

Chapitre 3

Conversion de l'énergie du vent

- Transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique,
- Vitesse spécifique (TSR), ...
- Coefficient de puissance,
- Limite de Betz,

3.1 Conversion de l'énergie éolienne

3.1.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (figure 2-1) s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v^2 \quad (2-1)$$

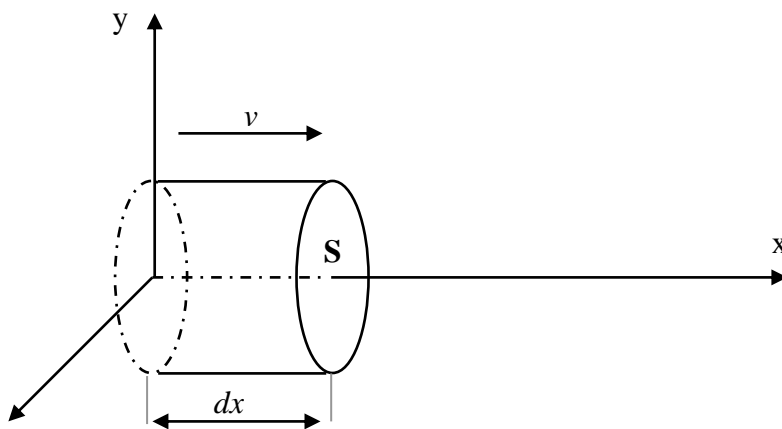


Figure 2-1 : colonne d'air animée d'une vitesse v

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant $dx = v dt$, on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3 \quad (2-2)$$

ρ : masse volumique de l'air (en Kg/m^3).

v : vitesse instantanée du vent (en m/s).

E_c : en joules.

3.2 La vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio)

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine $\Omega_t R_t$ sur la vitesse instantanée de vent V (figure 2-2) et donné par l'expression suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \text{-----} (2-3)$$

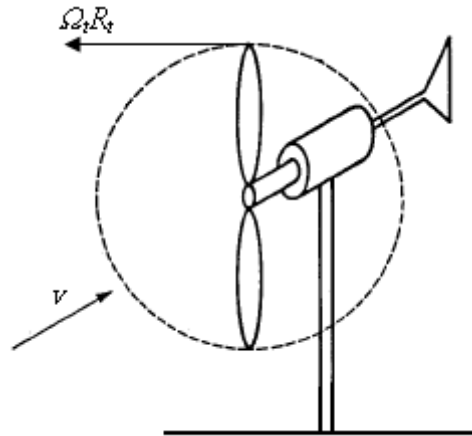


Figure 2-2 : Vitesse de vent (v) et vitesse tangentielle de l'aube ($\Omega_t R_t$)

R_t : Rayon de la surface balayée en m.

V : Vitesse de vent en m/s.

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

3.3 Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible:

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} \text{-----} (2-4)$$

Le coefficient C_p est variable, il est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ .

3.4 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. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de **Betz** pour la première fois.

Démonstration de la limite de BETZ

Considérons le système de la figure 2-3 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur, la vitesse V_2 en aval, et V la vitesse du vent au niveau de la turbine.

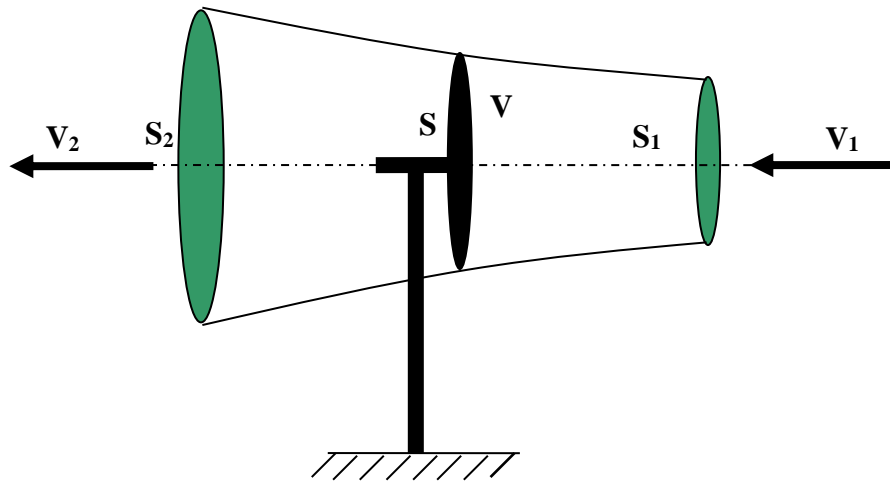


Figure 2-3: Tube de courant autour d'une éolienne

En appliquant la loi fondamentale de la dynamique sur la masse élémentaire dm qui franchit la turbine par une vitesse \vec{v} :

$$P = -\vec{F} \cdot \vec{v} = -dm \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \vec{v} = -dm \cdot \frac{(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{dt} \cdot \vec{v} = \frac{dm}{dt} \cdot (\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \cdot \vec{v} = \frac{dm}{dt} \cdot v(v_1 - v_2) \text{----- (2.5)}$$

Sachant que le débit massique : $\frac{dm}{dt} = Q_m = \rho \cdot s \cdot v$ ----- (2.6)

Alors, $P = \rho \cdot s \cdot v^2 (v_1 - v_2)$ ----- (2.7)

La masse d'air élémentaire dm traversant l'éolienne pendant le temps dt est

$$dm = \rho \cdot s \cdot v \cdot dt \text{----- (2.8)}$$

La diminution d'énergie cinétique de cette masse dm lorsque la vitesse passe de la vitesse v_1 à la vitesse v_2 est :

$$dE_c = \frac{1}{2} \cdot dm \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot dm \cdot v_2^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot s \cdot v \cdot dt (v_1^2 - v_2^2) \text{----- (2.9)}$$

La puissance P peut donc s'écrire

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot v (v_1^2 - v_2^2) \text{----- (2.10)}$$

On déduit des relations (2.7) et (2.10) que $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$ ----- (2.11)

On remplace (2.11) dans (2.7) ou (2.10), on obtient :

$$P = \frac{1}{4} \rho \cdot s \cdot (v_1 + v_2)^2 (v_1 - v_2) \quad \text{-----}(2.12)$$

On pose $x = \frac{v_2}{v_1}$

De l'équation (2.10) :

$$P = \frac{1}{4} \rho \cdot s \cdot (v_1 + v_2)^2 (v_1 - v_2) = \frac{1}{4} \rho \cdot s \cdot v_1^2 \left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right)^2 \cdot v_1 \left(1 - \frac{v_2}{v_1}\right) = \frac{1}{4} \rho \cdot s \cdot v_1^3 (1+x)^2 (1-x)$$

$$\text{Donc : } P(x) = \frac{1}{4} \rho \cdot s \cdot v_1^3 (1+x)^2 (1-x)$$

$$P'(x) = \frac{1}{4} \rho \cdot s \cdot v_1^3 (1+x)(-3x+1)$$

$P(x)$ prend sa valeur maximale si $P'(x) = 0$, donc ; $x=-1$ (rejetée) ou $x=1/3$

$P(x)$ est maximal pour $x = \frac{1}{3}$ c'est-à-dire pour $v_2 = \frac{1}{3} v_1$

$$\text{On a alors } P_{E-\max} = P\left(\frac{1}{3}\right) = \frac{1}{4} \rho \cdot s \cdot v_1^2 \left(1 + \frac{1}{3}\right)^2 \cdot v_1 \left(1 - \frac{1}{3}\right) = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot v_1^3 \cdot \frac{16}{27}$$

$$P_{E-\max} = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot v_1^3 \cdot \frac{16}{27} \quad \text{-----} (2.13)$$

La puissance contenue dans la veine de vent est donnée par

$$P_{\text{veine}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \text{ si } V_2=0 \quad \text{-----}(2.14)$$

$$\text{Le quotient entre } P_{E-\max} \text{ et } P_{\text{veine}} \quad \frac{P_{E-\max}}{P_{\text{veine}}} = \frac{16}{27} = 0.593$$

La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de **Betz**, est de $\frac{16}{27}$ soit 0.593.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de **BETZ** ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique:

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p \max} \quad \text{-----}(2.15)$$

$C_{p \max}$ étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} .

3.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle.

En combinant les équations (2.6), (2.7), et (2.8), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad \text{----- (2.16)}$$

Avec:
$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_1}$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda v} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v^2 \quad \text{----- (2.17)}$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

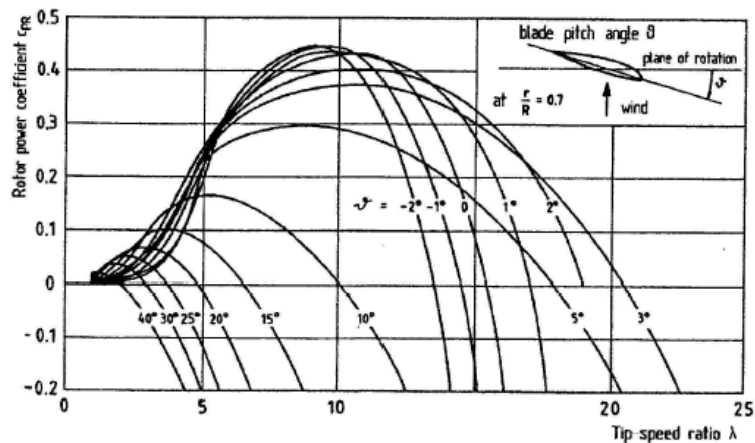
$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V^2} \quad \text{----- (2.18)}$$

T_t : couple de la turbine éolienne.

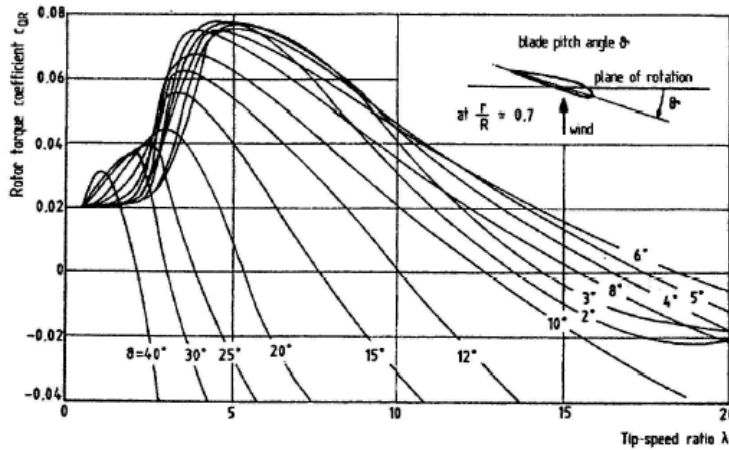
3.6 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes

Les courbes essentielles caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les coefficients de puissance C_p et de couple C_m en fonction de la vitesse spécifique λ .

En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. L'allure des coefficients C_p et C_m change donc pour chaque angle de calage β comme représenté à la figure 2.4 .



$$(a) C_p = f(\lambda, \beta)$$



$$(b) C_m = f(\lambda, \beta)$$

Figure 2-4 : Allures des coefficients C_p et C_m en fonction de la vitesse spécifique λ et l'angle de calage

3.7 Production d'énergie mécanique

En tenant compte du rapport du multiplicateur G , et à partir des équations (2.3) et (2.16), l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} \times C_p \left(\frac{\Omega_t R}{G V_1} \right) \times \rho \times S \times V^3 \quad \text{-----} \quad (2.19)$$

Cette expression permet d'établir un réseau de courbes donnant cette puissance en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent (figure 2-5).

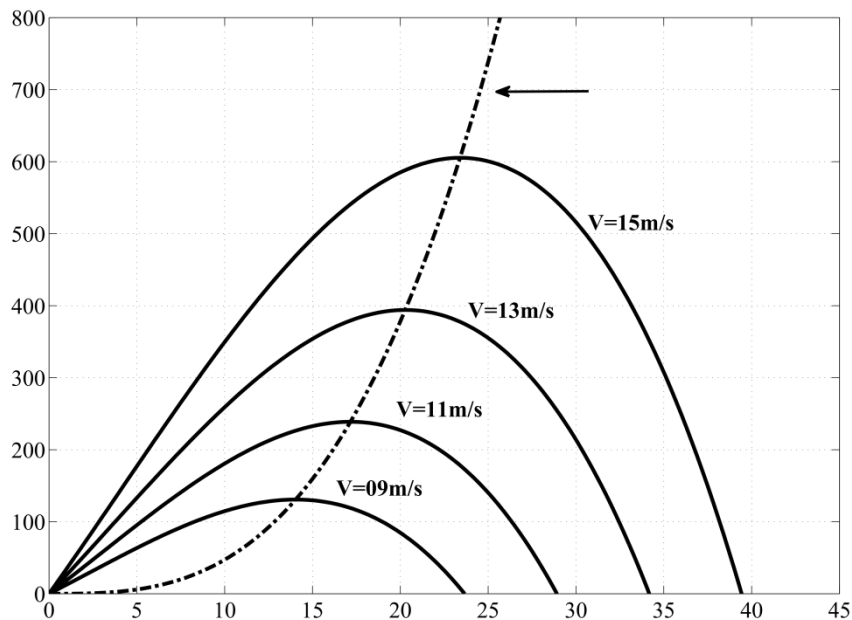


Figure 2-5 : puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent (Turbine réelle de type Savanius)

Au regard de la courbe pointée qui joint les points de puissances maximales, il apparaît que pour pouvoir optimiser le transfert de puissance pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner à vitesses variables.