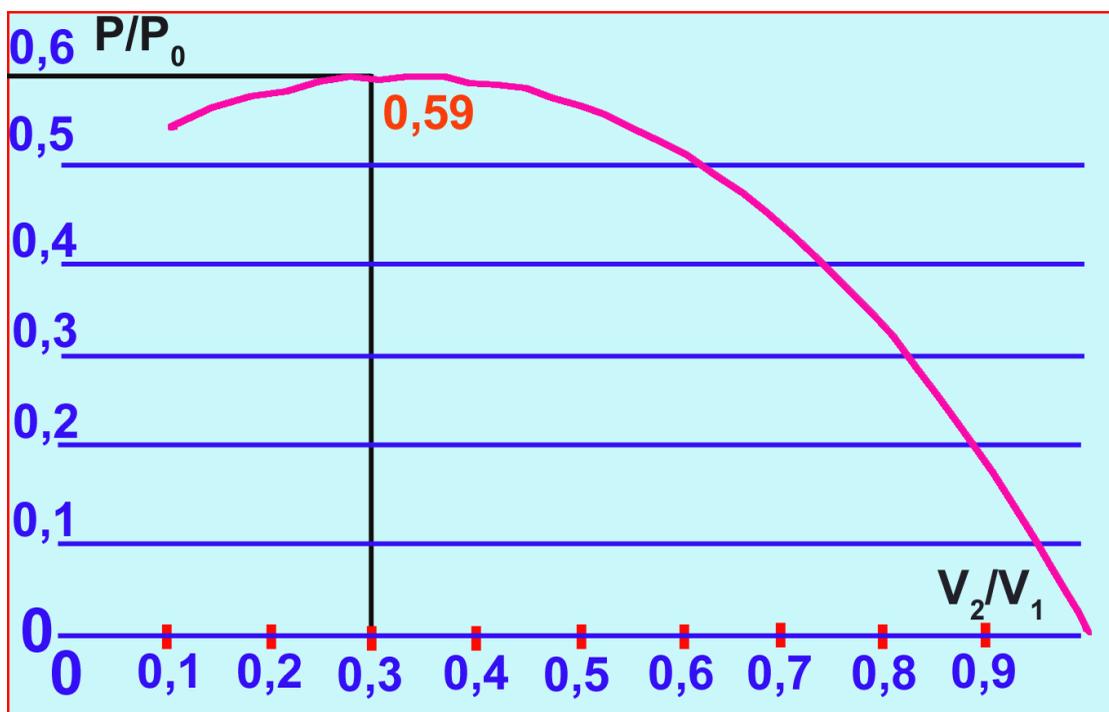
$$P = (\rho/4) (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) F$$

Comparons maintenant notre résultat avec la puissance totale d'un flux d'air non perturbé traversant une surface similaire F sans la présence d'un rotor qui ralentit le vent. Nous appelons cette puissance P_0 :

$$P_0 = (\rho/2) v_1^3 F$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$(P/P_0) = (1/2) \{1 - (v_2/v_1)^2\} \{1 + (v_2/v_1)\}$$



Traçons P/P 0 en fonction de v_2 / v_1 : on peut voir que la fonction atteint son maximum pour $v_2 / v_1 = 1/3$, (freinage du vent à 1/3 de sa vitesse originale) la valeur maximale pour la puissance extractible du vent étant 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 ω 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 λ est le rapport de la vitesse U à la vitesse V du vent:

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

Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre: si λ 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 λ 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:

$$C_p = P_m / (0.5 \lambda S V^3)$$

(La valeur maximale du C_p 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 λ .

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 m²) :

$$F = 1,2 \cdot S \cdot V^2$$

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 cm²), S (en m²) 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 : γ le poids spécifique de l'air, SV le volume d'air qui passe en 1 seconde sur la surface S ; γSV 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 m³ 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 m² (Φ = 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 : $F = P(\text{poids de la pale})/g \cdot V^2/r = mV^2/r$ 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)