

# III. Énergie éolienne

## III.1 Principe d'énergie éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple: le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.

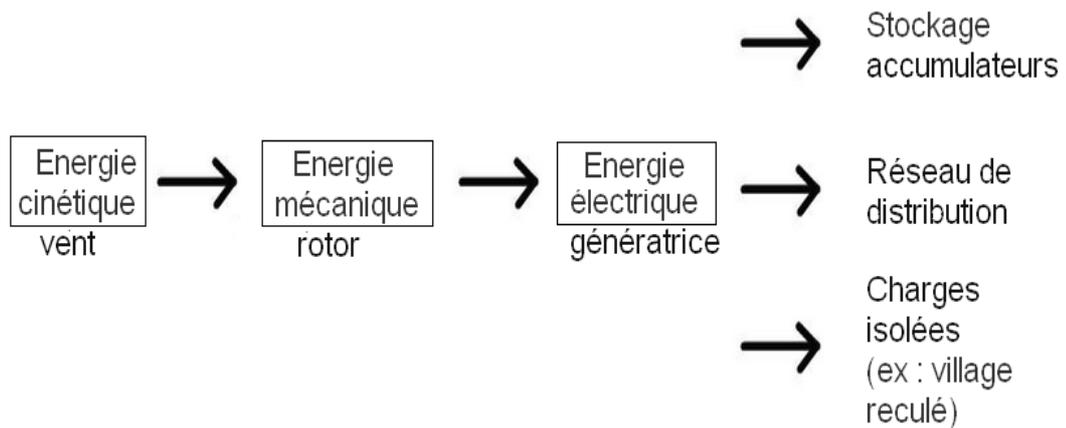


Figure III-1: Transformation de l'énergie.

Il existe différents profils d'éolienne. On distingue deux grands types d'éolienne : les *éoliennes à axe vertical* et les *éoliennes à axe horizontal*. Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice.

### III.1.1 Éolienne à axe vertical

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De

plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.



Schéma du rotor de Darrieus

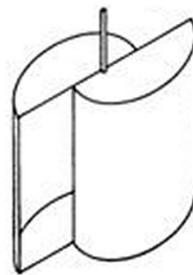


Schéma du rotor de Savonius

Figure III-2: *Eoliennes à axe vertical.*

### III.1.2 Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à plusieurs pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.



Figure III-3: *Eoliennes à axe horizontal.*

### III.2 Composants classiques d'une éolienne

L'éolienne est composée de 3 parties principales : le mat, la nacelle et le rotor.

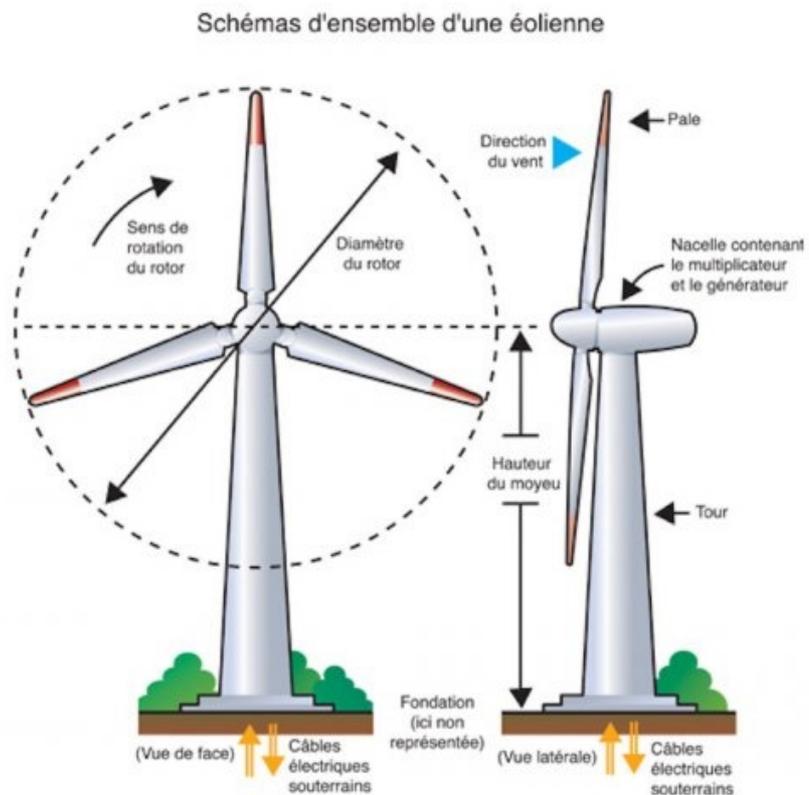


Figure III-4: *Composants d'une éolienne.*

ü **Le mat** : Appelé aussi Tour, Le mât est généralement un tube en acier ou une tour en treillis. Il supporte le rotor et la nacelle. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition au vent souhaité. En effet, plus la hauteur du mât augmente plus la vitesse du vent et le coût de la structure augmente. Généralement on choisit un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre des pales. La hauteur d'une éolienne varie entre 40 et 80 mètres. Le mât renferme les câbles qui assurent la liaison au réseau de distribution.

ü **Le rotor** : En général trois pâles. Le rotor est entraîné par l'énergie du vent, il est relié à la nacelle par le moyeu.

ü **La nacelle** : montée au sommet du mât, abritant les composants mécaniques, pneumatiques, électriques, électroniques, nécessaires au fonctionnement de la machine :

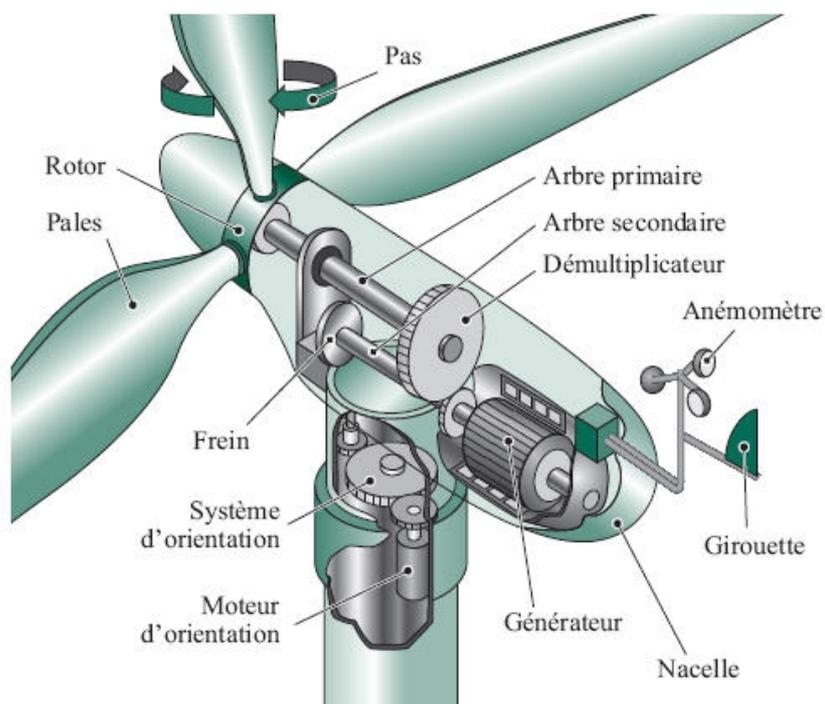


Figure III-5: Composants d'une nacelle.

- **L'arbre primaire** : c'est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre 20 - 40 tr/min, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur.

- **Le multiplicateur** : Augmente la vitesse de rotation au niveau d'un second rotor associé à l'alternateur grâce à un système d'engrenages (de 30 tours/minute maximum en sortie du premier rotor à 1000-1500 tours/minute) pour la génératrice électrique.
- **L'arbre secondaire** : Dit « arbre rapide », plus mince, relie le multiplicateur à la génératrice, équipé d'un frein à disque (sécurité vent).
- **Le frein** : Permet d'arrêter l'éolienne ou permet à l'éolienne de fonctionner en cas de vitesses des vents trop importante (maximum de 90 Km/h soit environ 30 tours/minute) qui pourrait l'endommager ou la rendre incontrôlable en réduisant la vitesse de rotation du premier rotor.
- **La génératrice ou l'alternateur**: Transforme l'énergie mécanique de rotation du l'arbre secondaire en énergie électrique.
- **Le Contrôleur électronique** : Contrôler le fonctionnement de l'éolienne, il sert à gérer le démarrage, à régler le pas des pales, le freinage ainsi que l'orientation de la nacelle par rapport au vent.
- **L'Outils de mesure** : sont de deux types : une girouette pour en évaluer la direction et un anémomètre pour en mesurer la vitesse du vent. Les données sont transmises au contrôleur qui effectue les réglages de l'éolienne automatiquement.
- **Le système d'orientation** : est une couronne dentée (crémaillère) équipée d'un moteur. Il permet d'orienter l'éolienne et de la « verrouiller » dans l'axe du vent.
- **Le système de refroidissement** : Des refroidisseurs sont prévus pour le multiplicateur de vitesse qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre, et pour la génératrice. Ils se présentent sous la forme de ventilateurs, de radiateurs d'eau ou d'huile. Le refroidissement à huile est utilisé pour les multiplicateurs.

### III.3 Les différentes technologies

#### III.3.1 Eoliennes à vitesse fixe

Pour les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques.

ü La Machine Asynchrone à cage a un nombre de paires de pôles fixe et fonctionne donc sur une plage de vitesse très limitée : le glissement est de l'ordre de quelques %.

ü La Machine Synchrone fonctionne en vitesse fixe impérativement.

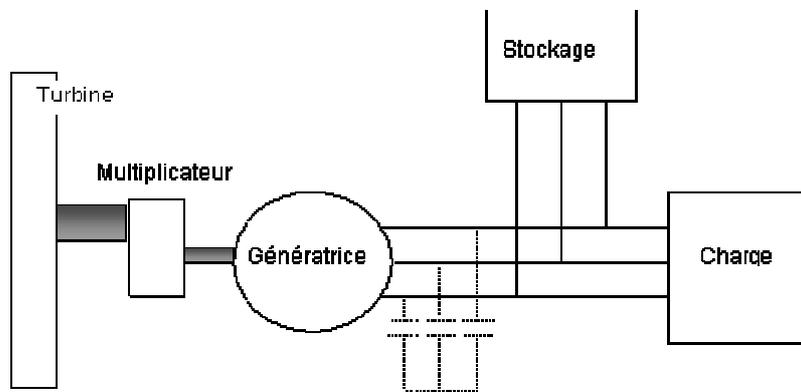


Figure III-6: *Eolienne à vitesse fixe.*

#### III.3.2 Eoliennes à vitesse variable

Pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent. En vitesse variable, on règle le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le **Maximum Power Point Tracking**. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne  $P ( V_{vent} )$ .

a. Pour les générateurs asynchrones :

L'existence d'un glissement permet une légère variation de la vitesse de rotation du générateur. Plusieurs configurations sont possibles :

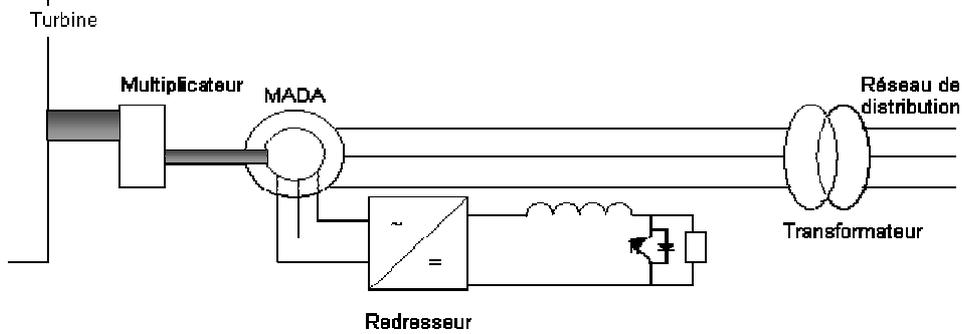


Figure III-7: Le rotor de la MAS avec rhéostat rotorique

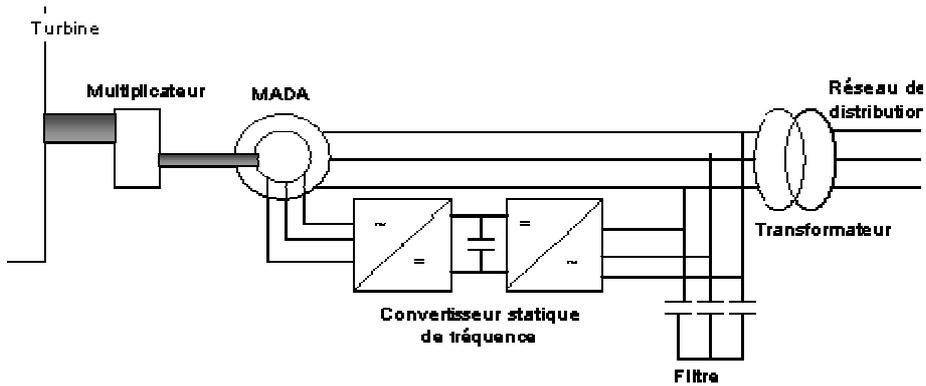


Figure III-8: La MADA associée à un double convertisseur MLI

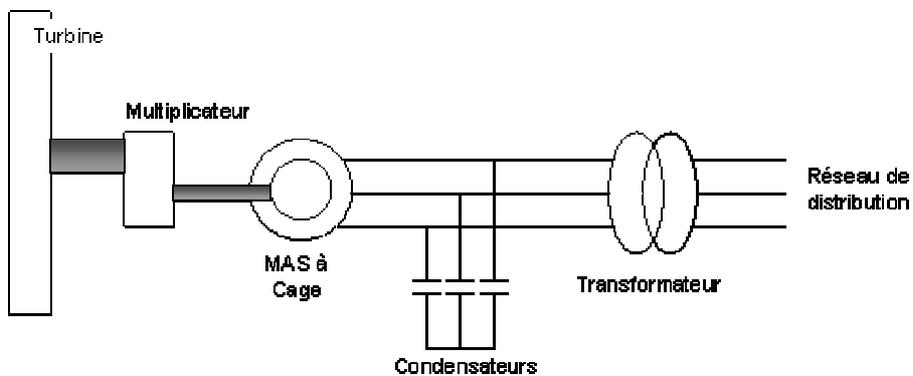


Figure III-9: La MAS à cage

## b. Pour les génératrices synchrones

Dans le cas d'une machine synchrone, l'amplitude et la fréquence sont fonctions de la vitesse, le raccord au réseau nécessite un convertisseur statique de fréquence avec un redresseur et un onduleur.

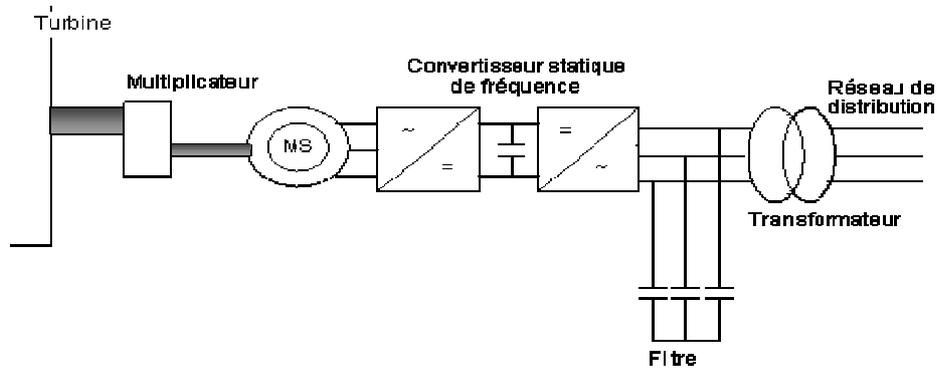


Figure III-10: Génératrice synchrone.

## III.4 Etude appliquée d'une éolienne

### III.4.1 Connaissance de l'aéromoteur

Ü *L'énergie du vent*  $E_{vent}$  : est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface  $S$

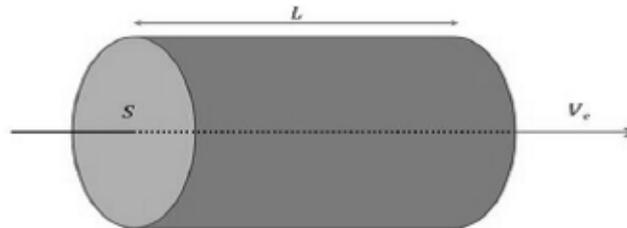


Figure III-11: L'énergie cinétique qui traverse une certaine surface  $S$ .

$$E_{vent} \text{ (en joules)} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot L \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot t \quad \text{Eq (III-1)}$$

$m$  : masse du volume d'air (en Kg)

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

$\rho$  : masse volumique de l'air, (=1,225 Kg/m<sup>3</sup> dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer)

$S$  : la surface d'air balayée par les pales (en m<sup>2</sup>)

ù **la puissance du vent**  $P_{vent}$  : associée est donc

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{Eq (III-2)}$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance  $C_p$  (ou coefficient de performance) dans le calcul de la puissance mécanique à la sortie de la turbine est:

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{Eq (III-3)}$$

ù **Le coefficient  $C_p$**  : caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme le rapport suivant

$$C_p = \frac{\text{Puissance mécanique à la sortie de la turbine (Puissance disponible sur l'arbre)}}{\text{Puissance disponible du vent}} \quad \text{Eq (III-4)}$$

Le vent présente donc une certaine énergie pendant une période donnée. Cette énergie est convertie par l'éolienne en énergie mécanique et très certainement en énergie électrique. Cette transformation peut être décomposée en plusieurs étapes :

- L'énergie cinétique du vent est convertie en travail moteur à l'axe du rotor. Cette conversion est réalisée avec un certain rendement, le coefficient de puissance.
- Le travail moteur au rotor est transmis vers l'axe de la génératrice avec un certain rendement, le rendement d'accouplement mécanique (ou le rendement de multiplicateur).
- La génératrice transforme le travail moteur à son axe en énergie électrique avec un certain rendement électrique.

Le rendement global est le produit des rendements de ces trois étapes. Il est difficile d'évaluer de manière simple ces trois rendements et donc d'estimer le rendement global. Le plus simple est de mesurer ce qui rentre et ce qui sort de l'éolienne pour avoir une idée de rendement global.

$$P_{elec} = C_p \cdot \eta_{mul} \cdot \eta_{gén} \cdot P_{vent} = \eta_{mul} \cdot \eta_{gén} \cdot P_{turbine} \quad \text{Eq (III-5)}$$

### III.4.2 Puissance d'une turbine

ü *La courbe de puissance d'une éolienne* : est un graphe qui représente la puissance de sortie d'une éolienne à différentes vitesses de vent.

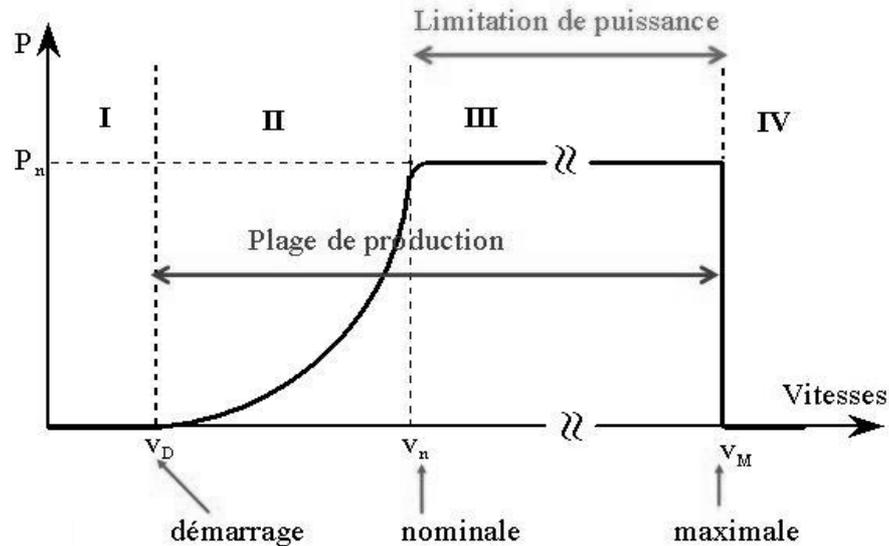


Figure III-12: Courbe de puissance d'une éolienne.

On peut distinguer 4 parties sur cette courbe :

- (I) de 0 à la vitesse de démarrage : la puissance de sortie est nulle, le vent n'est pas suffisamment important pour entraîner la rotation du rotor
- (II) de la vitesse de démarrage à la vitesse nominale : la puissance de sortie augmente jusqu'à atteindre la puissance nominale ( $P_n$ )
- (III) de la vitesse nominale à la vitesse de coupure : la puissance de sortie est maintenue à la puissance nominale presque constante grâce au dispositif de régulation
- (IV) après la vitesse de coupure : l'éolienne est mise à l'arrêt pour protection, la puissance de sortie est nulle

### ü *Le coefficient de puissance*

Le coefficient de puissance ou coefficient de performance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Ce coefficient diffère suivant les turbines. On commence par prendre la courbe de puissance et on la divise par la surface balayée par le rotor afin d'obtenir la puissance de sortie par mètre carré de surface balayée. On divise ensuite ce résultat par la puissance du vent par mètre carré pour chaque vitesse de vent.

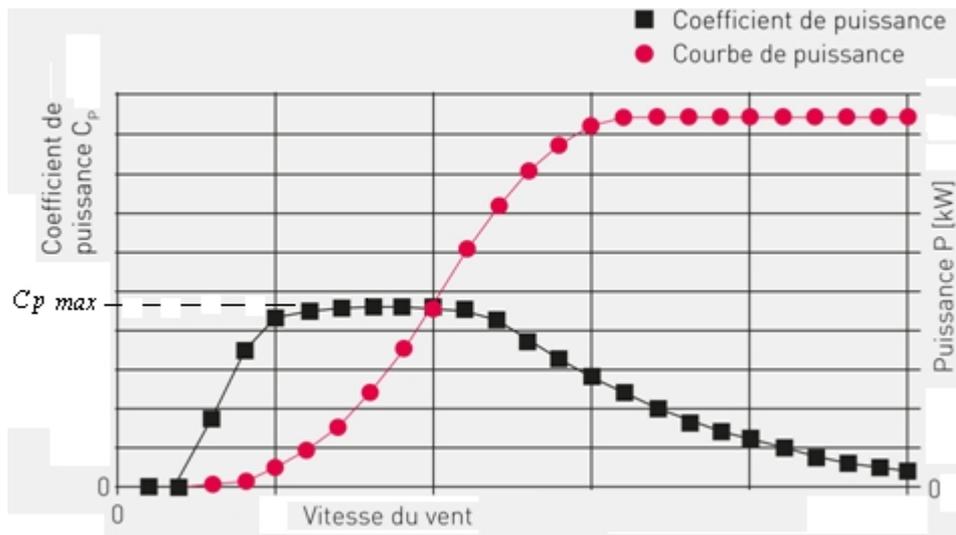


Figure III-13: *Courbe de coefficient de puissance.*