

## Introduction

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans un site isolé est assez bien venté. De tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité.

Il existe deux types d'éoliennes modernes : le système à axe horizontal et à axe vertical. Les plus courants sont celles à axe horizontal [1].

### II-1 Contexte historique :

Très tôt, dans l'histoire des techniques [2], le vent a été exploité afin d'en extraire de l'énergie mécanique : pour la propulsion des navires dès l'antiquité (3000 ans Av. JC), pour les moulins (à céréales, olives), le pompage ou, au Moyen Age, pour l'industrie (forges...). La conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique est en effet relativement aisée, il faut « seulement » disposer d'un potentiel satisfaisant et résister aux caprices des vents excessifs. Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [3].

Dans les sites isolés, la rentabilité étant plus facile à obtenir, des petites éoliennes dans la gamme de quelques 100 W à quelques 10 kW sont commercialisées depuis plus longtemps. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques permet aujourd'hui de construire des systèmes hybrides éoliens et photovoltaïques qui profitent de la fréquente complémentarité vent-soleil (réduction des coûts des batteries de stockage nécessaires en site isolé) [2].

Ainsi l'histoire de l'énergie éolienne a pour une grande partie été influencée par des facteurs extérieurs, tels l'apparition de la machine à vapeur, la distribution généralisée d'électricité, la crise énergétique de 1973. Enfin plus récemment, les accords de Kyoto devraient être le moteur principal du développement des éoliennes [4].

## II-2 Différents types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Deux familles de voilures existent : les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT). Le graphique de la Figure II-1 donne une vue sur les coefficients de puissance  $C_p$  habituels en fonction de la vitesse spécifique,  $\lambda$  pour différents types d'éoliennes.

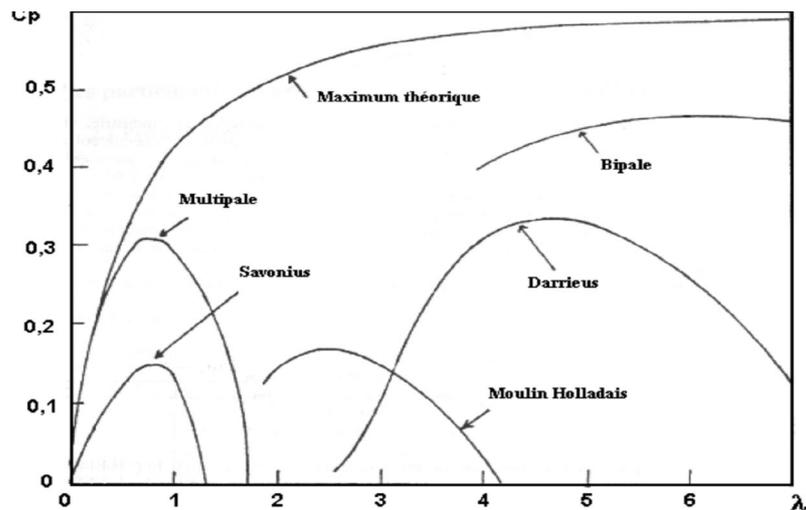


Figure II-1 : Courbe caractéristiques des aérogénérateurs [5]

### II-2 -1 Axe vertical (Vawt)

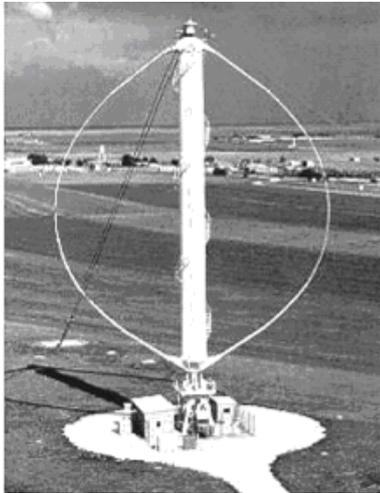
Les éoliennes à axe vertical (Figure II-2, Figure II-3) ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [6].

**Avantages [2]:** machinerie au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, fort couple de démarrage, construction simple (Savonius), tourne à faible vitesse (donc peu bruyante).

**Inconvénients [2]:** guidages mécaniques, notamment le palier bas qui doit supporter le poids de l'ensemble de la turbine.

Il existe principalement trois technologies Vawt (Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius [5,6], comme montré à la Figure II-2 et la Figure II-3.

Toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales.



**Figure II-2 :** Exemples des constructions VAWT [5]



**Figure II-3 :** Exemples des constructions Darrieus (Darrieus de type H) et Savonius [5]

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence [6] dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure II-3) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées.

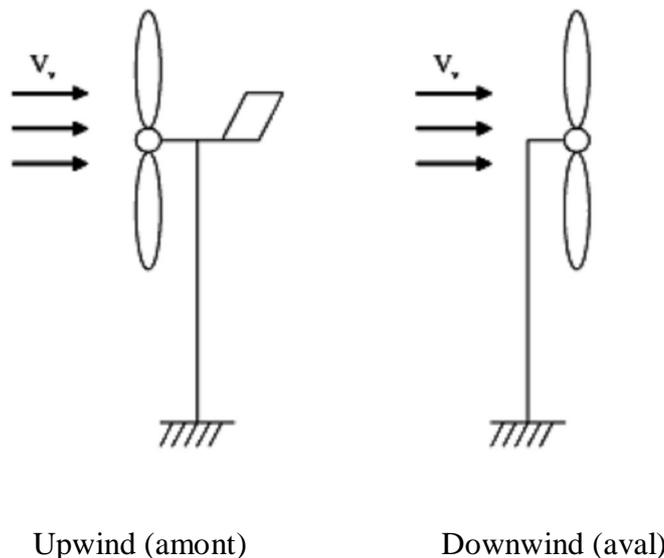
## II-2-2 Axe horizontal (Hawt)

La technologie largement dominante aujourd'hui [7] est à axe horizontal à turbine tripale, parfois bipale et à rotor face au vent.

Les avantages de tels dispositifs sont une réduction du diamètre de la turbine ainsi que du bruit acoustique. Des grandes puissances sont envisagées, de l'ordre de 600 kW à plusieurs MW (notamment avec le constructeur Vortec mais également avec société française CITA), mais n'ont pas encore vu le jour.

La turbine peut se trouver à l'avant de la nacelle ou à l'arrière : au vent (amont ou upwind) ou sous le vent (aval ou downwind) (Figure II-4). L'avantage des dispositifs sous le vent est qu'ils se positionnent automatiquement face au vent ce qui permet, notamment pour les fortes puissances d'éviter le système mécanique d'orientation, complexe, lourd et coûteux. L'inconvénient majeur réside dans une fatigue accrue due aux fréquentes oscillations liées aux changements de direction du vent. Le procédé « sous le vent » reste peu utilisé comparativement à celui « au vent »

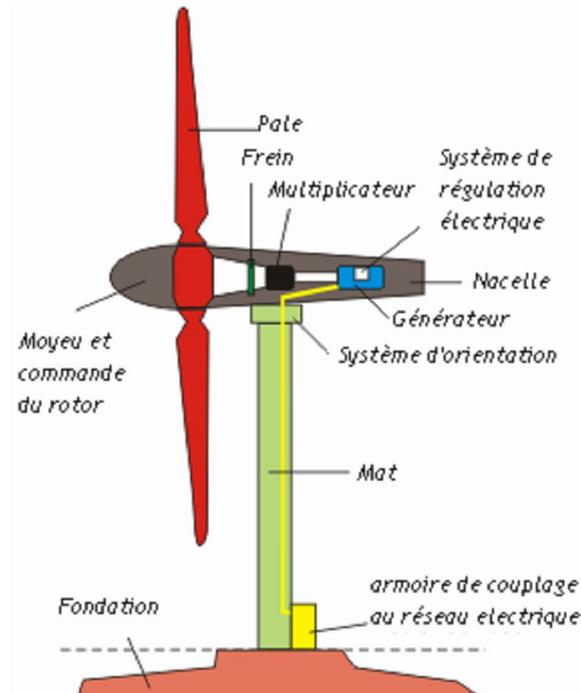
La réduction du nombre de pales permet théoriquement de réduire le coût mais aux dépend de la régularité du couple. Le coefficient  $C_p$  est également sensiblement plus faible, environ 5% entre une tripale et une bipale. Des machines monopales ont même été construites mais il semble qu'aucune ne soit actuellement commercialisée.



**Figure II-4:** Type de montage de la voileure [5]

### II-3 Composantes d'une éolienne

Une installation est généralement constituée d'une éolienne, d'une tour avec de solides fondations et d'un ensemble d'équipements électriques pour le stockage de l'énergie produite ou pour gérer la connexion avec le réseau électrique local. La figure (II-5) présente les composantes d'une éolienne.



**Figure II-5:** Composante d'une éolienne de forte puissance [8]

L'éolienne est pour sa part, composée d'un rotor bi ou tri pale, bien souvent à axe horizontal, d'une génératrice à courant continu ou d'un alternateur et d'une nacelle qui permet de fixer et supporter le rotor et la génératrice.

### II-3-1 La nacelle [6]

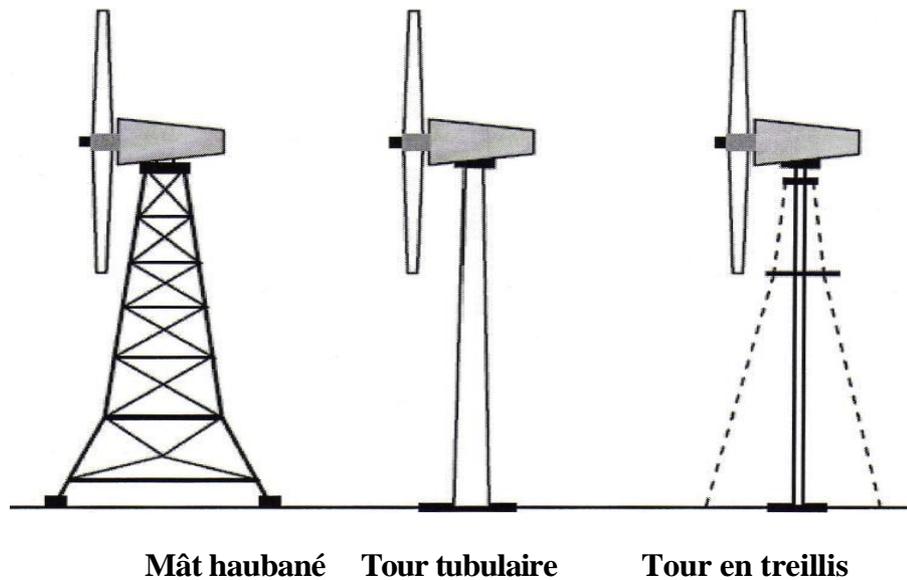
Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres primaire et secondaire, multiplicateur, Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter, le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

### II-3-2 La tour

Son rôle est d'une part de supporter ensemble rotor et nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation (Figure II-6).

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer:

- **Tour mât haubané** : de construction simple et moins coûteuse mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.
- **Tour en treillis** : sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisés. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain
- **Tour tubulaire** : est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané.



**Figure II-6 : Différents types de tours [9]**

### II-3-3 Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 [6].

### II-3-4 Le multiplicateur

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur. 3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

### II-3-5 La génératrice

C'est un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les plus simples et robustes sont des générateurs à induction. Il existe plusieurs types de génératrices pour stabiliser la vitesse des moteurs: génératrices à basses vitesses de vent, l'autre pour les hautes vitesses génératrice auto-excitée.

Enfin, La nouvelle génératrice discoïde de Jeumont Industrie est une innovation majeure car elle réduit la taille, normalement imposante, de ces alternateurs multipôles. Toutefois, le courant produit doit passer par un onduleur de grande puissance. Il s'agit là aussi d'une technologie de pointe [10].

### II-3-6 Les pales d'éolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

Les pales forment une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien [6].

Cependant, il est bon de savoir que les pales déterminent grandement le rendement de l'éolienne et ces performances. Concevoir une pale revient à déterminer :

🌀 La longueur de la pale : Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

Pour les roues à marche lente, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent.

Pour les roues à marche rapide, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30m.

🌀 La largeur de la pale: La largeur des pales intervient pour le couple de démarrages qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

La valeur du couple augmente si la largeur de pale augmente [11].

🌀 Le profil aérodynamique de la pale [6] : il est choisi en fonction de ses propriétés aérodynamiques telles que la portance et la traînée mais aussi selon le couple désiré et la vitesse spécifique de la pale. Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance, elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice.

Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

🌀 Le calage initial et le gauchissement de la pale [11] : ils seront déterminés afin d'avoir tout au long de la pale un angle d'attaque optimum pour le régime de rotation du rotor correspondant à la vitesse du vent nominale. C'est à dire la vitesse de vent pour laquelle l'éolienne à le meilleur rendement.

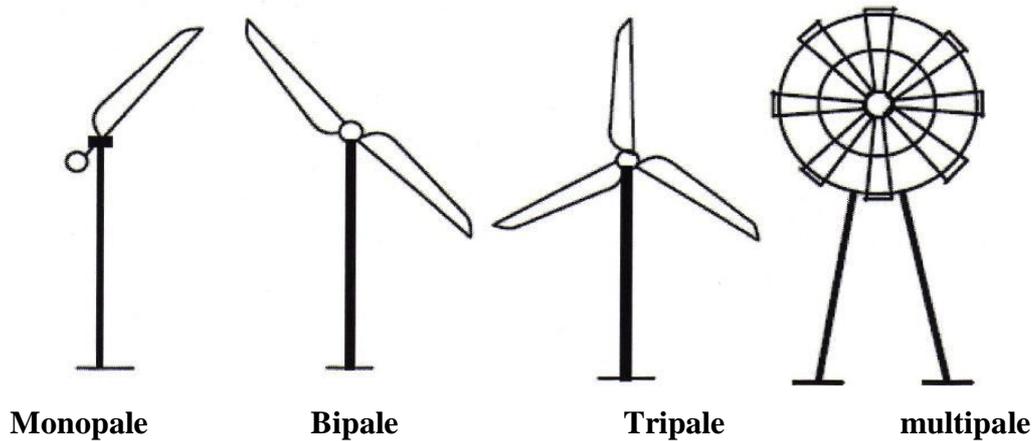
🌀 Les matériaux de fabrication de la pale : le choix des matériaux est une étape importante. En effet, le matériau détermine le procédé de fabrication, le coût, la durée de vie et la fiabilité des pales qui subissent beaucoup de contraintes en fatigue. Le matériau idéal doit être léger, résistant, homogène pour avoir des pales de même masse, facile à mettre en oeuvre pour diminuer le coût, résistant à l'érosion et à la corrosion. Certains types de bois, certains métaux, mais aujourd'hui surtout des matériaux composites répondent aux critères requis.

🌀 Nombre de pales [12]: Le nombre de pales  $B$ , que l'éolienne possèdera influence aussi le design de la pale.

Le nombre de pale est déterminé en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ , et du couple à fournir. Lorsque la vitesse spécifique est fixée, une valeur pour le nombre de pale est recommandée. Ainsi pour  $4 < \lambda < 10$  le nombre de pale recommandé se situe entre 1 et 3 inclusivement (Figure : II-7).

Les éoliennes à marche lente [6] ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde.



**Figure II-7:** classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale [9]

### II-3-6-1 Description de l'aérodynamique d'une pale [11]

Les principaux termes utilisés dans le domaine de l'aérodynamique des pales d'éoliennes sont expliqués sommairement dans cette section.

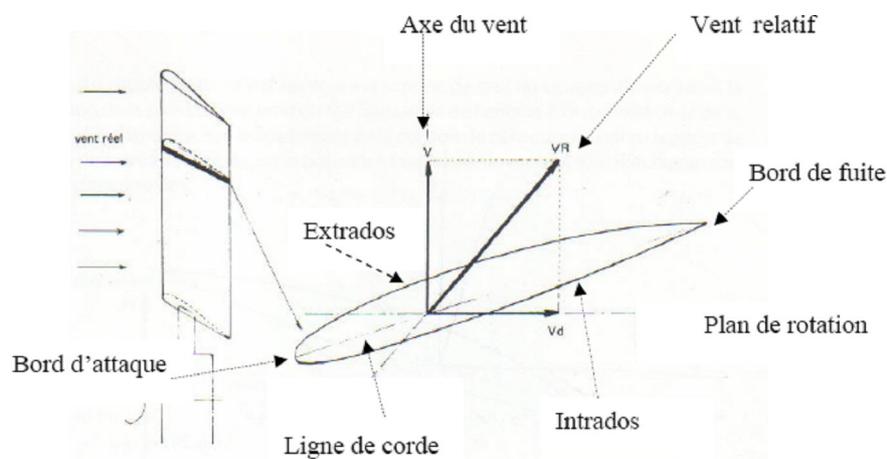
- ☞ Vitesse de démarrage : Vitesse de vent pour laquelle le rotor commence à tourner
- ☞ Vitesse Nominale : Vitesse de vent à laquelle l'éolienne fournit sa puissance nominale
- ☞ Vitesse d'arrêt : Vitesse de vent à laquelle l'éolienne est arrêtée pour cause de vent trop fort
- ☞ Emplanture : Extrémité de la pale en contact avec le rotor
- ☞ Extrados : Surface supérieure de la pale
- ☞ Intrados : Surface inférieure de la pale
- ☞ Bord d'attaque : Partie avant du profil
- ☞ Bord de fuite : Partie arrière et amincie du profil
- ☞ Corde du profil : Droite reliant le bord d'attaque au bord de fuite
- ☞ Angle d'incidence : Angle formé par la corde du profil de la pale et le vent relatif
- ☞ Angle d'attaque : Synonyme d'angle d'incidence
- ☞ Angle de calage : Angle formé par le plan de rotation et la corde de la pale
- ☞ Gauchissement géométrique : Angle entre la ligne de corde à l'emplanture et la ligne de corde au bout de la pale
- ☞ Plan de rotation : Plan dans lequel le rotor tourne
- ☞ Vent relatif : Direction du vent tel que la pale le « voit » lors de sa rotation
- ☞ Portance : Force aérodynamique perpendiculaire à la corde du profil de l'aile et orientée vers l'extrados, perpendiculaire à la direction du vent relatif et le coefficient de portance  $C_z$ .

☻ Traînée: Force aérodynamique constituant une résistance au mouvement de la pale, la traînée dans la même direction que le vent relatif et le coefficient de traînée  $C_x$  nommé coefficient de pénétration dans l'air.

☻ Finesse : Rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de traînée

☻ Vitesse spécifique : Rapport entre la vitesse tangentielle due à la rotation de la pale et la vitesse du vent.

La figure II-8 décrit une pale d'éolienne et identifie les différentes zones avec la terminologie appropriée.



**Figure II-8:** Description d'une pale d'éolienne [11]

## A) Dimensionnement

La pale d'une éolienne [3] est en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. De ses performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine.

La conception d'une pale doit faire appel à un compromis délicat entre le rendement aérodynamique, la légèreté, la résistance statique, les conditions de vent (vitesses, taux de turbulence) influent sur la conception (charges extrêmes, tenue en fatigue).

On s'aperçoit donc aisément que la conception d'une pale est en fait un procédé itératif avec de nombreux paramètres et de nombreuses contraintes. Il est indéniable que l'apparition de logiciels de calcul évolués associés à des optimisations facilite grandement la tâche du concepteur.

## B) Construction et matériaux

Les techniques de construction et les matériaux utilisés pour les pales sont relativement proches de l'aéronautique.

On rencontre plusieurs types de matériaux [6] :

**Le bois** : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.

Les techniques de bois [3] entoilé des moulins à vent est quasiment plus retenue de nos jours, ont fait place dans un premier temps à la construction métallique (alliages légers, inox), mis en oeuvre par l'intermédiaire de structures à base de longeron et de nervures, recouverts par un revêtement de faible épaisseur. Outre l'inconvénient d'une masse structurale peu favorable, de telles pales sont sensibles aux sollicitations alternées (fatigue), particulièrement dans le cas d'assemblages par rivets.

**Le lamellé-collé [6]** : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue, mais cette technique n'est guère employée pour les éoliennes de grande taille.

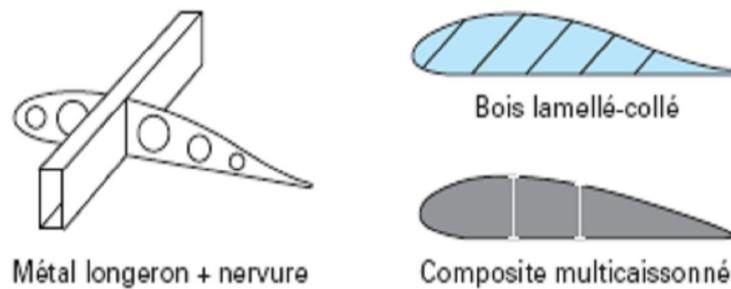
**Les alliages d'aluminium** pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.

**Les matériaux composites** : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

Assez rapidement [3], les matériaux composites à base de fibres de verre imprégnées de résines polyester ou époxyde se sont généralisés.

Depuis quelques années, les fibres de carbone ont également fait leur apparition. Les caractéristiques mécaniques de ces dernières sont bien sûr très intéressantes (rapport rigidité/masse très favorable), mais leur prix élevé comparé à celui de la fibre de verre tend à restreindre leur emploi aux machines à hautes performances.

La figure II-9 présente quelques exemples de structures en fonction des matériaux utilisés.

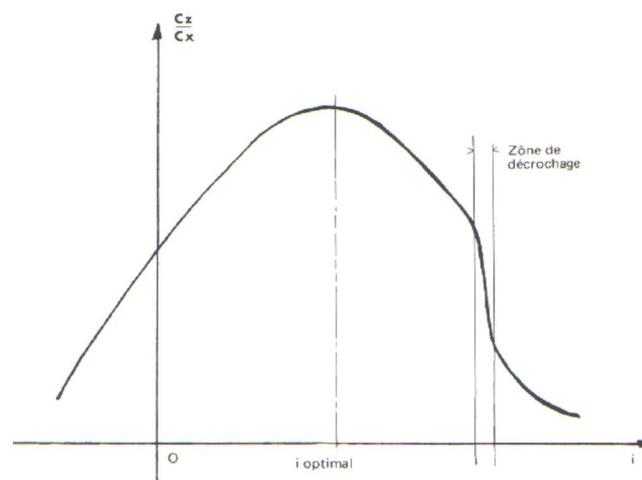


**Figure II-9:** Exemples de structures de pale [3]

Enfin, Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales [6] sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en œuvre ou d'usage simple.

### II-3-6-2 Le décrochage aérodynamique

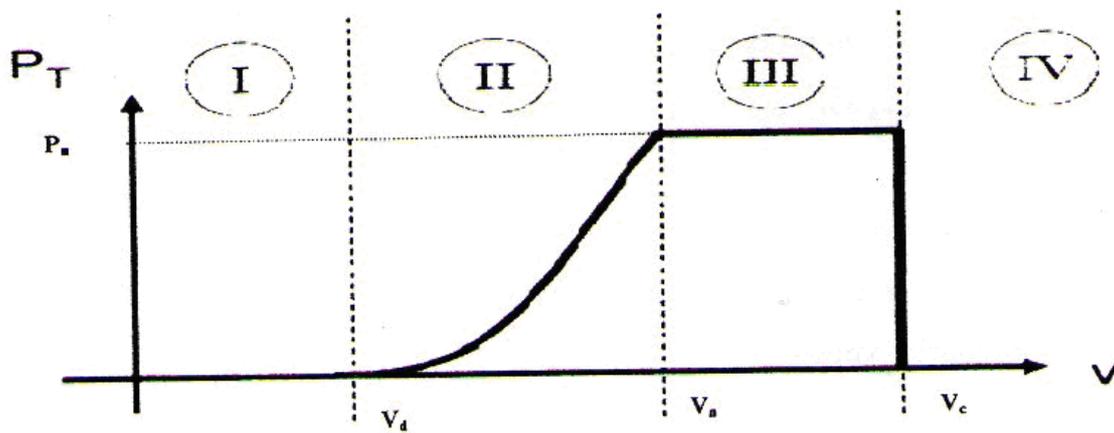
Le décrochage aérodynamique est phénomène de diminution brutale de la portance. Ce phénomène est utilisé pour réguler la puissance que le rotor capte dans le vent et limiter ainsi la puissance électrique produite. La figure II-10 présente la courbe « portance / traînée » ou «  $C_z / C_x$  » en fonction de l'angle d'attaque, «  $i$  ». Nous voyons que, passé un certain angle, la portance diminue puis s'écroule. Le rapport portance / traînée devient faible. On observe alors le décrochage.



**Figure II-10:** Portance en fonction de l'angle d'attaque et décrochage [11]

## II-4 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne [13]

Pour des vitesses de vents supérieures à la vitesse de vent nominale  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mât et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale  $P_n$  pour laquelle l'éolienne a été conçue. Il y a d'autres grandeurs dimensionnantes :  $V_d$  la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et  $V_c$  la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.



**Figure II-11 :** Diagrammes de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones:

- la zone I, où  $P_{\text{turbine}} = 0$  (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent ;
- la zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance  $P_{\text{turbine}}$  fournie reste sensiblement égale à  $P_n$ ;
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

1. Système « pitch » ou « à pas ou calage variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent, principalement pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesses;

2. Système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance maximale n'est pas plate et chute plus vite. Il s'agit donc d'une solution passive et robuste (pas besoin de système d'orientation des pales).

## II-5 Force de poussée sur une pale d'éolienne [4,5]

Une équation permet de calculer la force de poussée,  $F$ , ou la force résistive de l'air sur une pale

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot c_x \cdot v^2 \quad (2.1)$$

Où :

$C_x$  : coefficient de traînée

$A$  : surface projetée perpendiculairement à l'écoulement

$\rho$  : masse volumique de l'air

$v$  : vitesse relative de l'air par rapport à la pale

### II-5-1 Énergie fournie par le vent

Le vent fournit une énergie cinétique. En effet, il s'agit d'une masse d'air qui se déplace. L'énergie cinétique est donnée par l'équation suivante :

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.2)$$

Où :

$m$ : masse du volume de vent ou d'air (kg),

$v$  : vitesse du vent (m/s),

$E_c$  : énergie cinétique (Joule).

### II-5-2 Puissance dans un écoulement [5]

Pour une conduite de section A, traversée par le vent soufflant à la vitesse  $v$  m/s, l'énergie récupérable chaque seconde, donc la puissance, peut s'écrire à l'aide de l'équation de l'énergie cinétique, la masse  $m$  est alors remplacée par le débit massique (kg/s) pour passer de l'énergie à la puissance

- Pour un fluide incompressible, la masse  $m$  s'écrit :

$$m = \rho \cdot l \cdot A \quad (2.3)$$

Où

$\rho$  = la masse volumique de l'air

A= la section du tuyau

l= la longueur de tuyau parcourue chaque seconde par le vent.

L'énergie serait alors :

$$E_C = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (2.4) \qquad E_C = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot l \cdot A \cdot v^2 \quad (2.5)$$

Ou encore

Le débit massique s'écrit :

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad (2.6)$$

$\rho$  = la masse volumique de l'air

A = la section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor

$v$  = vitesse du vent

La puissance P est :

$$P = \frac{1}{2} \underbrace{\rho \cdot v \cdot A}_{\dot{m}} \cdot v^2 \quad (2.7)$$

Ou encore

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (2.8)$$

L'aire, A, balayée par le rotor est proportionnelle au carré du diamètre D du rotor

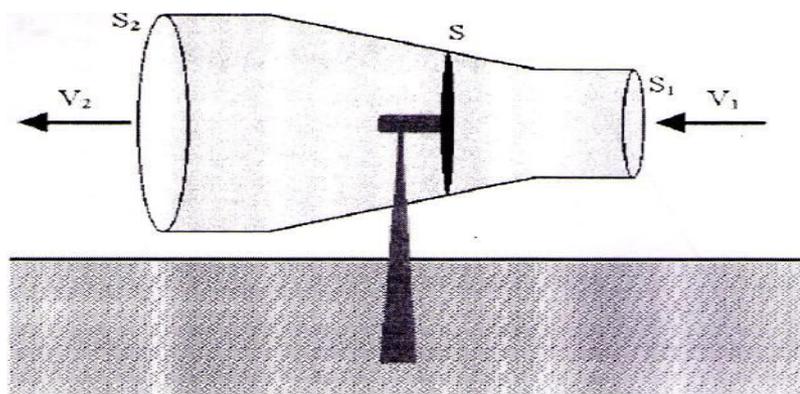
$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.9)$$

L'expression de la puissance en fonction du diamètre sera :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V^3 \quad (2.10)$$

Si le système éolien à axe horizontal représenté sur la (figure II-12) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval [6]:

$$P = \rho \cdot \frac{S}{4} \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (2.11)$$



**Figure II-12 :** Tube de courant autour d'une éolienne [6].

Nous voyons donc que la puissance dans le vent est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et au carré de l'aire balayée par le du rotor. Cependant il y a des limites et nous allons les présenter.

### II-5-3 Limite de Betz

La totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc une partie de l'énergie cinétique du vent n'a pas été captée.

Le théorème du physicien Allemand Betz [5] montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à  $16 / 27$ , soit environ 62 % de l'énergie totale du vent.

La notion de coefficient de puissance  $C_p$  peut maintenant être présentée. Le coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent.

La notion de coefficient de puissance  $C_p$  peut maintenant être présentée. Le Coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent

$$C_P = \frac{\text{puissance}_{rotor}}{\text{puissance}_{vent}} \quad (2.12)$$

En tenant compte de la limite de Betz,  $C_{p\max}$  vaut donc  $16 / 27$  soit 0.5926.

$$c_{p\max} = \frac{P_{rotor}}{P_{vent}} = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3} = \frac{16}{27} \quad (2.13)$$

La puissance maximale du rotor vaut donc

$$P_{\max rotor} = \underbrace{\frac{16}{27}}_{c_{p\max}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3}_{P_{vent}} \quad (2.14)$$

En prenant tous les autres rendements d'une éolienne comme celui de la génératrice ou du réducteur, le rendement global d'une machine se situe autour de 50 % de la limite de Betz.

$$P_{reellerotor} = \underbrace{\frac{1}{2}}_{\text{rendement}} \cdot \underbrace{\frac{16}{27}}_{c_{p \max}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3}_{P_{vent}} \quad (2.15)$$

Pour conclure, dans bien des cas on a :

$$P_{relle} = 0.29 \times P_{vent} \quad (2.16)$$

## II-6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne [14]

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

### Les avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne n'est plus non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs donc on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- Les parcs éoliens se démontent facilement.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie, C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelles sources d'énergie traditionnelle.

### **Inconvénients**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a des certains inconvénients :

- L'impact visuel. ça reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit: le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci évitent les aérogénérateurs.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastiques, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.

## CONCLUSION

Dans ce deuxième chapitre, On a présenté les éoliennes, Leurs composants, leur classification, les matériaux utilisés pour leur fabrication, leurs avantages ainsi que leurs inconvénients. Nous avons aussi défini les paramètres qui sont utilisés pour leur classification, notamment, le coefficient de puissance en aboutissant sur la définition du potentiel énergétique éolien

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leur performance maximale à environ 15 m/s. Il est en fait inutile de concevoir des éoliennes qui maximalisent leur rendement à des vitesses de vent encore plus élevées, celles-ci étant peu fréquentes [6].

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

- ✓ Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- ✓ Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- ✓ Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

Le choix d'un site favorable pour implanter les machines éoliennes avec un bon rendement est l'étape la plus cruciale.

## Bibliographie / web-graphie

- [1] S. Lazaar, mémoire de Magister « Contribution à l'étude d'une station éolienne pour la production de l'électricité. Application aux sites de Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa » Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen.2009.
- [2] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben ahmed, «Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques », Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002.
- [3] P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640.
- [4] M. Ben medjahed, « Gisement éolien de la région côtière de Béni Saf Et son impact sur l'environnement », mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen. 2008.
- [5] A. Mirecki. Thèse Doctorat (Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance) de l'institut national polytechnique de Toulouse (2005).
- [6] <http://www.windpower.org/fr/core.htrn>.
- [7] World Energy Council. <http://www.worldenergy.org>
- [8] T. Philippe, Th. Claude, projet technologique (étude d'une éolienne) université de Québec. (2007). TCH-090-095
- [9] M. Sathyajith, « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006
- [10] B. Denis, V. Paredes, « l'énergie éolienne », INSA, Lyon
- [11] G. Cuntty, Guide de l'énergie éolienne (Éolienne et aérogénérateurs). Edisud Ed. (2001).
- [12] [http : //www.eoltec.comFr/Main fr.htm](http://www.eoltec.comFr/Main_fr.htm)
- [13] World Energy Outlook 2002. IEA Publications.
- [14] S. El aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'Université de Lille, 2004.