



République Algérienne Démocratique et  
Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieure et de  
la Recherche Scientifique

UNIVERSITE D'EL-OUED

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**LICENCE ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Génie mécanique

Option : Maintenance des équipements industriels

Thème

**Etude et maintenance du rotor de l'éolienne**

Devant le jury composé de :

..... Président  
..... Examineur  
..... Examineur  
A. GUERRAH Encadreur

Présenté par :

- GUERRAH Ali  
- FIGURE Omar  
- KASSMI Amro

2013-2014

## *Dédicace*

*À nos parents,  
À nos familles,  
À nos amis.*

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord, nous remercions ALLAH, notre créateur de nous avoir donné les forces pour accomplir ce travail.*

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire, aussi pour ses conseils et ses orientations.*

*Nous avons également l'honneur de remercier l'Administration du Département de Mécanique d'avoir facilité le processus de sélection du mémoire et de l'encadreur, ainsi que de l'organisation et la bonne coordination.*

*Un grand merci est adressé aux examinateurs d'avoir accepté la lecture et l'évaluation de notre mémoire.*

*Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé à réaliser ce mémoire.*

# Tableau des matières

Index des figures .....	i
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Description et présentation du système

I.1. Les principales sources d'énergies renouvelables.....	2
I.2 Définition de l'énergie éolienne .....	3
I.3 Différents types d'aérogénérateurs.....	6
I.3.1 Axe vertical (Vawt).....	6
I.3.2 Axe horizontal (Hawt).....	7
I. 4 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.....	8
I.4.1 la tour.....	9
I. 4.2 les pales du rotor.....	10
I. 4.3 la nacelle.....	10
I. 4.4 le moyeu .....	11
I. 4.5 l'arbre lent.....	11
I. 4.6 le multiplicateur .....	11
I. 4.7 l'arbre rapide avec son frein mécanique .....	11
I. 4.8 la génératrice .....	11
I. 4.9 le dispositif d'orientation.....	12
I. 4.10 le système contrôle-commande.....	12
I. 4.11 le système hydraulique .....	12
I. 4.12 l'unité de refroidissement .....	12
I. 4.13 l'anémomètre et la girouette.....	13
I. 5 Le principe de fonctionnement d'une éolienne .....	13

## Chapitre II : Aspects mécaniques de l'éolienne

II.1 Introduction.....	15
II.2 Aérodynamique des éoliennes .....	15
II.2.1 Description d'une pale d'éolienne.....	15
II.2.2 Fonctionnement d'une pale d'éolienne.....	16
II.2.3 Portance et traînée d'un profil aérodynamique.....	16
II.2.4 Force de poussée sur une pale d'éolienne .....	17
II.2.5 Énergie fournie par le vent .....	17
II.2.6 Loi de Betz .....	18
II.3 Le multiplicateur .....	20
II.4 Dynamique de la rotation du rotor .....	20

## Chapitre III : Calcul des pales du point de vue de la résistance des matériaux

III.1 Détermination de la fatigue de flexion due aux rafales en marche normale .....	23
III.2 Contrainte due aux forces centrifuges en marche normale.....	25
III.3 Effets Gyroscopiques .....	26
III. 4 Calcul de la fatigue due à la flexion par vent de tempête, éolienne arrêtée face au vent .....	28
III.5. Evaluation des efforts s'exerçant sur l'ensemble de l'installation .....	28

## Chapitre IV : Maintenance du système éolienne

IV.1 Généralités sur la maintenance .....	30
IV.1.1 La fonction maintenance.....	30
IV.1.1.1 Introduction à la fonction maintenance .....	30
IV.1.1.2 Rôle de la maintenance .....	30
IV.1.1.3 Fonctions d'un service maintenance .....	30
IV.1.2. Les options de la maintenance.....	31
IV.1.2.1 La maintenance corrective .....	31
IV.1.2.2 La maintenance préventive .....	31
IV.1.2.3 Les diverses options de la maintenance (selon AFNOR).....	33
IV.1.2.4 Termes et définitions relatifs à la maintenance .....	33
IV.1.2.5 Les opérations de maintenance .....	34
IV.1.3 Autres aspects de la maintenance.....	35
IV.1.3 .1 La fiabilité.....	35
IV.1.3 .2 La maintenabilité .....	36
IV.1.3 .3 La disponibilité .....	36
IV.1.4 La démarche de maintenance .....	37
IV.1.4 .1 Le dossier technique .....	38
IV.1.4 .2 Le dossier machine .....	38
IV.1.4 .3 Déroulement type d'une intervention de maintenance.....	39
IV.2 L'entretien et la durée de vie d'une éolienne .....	40
IV.2.1 L'entretien d'une mini éolienne .....	40
IV.2.2 L'entretien des grandes éoliennes.....	40
IV.3 La maintenance des éoliennes .....	41
IV.4 Les sociétés compétentes pour l'entretien des éoliennes .....	41
Conclusion générale .....	42
Références bibliographiques .....	43

## Index des figures

---

<b>Figure I.1</b>	Energie est renouvelable.....	02
<b>Figure I.2</b>	Schématisme d'une rampe pivotante.....	03
<b>Figure I.3</b>	Courbe caractéristiques des aérogénérateurs.....	06
<b>Figure I.4</b>	Exemples des constructions VAWT .....	07
<b>Figure I.5</b>	Exemples des constructions (Darrieus de type H) et Savonius .....	07
<b>Figure I.6</b>	Type de montage de la voilure .....	08
<b>Figure I.7</b>	présente les composantes d'une éolienne.....	09
<b>Figure I.8</b>	Différents types de tours .....	10
<b>Figure II.1</b>	Description d'une pale d'éolienne Source.....	15
<b>Figure II.2</b>	Forces appliquées sur la pale Source.....	17
<b>Figure II.3</b>	Eolienne simplifiée.....	18
<b>Figure II.4</b>	Coefficient de puissance $C_p$ .....	19
<b>Figure II.5</b>	Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	20
<b>Figure II.6</b>	Schéma de la turbine éolienne.....	20
<b>Figure II.7</b>	Mouvement de rotation du rotor.....	22
<b>Figure III.1</b>	Présentation des vitesses du vent sur une section de pale.....	23
<b>Figure III.2</b>	Présentation de la composante $F_n \perp$ à la corde.....	24
<b>Figure III.3</b>	(a à) Axe neutre longitudinal.....	25
<b>Figure III.4</b>	Présentation des vecteurs vitesses de rotation et d'orientation.....	26
<b>Figure IV.1</b>	Liaisons entre les options de la maintenance.....	32
<b>Figure IV.2</b>	Les options de la maintenance.....	33
<b>Figure IV.3</b>	Quantification de la disponibilité.....	37
<b>Figure IV.4</b>	Déroulement type d'une intervention de maintenance.....	39

---

### Introduction générale

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable. Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre. Chaque MWh d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne de CO<sub>2</sub> rejeté chaque année par la production d'électricité d'origine thermique. Une éolienne est construite principalement de métal et de matière plastique, elle ne produit pas de déchets toxiques. Donc sa pollution est quasiment nulle.

Notre étude s'intéresse à une partie du système de l'éolienne qui est le rotor. Notre contribution à travers ce travail consiste à étudier la partie de rotor de l'éolienne, afin de mieux comprendre la façon dont fonctionne cette partie de l'appareil, ses éléments constitutifs, son comportement mécanique et, enfin, la maintenance et les solutions aux problèmes qui se posent à ce propos.

Le présent mémoire est composé de quatre chapitres. Le premier chapitre nous présentons les descriptions d'énergie éolienne a pour des objectifs de Les principales sources d'énergies renouvelables et les avantages. Les inconvénients de l'énergie éolienne et représentons les différents types d'aérogénérateurs et les principaux composants d'une éolienne.

Dans le deuxième chapitre nous exposons les aspects mécaniques de l'éolienne, pour définir l'aérodynamique des éoliennes, Le multiplicateur et dynamique de la rotation du rotor.

Le troisième chapitre nous définissons, la détermination de la fatigue de flexion due aux rafales et contrainte due aux forces centrifuges en marche normale. Nous présentons les effets gyroscopiques pour calcul de la fatigue due à la flexion par vent de tempête éolienne arrêtée face au vent et représenter l'évaluation des efforts s'exerçant sur l'ensemble de l'installation.

Le quatrième chapitre est présenté la fonction de la maintenance, les aspects de la maintenance. Ensuite, nous avons présenté l'entretien des grandes éoliennes, la maintenance des éoliennes et les sociétés compétentes pour l'entretien des éoliennes.

### I.1. Les principales sources d'énergies renouvelables

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau, de la terre et généralement de la biomasse humide ou sèche, à l'échelle de la durée de vie de l'humanité.

Ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires:



*Figure I.1 : Energie renouvelable.*

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateaux à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIX<sup>ème</sup> siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses. Depuis lors, la pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire.

Les chocs pétroliers successifs depuis les années 70 ont démontré les risques économiques et géopolitiques de la production d'énergie reposant sur l'exploitation des ressources fossiles dont les réserves sont mal réparties et épuisables.

De plus, une grande partie du monde ne sera sans doute jamais raccordée aux réseaux électriques dont l'extension s'avère trop coûteuse pour les territoires isolés, peu peuplés ou difficiles d'accès. Même au sein de l'Europe occidentale de tels "sites isolés" ne sont pas

exceptionnels. Actuellement deux milliards et demi d'habitants, principalement dans les zones rurales des pays en développement, ne consomment que 1 % de l'électricité produite dans le monde.

Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs titres :

- Elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- Elles sont inépuisables ;
- Elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;
- Elles offrent une importante indépendance énergétique.

Compte tenu de deux usages importants de l'énergie, chaleur et électricité, on classera les énergies renouvelables en deux groupes.

**Groupes 1:** La production de chaleur par les sources renouvelable : Le bois-énergie, La méthanisation, le biogaz, Le solaire thermique, La géothermie

**Groupe 2:** La production d'électricité par les énergies renouvelables : Les petites centrales hydrauliques, Le solaire photovoltaïque, L'éolien.

### I.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure 1-2).

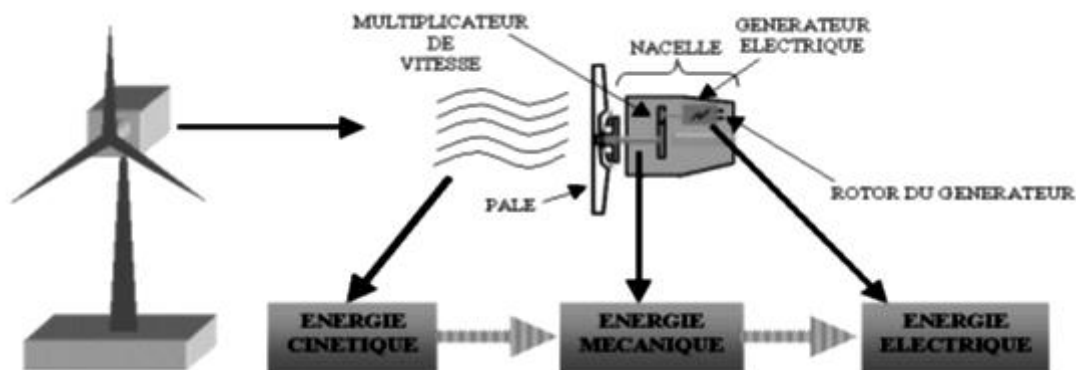


Figure I.2: Conversion électromécanique de l'éolienne.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores. On distingue deux grands types d'éoliennes :

Les éoliennes à axe vertical : ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal .

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. En effet, selon l'ADEME, le niveau sonore d'une éolienne est de 50dB à 150 mètres et devient imperceptible au-delà de 400 mètres. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. 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.

### • **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.

### I.3 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 I- 3 donne une vue sur les coefficients de puissance  $C_p$  habituels en fonction de la vitesse spécifique,  $\lambda$ , pour différents types d'éoliennes

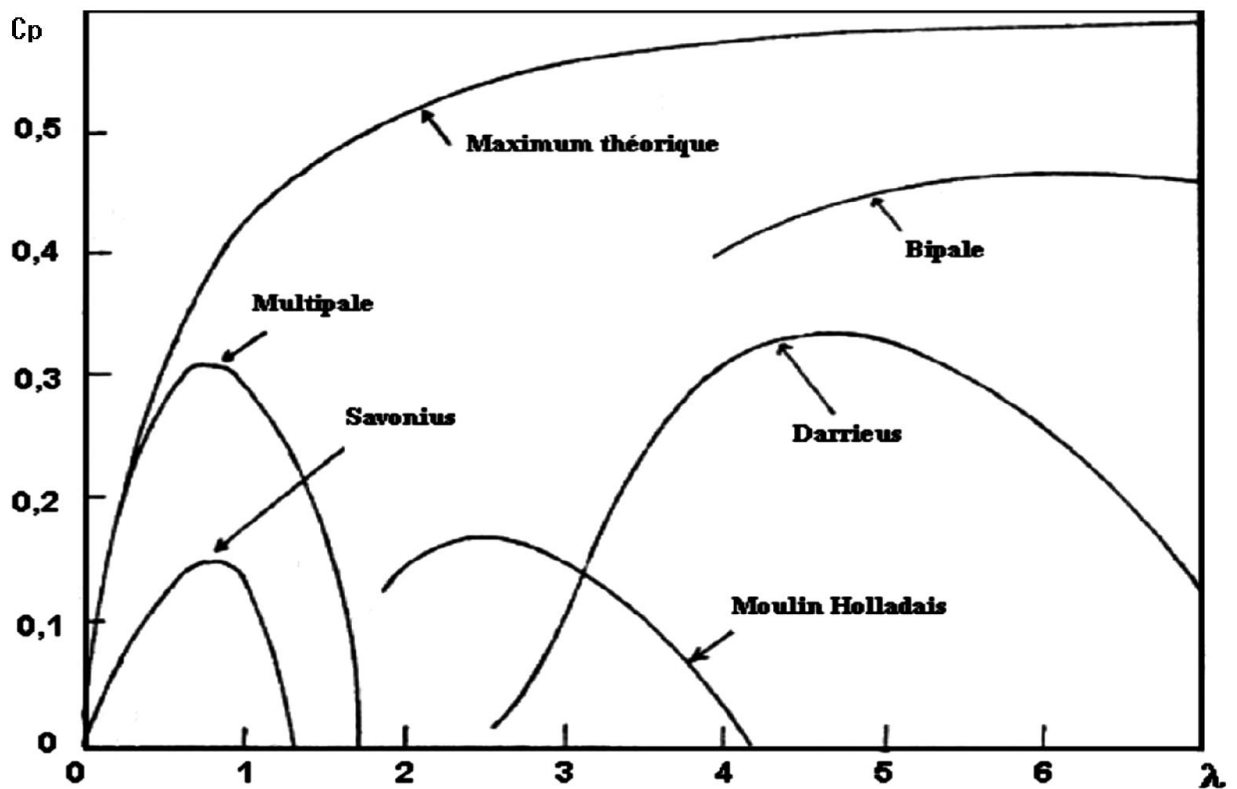


Figure I.3 : Courbe caractéristiques des aérogénérateurs.

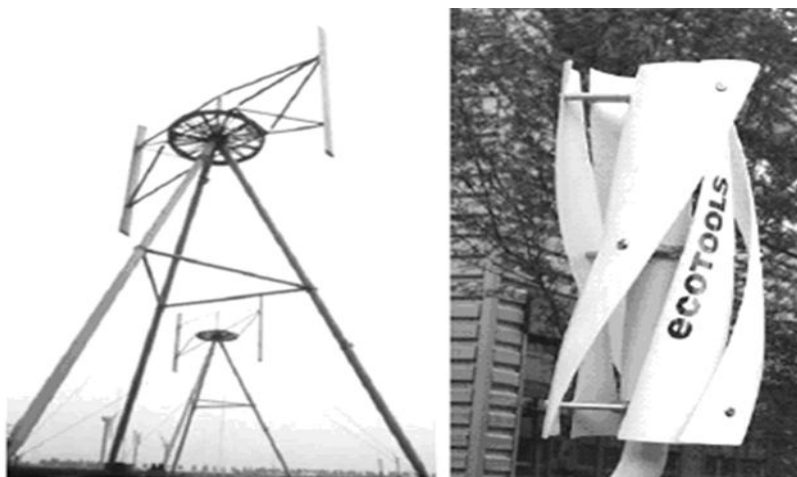
#### I.3.1 Axe vertical (Vawt)

Les éoliennes à axe vertical (Figure I.4, Figure I.5) 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.

**Avantages:** 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).



*Figure II.4 : Exemples des constructions VAWT*



*Figure II.5 : Exemples des constructions Darrieus (Darrieus de type H) et Savonius*

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

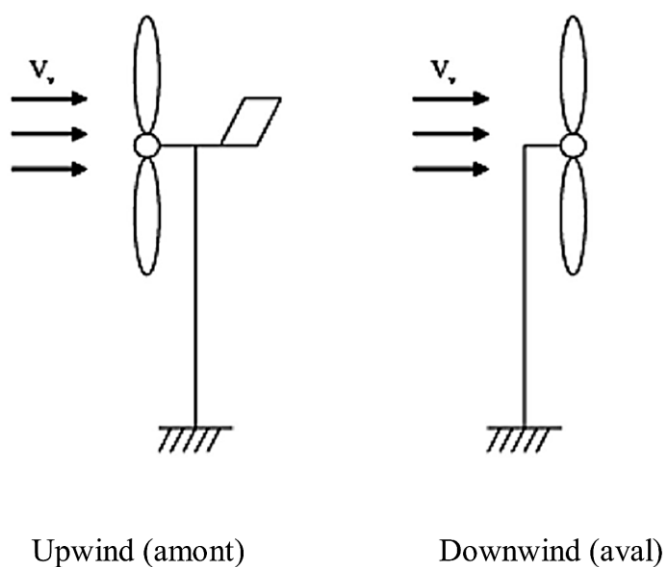
Il existe principalement trois technologies Vawt (Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrieus classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius, comme montré à la Figure I.3 et la Figure I.4 toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales. Les éoliennes à variation cyclique d'incidence 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 I.5) 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.

### **I.3.2 Axe horizontal (Hawt)**

La technologie largement dominante aujourd'hui 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.

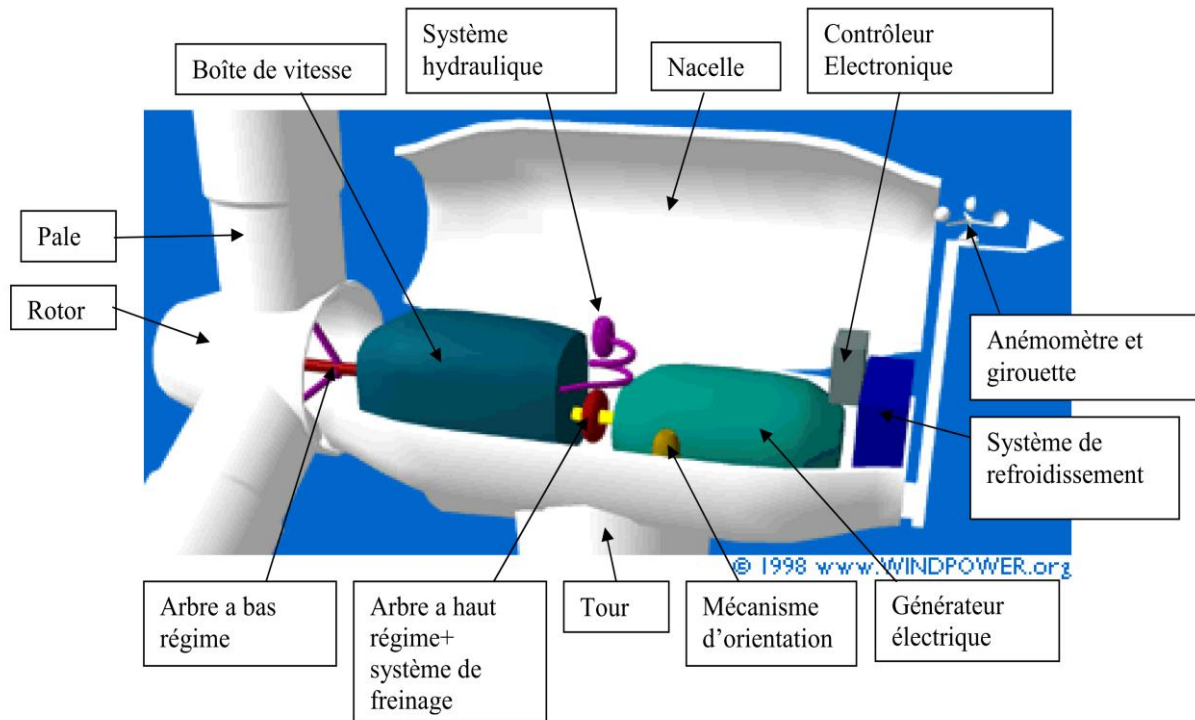
La turbine peut se trouver à l'avant de la nacelle ou à l'arrière : au vent (amont ou upwind) ou sous le vent (aval ou downwind) (Figure I.6). L'avantage des dispositifs sous le vent est qu'ils se positionnent automatiquement face au vent ce qui permet, notamment pour les fortes puissances d'éviter le 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.6: Type de montage de la voile.*

### **I. 4 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal**

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 (I.7) présente les composants d'une éolienne.



*Figure I.7: présente les composantes d'une éolienne.*

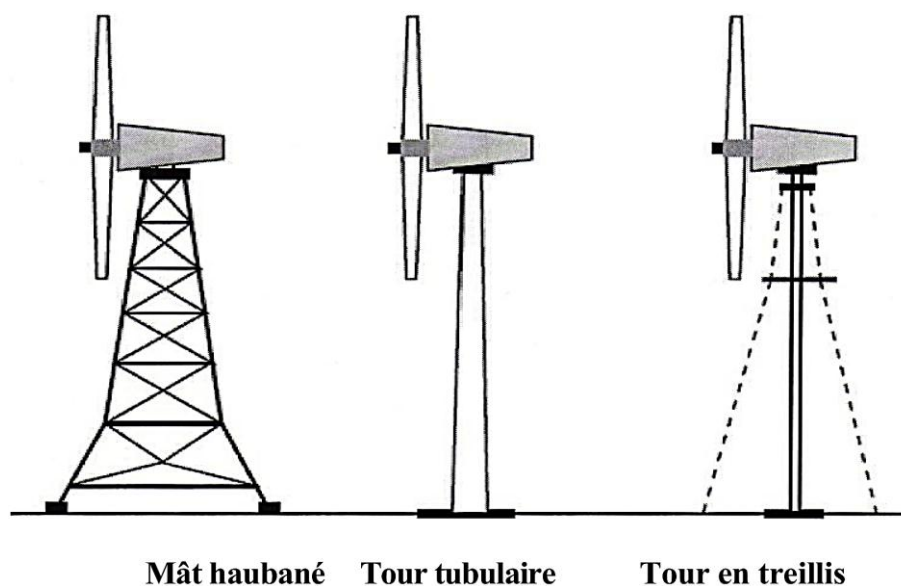
L'éolienne est pour sa part, composée d'un rotor bi ou tri pale, bien souvent à axe horizontal, d'une génératrice à courant continu ou d'un alternateur et d'une nacelle qui permet de fixer et supporter le rotor et la génératrice.

### I.4.1 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.8) 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.8 : Différents types de tours.*

### I. 4.2 les pales du rotor

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.

### I. 4.3 la nacelle

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.

### I. 4.4 le moyeu

Le moyeu est une pièce en acier moulé. Il supporte les pales et relie le rotor à la nacelle. Il fait varier l'angle d'attaque des pales simultanément.

### I. 4.5 l'arbre lent

L'arbre lent de l'éolienne lie le moyeu du rotor au multiplicateur. Le rotor d'une éolienne moderne de 1.000 kW tourne assez lentement, environ 20 tours par minute. L'arbre contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins aérodynamiques.

### I. 4.6 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.

### I. 4.7 l'arbre rapide avec son frein mécanique

L'arbre rapide tourne à environ 1.500 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence - lorsque le frein aérodynamique tombe en panne - ou en cas de maintenance de l'éolienne.

### I. 4.8 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.

### **I. 4.9 le dispositif d'orientation**

Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. Généralement, ce sont des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée, qui assurent l'orientation. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours afin de ne pas tordre les câbles qui acheminent l'électricité.

### **I. 4.10 le système contrôle-commande**

Le système de contrôle de l'éolienne est composé d'un certain nombre d'ordinateurs qui surveillent sans cesse la condition de l'éolienne, tout en recueillant des statistiques sur son fonctionnement. Comme son nom l'indique, cette unité contrôle également plusieurs interrupteurs, pompes hydrauliques et soupapes situés à l'intérieur de l'éolienne.

Avec l'augmentation de la taille des éoliennes, il devient encore plus important que leur taux de disponibilité soit très élevé, donc que leur fonctionnement soit fiable à tout moment.

### **I. 4.11 le système hydraulique**

Le système hydraulique de l'éolienne remet en place les pales ou les extrémités des pales. L'expérience a démontré que les systèmes aérodynamiques de freinage sont extrêmement sûrs. Ainsi, ils arrêtent l'éolienne en moins de quelques rotations au maximum. De plus, un tel système permet de freiner l'éolienne avec douceur sans trop de contraintes et fatigue de la tour et de la machinerie. Les aérofreins constituent donc la façon la plus répandue d'arrêter une éolienne moderne.

### **I. 4.12 l'unité de refroidissement**

Le refroidissement éolien, parfois aussi appelé facteur vent dans le langage populaire, désigne la sensation de froid produite par le vent sur un organisme qui dégage de la chaleur, alors que la température réelle de l'air ambiant ne s'abaisse pas. Paul Siple et Charles F. Passel ont développé le concept de facteur du refroidissement éolien (en langue anglaise, le wind chill) juste avant l'entrée des États-Unis dans la Seconde Guerre mondiale lors d'expériences en Antarctique<sup>1</sup>.

Le concept s'est graduellement répandu ensuite grâce au service météorologique des États-Unis. Environnement Canada et d'autres services nationaux de météorologie l'utilisent afin de

pouvoir quantifier la température perçue, en cas de froid intense, par le corps humain en combinant la vitesse du vent et la température extérieure..

### I. 4.13 l'anémomètre et la girouette

L'anémomètre et la girouette sont fixés au sommet de la nacelle. Les anémomètres permettent de mesurer la vitesse et/ou la pression. Sur les éoliennes, les anémomètres mesurent la vitesse du vent selon l'équation suivante :

$$V = 2\pi \cdot F(N) \cdot R \cdot N \quad (I.1)$$

Avec :

V: la vitesse du vent (en m/s)

F(N): la fonction d'étalonnage qui dépend des dimensions et matériaux de l'anémomètre et de sa vitesse de rotation.

R: le rayon moyen de l'axe de rotation (en m)

N: le nombre de tours par seconde (en tr/s)

### I. 5 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV. Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure

à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants. La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs.

### II.1 Introduction

Le rotor, et plus exactement les pales, est l'organe le plus important dans la capture de l'énergie du vent. On s'est toujours mis à bien étudier et même modéliser tous les phénomènes liés à l'écoulement de l'air à travers le rotor. Cela conduit à des concepts, très complexe parfois, mais qui mènent vers une optimisation en terme de rendement en puissance, en couple et en poussée. Donc, l'étude aérodynamique des pâles demeure une partie très importante dans la conception éolienne rajoutée au dimensionnement des pâles et l'étude de la dynamique des structures des matériaux utilisés dans l'industrie éolienne. Notre travail se focalisera, alors, sur cette étude aérodynamique, notamment, sur l'évaluation des performances aérodynamiques d'une pale d'éolienne à axe horizontal pour voir l'influence de plusieurs paramètres sur la puissance, le couple et la poussée récupérés.

### II.2 Aérodynamique des éoliennes

L'aérodynamique est la branche de la mécanique des fluides qui s'intéresse aux effets du déplacement des corps dans l'air. L'étude de l'aérodynamique s'applique entre autre aux avions, aux automobiles mais aussi aux éoliennes. Lorsque l'on souhaite étudier et comprendre le fonctionnement d'un profil d'aile ou d'une pale d'éolienne, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques ainsi que le vocabulaire approprié. Nous allons présenter tout ceci.

#### II.2.1 Description d'une pale d'éolienne

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

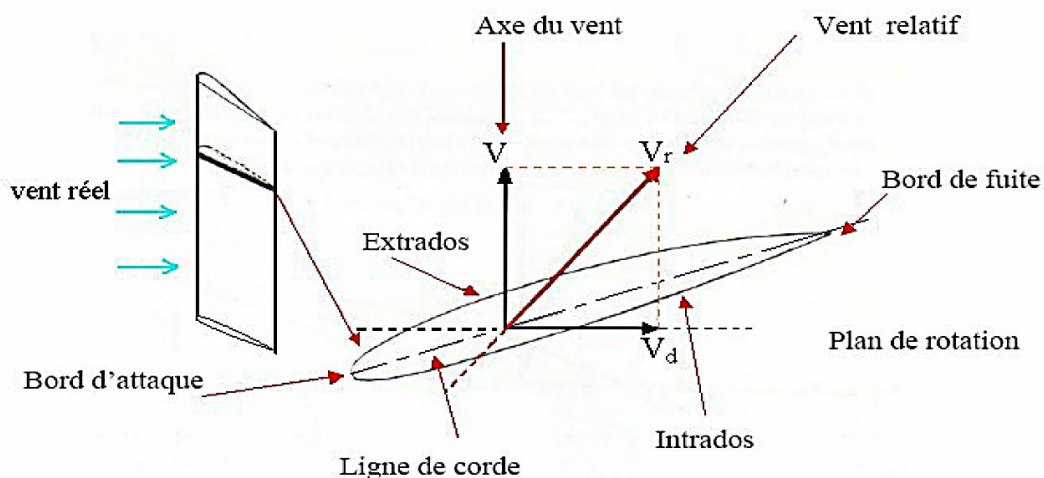


Figure II.1 : Description d'une pale d'éolienne Source.

### II.2.2 Fonctionnement d'une pale 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.

### II.2.3 Portance et traînée d'un profil aérodynamique

La portance représente la force exercée sur l'extrados de la pale. Cette force tend à tirer la pale ou à soulever l'aile de l'avion perpendiculairement à la direction du vent relatif. La traînée aérodynamique est une force qui s'oppose au mouvement d'un corps se déplaçant dans l'air; c'est la résistance à l'avancement. Elle s'accroît si la surface exposée au vent ou la vitesse de déplacement augmente, le coefficient de portance  $C_l$  (lift) et le coefficient de traînée  $C_d$  (drag) servent à caractériser l'aérodynamisme d'un profil. Dans la littérature française,  $C_d$  est remplacé par  $C_x$  et nommé coefficient de pénétration dans l'air.  $C_l$  est remplacé par  $C_z$  et conserve le même nom. L'écoulement du vent sur le profil de la pale génère la portance. Pour comprendre le phénomène de portance il faut faire appel aux notions de mécanique des fluides que nous avons présentées précédemment. Ce phénomène est dû à la géométrie du profil. En effet nous avons vu qu'avec la relation de Bernoulli, nous pouvons démontrer que suite à un changement de section dans un écoulement, la vitesse augmente et la pression diminue. C'est exactement ce phénomène qui se produit sur une pale d'éolienne. Le fluide qui suit la partie supérieure de la pale, l'extrados, a plus de chemin à parcourir que le fluide qui suit le chemin inférieur, l'intrados. La conservation de la masse d'air entre l'entrée de la pale, (bord d'attaque) et la sortie de la pale, (bord de fuite), impose donc une augmentation de la vitesse et une chute de la pression sur l'extrados. La chute de pression sur l'extrados a tendance à soulever l'aile ou à faire avancer la pale ou encore à « porter » la pale: c'est le phénomène de portance. Bien sur la traînée aérodynamique produit elle aussi une force s'opposant au déplacement de la pale. La figure II.2 nous présente :

- la portance  $P$ , perpendiculaire à la direction du vent relatif,
- la traînée  $T$  dans la même direction que le vent relatif.

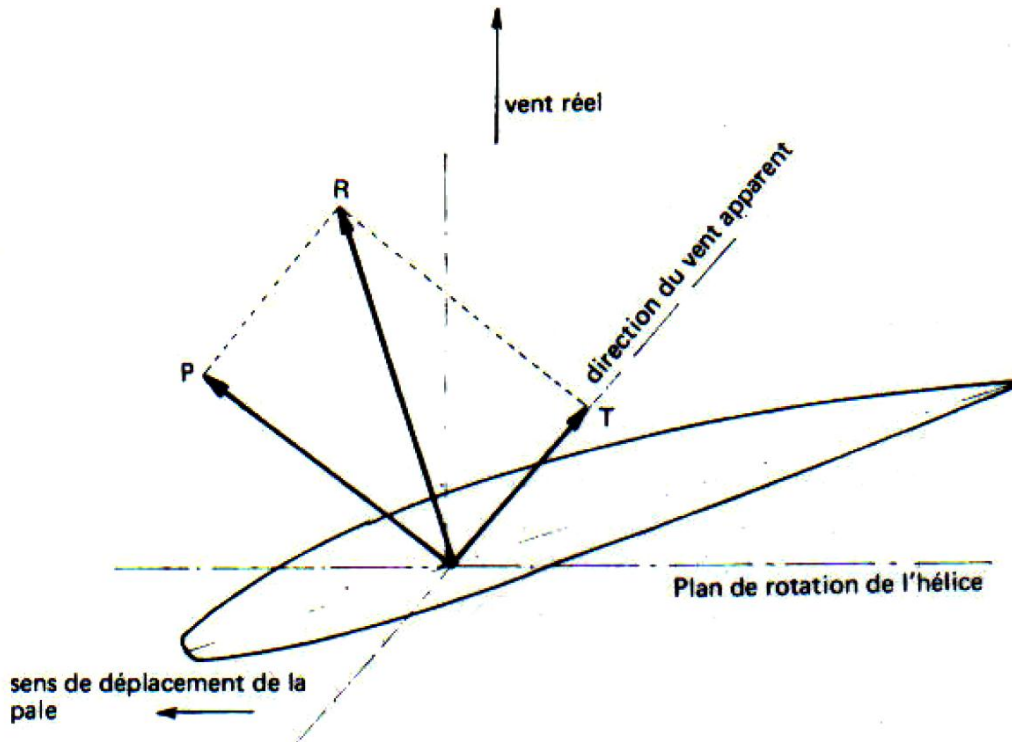


Figure II.2 : Forces appliquées sur la pale Source.

#### II.2.4 Force de poussée sur une pale d'éolienne

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

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (\text{II.1})$$

Où :

$C_d$  : coefficient de traînée

$A$  : surface projetée perpendiculairement à l'écoulement

$\rho$  : (Rho) masse volumique de l'air

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

#### II.2.5 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 :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (\text{II.2})$$

Où :

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

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

$E_c$  : énergie cinétique (Joule).

On rappelle au passage qu'un joule représente le travail d'une force de 1 N appliquée sur une distance de 1 mètre. Ou encore l'énergie nécessaire pour soulever 1 pomme de 1 mètre d'altitude.

### II.2.6 Loi de Betz

Etudions l'éolienne présentée (figure II.3). D'après la théorie de Betz, la puissance du vent est:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (II.3)$$

Avec  $S_{éolienne}$  la surface balayée par l'éolienne,  $\rho$  la masse volumique de l'air ( $1.25 \text{ kg / m}^3$ ) et  $v$  la vitesse du vent.

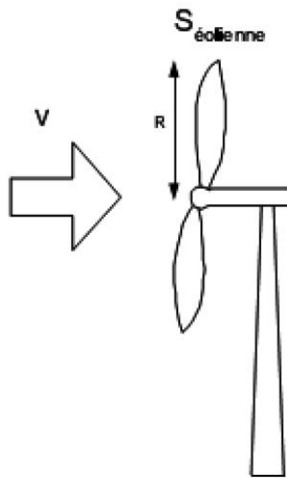


Figure II.3 : Eolienne simplifiée.

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent ( $P_{vent}$ ).

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne  $P_{éolienne}$  peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance  $C_p$  :

$$P_{éolienne} = C_p \cdot P_{vent} \quad (II.4)$$

D'après Betz, le coefficient de puissance  $C_p$  ne peut être supérieur à  $16/27$ .

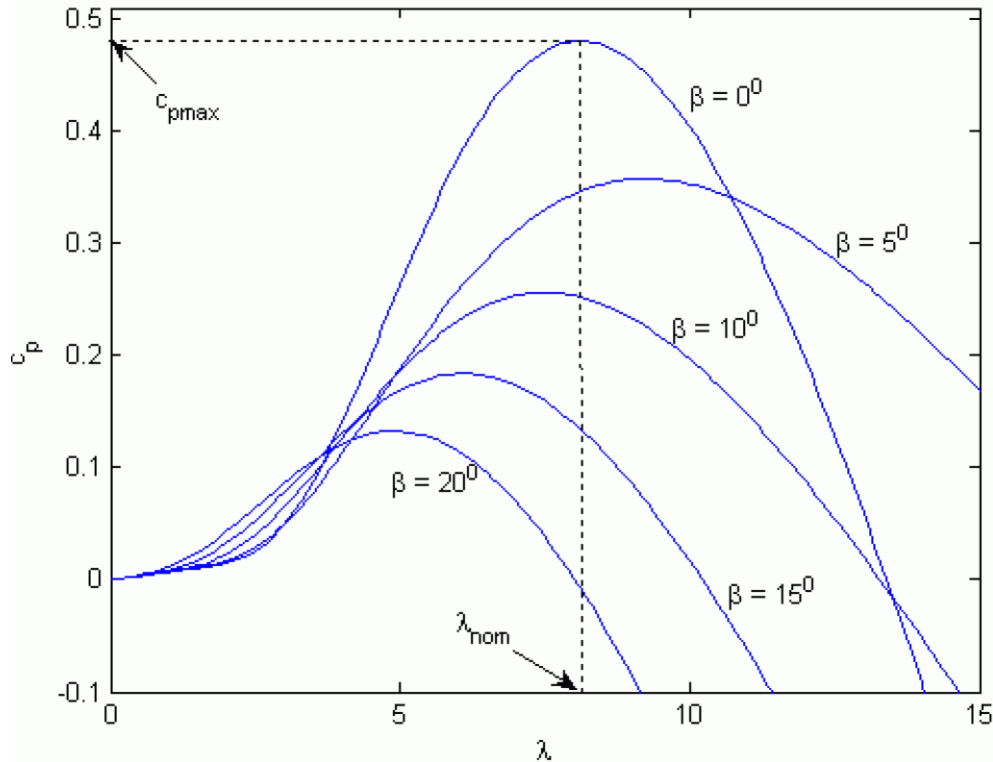
Le coefficient  $C_p$ , diffère pour chaque éolienne, dépend de l'angle d'inclinaison des pales  $\beta_i$  et du rapport de vitesse  $\lambda$  :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (II.5)$$

Avec  $R$  le rayon des pales de l'éolienne,  $\Omega$  la vitesse de rotation de l'éolienne et  $v$  la vitesse du vent. Le coefficient de puissance  $C_p$  est souvent issu de mesures pratiques. L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique :

$$C_p(\lambda, \beta_i) = (0.44 - 0.0167\beta_i) \sin\left(\pi \frac{\lambda - 3}{15 - 0.3\beta_i}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta_i \quad (II.6)$$

Avec  $\beta_i$  exprimé en degrés.



**Figure II.4: Coefficient de puissance  $C_p$ .**

La figure II.4 représente le coefficient de puissance  $C_p$  (calculé à partir de l'équation  $C_p(\lambda, \beta_i)$ ) en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  pour différents angles d'inclinaison des pales  $\beta_i$ . On remarque que si, pour un angle constant  $\beta_i$ , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse  $\lambda$  constant et égal à  $\lambda_{optimal}$  à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure II.4 montre le  $\lambda_{optimal}$  correspondant à un angle d'inclinaison des pales  $3\beta_i$ . cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir  $\lambda = \lambda_{optimal}$ , il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent (équation II.3). Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient  $\lambda$  varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement).

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant entre 2% et 38% au vu de la caractéristique suivante (Figure II.5), il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités.

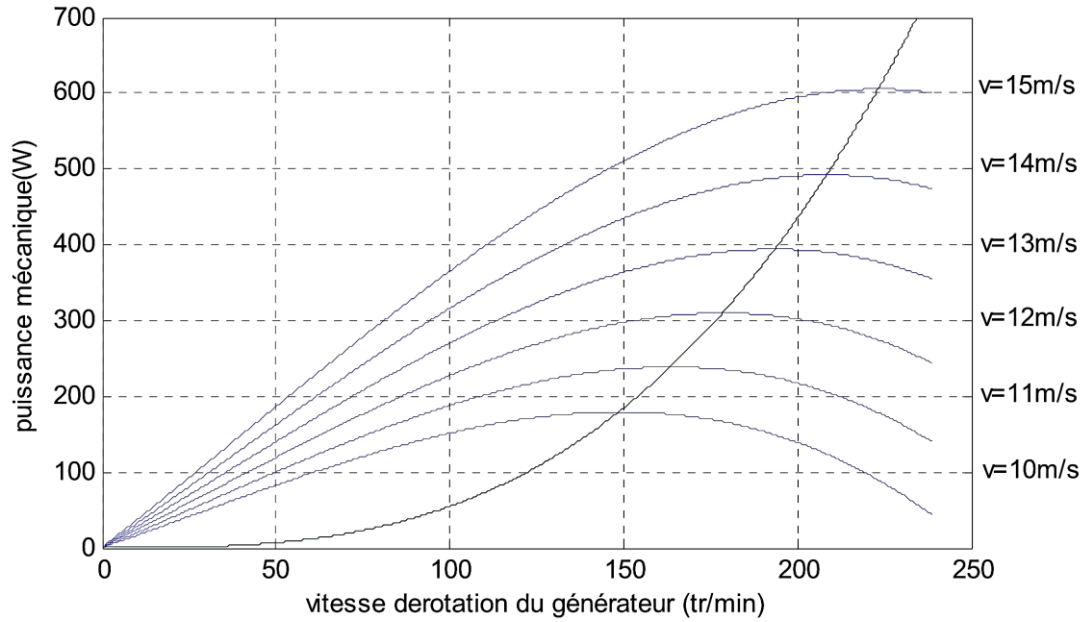


Figure II.5: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.

### II.3 Le multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice figure (II.6). Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

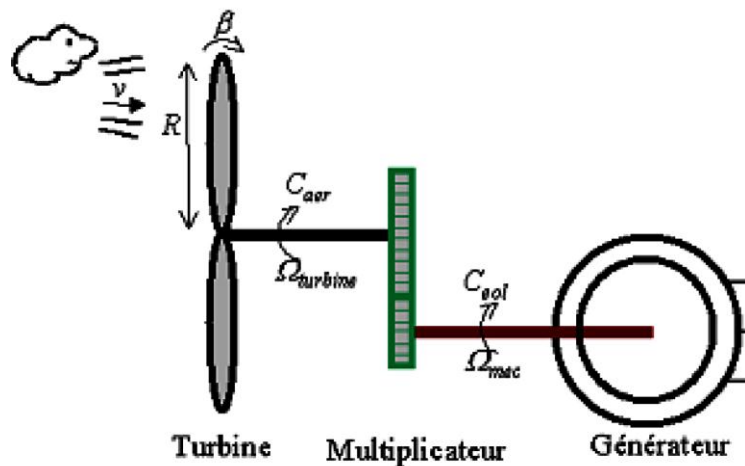


Figure II.6 : Schéma de la turbine éolienne.

Avec :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.7)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.8)$$

### II.4 Dynamique de la rotation du rotor

Dans cette section, nous allons présenter la dynamique de base d'un mouvement de rotation.

la vitesse angulaire de rotation est notée  $\omega$  (rad/s). L'accélération angulaire est notée  $\alpha$  (rad/s<sup>2</sup>). La vitesse tangentielle notée  $v$  s'exprime en mètre par seconde (m/s). Pour un point tournant sur un cercle de rayon  $r$ , l'expression de la vitesse tangentielle est la suivante :

$$v = \omega \cdot r \quad (\text{II.9})$$

Lors de la rotation du rotor, les pales subissent une accélération normale et une accélération tangentielle. Ces accélérations génèrent des forces en vertu de la deuxième loi de Newton :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (\text{II.10})$$

L'accélération normale donne naissance en quelques sortes aux forces « centrifuges ». Dans un mouvement de rotation, l'accélération normale est dirigée vers le centre de rotation donc les forces le sont aussi. La preuve? Si la pale continue de tourner autour du centre de rotation et ne s'en va pas, c'est bien qu'une force la maintient proche du centre. On peut voir cette force comme une réaction s'opposant à l'action de la force « centrifuge ». L'accélération normale s'écrit :

$$a_n = r \cdot \omega^2 \quad (\text{II.11})$$

Ou encore

$$a_n = \frac{v^2}{r} \quad (\text{II.12})$$

Où :

$r$  = distance par rapport au centre de rotation (m)

$\omega$  = vitesse de rotation angulaire (rad/s)

$v$  = vitesse tangentielle (m/s)

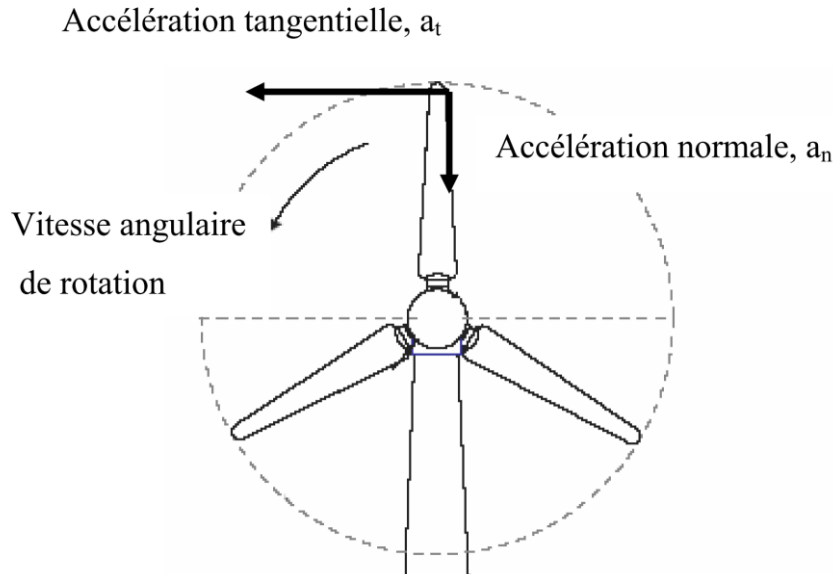
L'accélération tangentielle est tangente au cercle décrit par la rotation, elle est nulle dans le cas d'un mouvement de rotation à vitesse constante. La figure II.7 illustre l'ensemble de ces vitesses et accélérations. L'expression de l'accélération tangentielle est la suivante :

Où :

$$\alpha_t = r \cdot \alpha \quad (\text{II.13})$$

$r$  = distance par rapport au centre de rotation (m)

$\alpha$  = accélération angulaire en (rad/s<sup>2</sup>)



**Figure II.7: Mouvement de rotation du rotor.**

Lors de la rotation du rotor, l'application d'un couple peut entraîner une accélération ou une décélération et donc une variation de la vitesse angulaire. Un corps comme le rotor va accélérer ou décélérer plus ou moins vite et facilement selon une grandeur que l'on nomme son moment d'inertie noté  $I$  ( $\text{kg.m}^2$ ). Si le corps présente une grande inertie, il faudra un couple important pour faire varier son accélération. Nous pouvons donc écrire que la somme des moments ou des couples appliqués sur le rotor en rotation est égale au produit de l'inertie et de l'accélération angulaire :

$$\sum \text{Moment} = I \cdot \alpha \quad (\text{II.14})$$

Lors de la rotation, le rotor emmagasine de l'énergie sous forme cinétique. Cette énergie peut s'écrire :

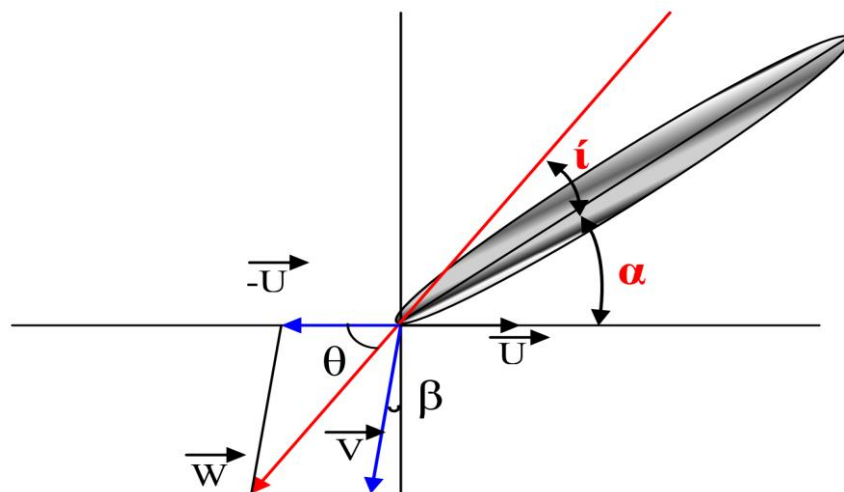
$$E_c = \frac{1}{2} I \cdot \omega^2 \quad (\text{II.15})$$

Pour déterminer la vitesse de rotation  $\omega$  d'un corps soumis à une accélération angulaire constante  $\alpha$ , nous pouvons appliquer les équations du mouvement uniformément accéléré :

$$\omega = \alpha \cdot t \quad (\text{II.16})$$

### III.1 Détermination de la fatigue de flexion due aux rafales en marche normale

Les rafales se traduisent par une augmentation des contraintes des flexions par suite des changements d'intensité et de direction du vent. À la cour des rafales, la vitesse du vent peut subir des accroissements allant jusqu'à 4 à 5 mètres par seconde et sa direction peut varier d'une vingtaine de degrés dans le même temps. A l'accroissement de la vitesse relative du vent par rapport aux pales, peut donc s'ajouter le fait qu'elle peut être attaquées par suit des changements de direction sous des incidences plus défavorables amenant une augmentation supplémentaire des contraintes. Les changements de direction sont essentiellement horizontaux et extrêmement rapides. L'axe de l'éolienne en raison de l'inertie ne peut les suivre en orientation. Il peut arriver, dans ces conditions, que la direction de cet axe fasse un angle de l'ordre de 30° à 40° ou même davantage avec le vent réel. Simultanément, l'intensité de celui-ci peut être temporairement importante. Etant donné la brièveté de la rafale et sa direction, bien souvent, le vent réel peut atteindre les pales sans avoir été freiné. Les pales les plus chargées sont alors celles qui se trouvent en position verticale et se déplacent en allant à la rencontre du vent réel. Considérons donc une telle pale et soit  $\beta$  l'angle que fait l'axe de l'éolienne avec le vent réel (voir fig. III.1).



**Figure III.1 : Présentation des vitesses du vent sur une section de pale**

La section de la pale située à la distance  $r$  de l'axe, entraînée à la vitesse  $U=U_0r/R$  est soumise au vent relatif d'intensité :

$$W_1 = \sqrt{U^2 + V_1^2 + 2UV_1 \sin \beta} \quad (\text{III.1})$$

Ce vent est incliné sur le plan de rotation d'un angle  $\theta$  tel que :

$$\text{tg } \theta = \frac{V_1 \cos \beta}{U + V_1 \sin \beta} \quad (\text{III.2})$$

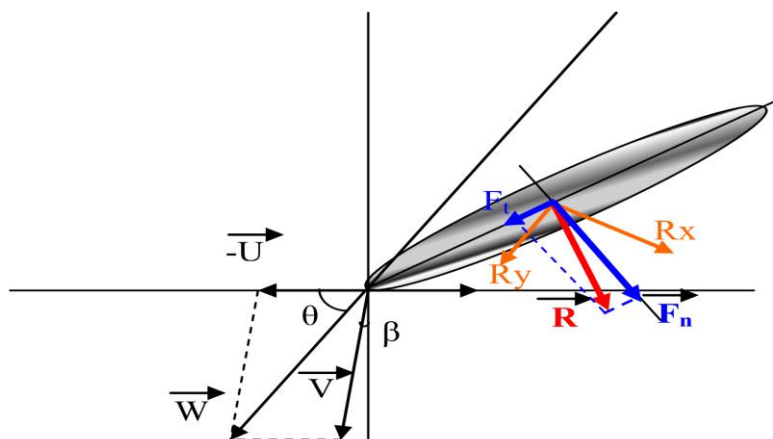


Figure III.2 : Présentation de la composante  $F_n \perp$  à la corde

La composante de la force aérodynamique par unité de longueur qui s'exerce perpendiculairement à la corde est :

$$f_n = \frac{1}{2} \rho C_n W_1^2 \quad (\text{III.3})$$

Etant (L) la longueur de la corde et  $C_n$  le coefficient aérodynamique de Lilienthal qui correspond à :

$$i = \theta - \alpha \quad (\text{III.4})$$

Pour des vitesses  $U_0$  et  $V_1$  données, il est possible de calculer, en considérant plusieurs valeurs de  $\beta$ , la valeur maximale que peut atteindre le produit  $C_n W_1^2$  et par voie de conséquence celle de  $f_n$  et ceci dans n'importe quelle section distante de  $r$  de l'axe. Les pales des grands aérogénérateurs ont une faible torsion. On peut négliger celle-ci devant la fatigue à la flexion. Les valeurs ainsi obtenues sont très légèrement supérieures aux fatigues réelles mais la différence est minime.

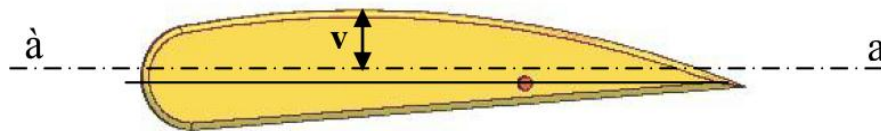
Dans les hypothèses envisagées, le moment fléchissant maximal dans la section  $x$  dû aux forces aérodynamiques qui s'exercent entre l'extrémité de la pale et la section située à une distance  $x$  de l'axe, s'élève à :

$$M_x = \int_x^R (x - r) f_{nM} dr \quad (\text{III.5})$$

$f_{nM}$  : désignant la valeur maximale de  $f_n$ .

Dans ces conditions, les contraintes dues à la flexion sous l'effet des rafales, atteint dans la section  $x$ , la valeur :

$$\sigma_f = \frac{M \cdot v}{I_x} \quad (\text{III.6})$$



**Figure III.3 : (a à) Axe neutre longitudinal**

Dans cette expression,  $I_X$  représente le moment d'inertie géométrique de la section nette d'abscisse  $x$  par rapport à l'axe à la fibre la plus éprouvée.

En raison de la forme particulière des profils utilisés dans la construction des éoliennes de leur disposition, cette fibre est en général est une fibre de l'extrados qui travaille en compression.

La structure résistante sera dimensionnée de façon que  $R_f$  ne dépasse pas une certaine limite qui dépend du matériau utilisé. Précisons que les contraintes obtenues sont notablement supérieures aux valeurs que l'on obtient en supposant le vent nominal uniforme et parallèle à l'axe de l'hélice et que leur maximum ne se situe pas au pied de la pale mais vers la moitié du rayon. Signalons à titre d'information, que l'aérogénérateur de Nogent-le-Roi était calculé pour fonctionner dans un vent de 20 m/s avec rafales de 35 m/s.

$$i = \theta - \alpha \quad (\text{III.7})$$

### III.2 Contrainte due aux forces centrifuges en marche normale

Lorsque les pales sont perpendiculaires à l'axe de l'éolienne, la force centrifuge qui agit sur l'élément de pale compris entre les distances  $r$  et  $r+dr$  de l'axe de rotation s'exprime par la relation

$$dF_c = \rho S \omega^2 r dr \quad (\text{III.8})$$

- (S) Etant la section nette du matériau constitutif de la pale, à la distance  $r$ . La fatigue due à la force centrifuge, dans la section située à une distance  $x$  de l'axe, est déterminée par conséquent, par l'expression :

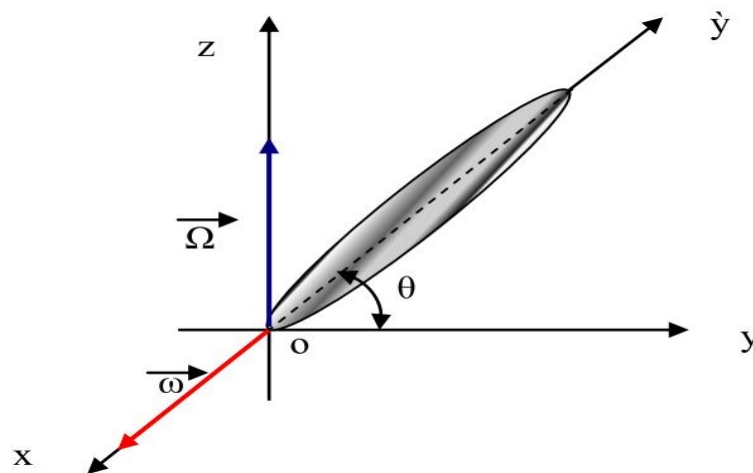
$$R_c = \frac{F_c}{S_x} = \frac{1}{S_x} \int_x^R \rho S \omega^2 r dr \quad (\text{III.9})$$

Cette contrainte correspond à un effort de traction. Elle se superpose avec les contraintes de flexion. Du fait de l'existence des forces centrifuges, les fibres qui étaient étirées par la flexion, le sont davantage mais celles qui étaient comprimées, le sont moins. En particulier la fibre la plus comprimée voit sa fatigue réduite.

Précisons qu'en marche normale, les contraintes dues aux forces de pesanteur sont faibles par rapport à celles développées par les forces centrifuges ; celles-ci étant elles-mêmes beaucoup moins importantes que les fatigues de flexion.

### III.3 Effets Gyroscopiques

Le changement d'orientation de l'axe de l'éolienne consécutif aux variations de la direction du vent fait apparaître des efforts gyroscopiques. Désignons par  $\omega$  la vitesse de rotation de l'éolienne que nous supposerons constante en grandeur et par  $\Omega$  sa vitesse de changement d'orientation.



**Figure III.4 : Présentation des vecteurs des vitesses de rotation et d'orientation.**

Considérons une pale dont le moment d'inertie par rapport à l'axe de rotation est  $I_1$  et deux trièdres mobiles:

- Le premier  $Oxyz$  ( $R$ ) tournant avec l'axe de l'éolienne de façon que Les vecteurs  $\omega$  et  $\Omega$  soient portés par les axes  $Ox$  et  $Oz$ , l'axe  $Ox$  étant confondu avec l'axe de l'hélice, l'axe  $Oz$  étant dirigé suivant une pale.
- Le second  $Oxy'z'$  ( $R'$ ) entraîné en rotation par l'hélice, l'axe  $Oy'$  étant dirigé suivant une pale.

En admettant que le moment d'inertie de la pale par rapport à  $Oy'$ , est négligeable (ce qui est vrai avec une bonne approximation), la matrice d'inertie et le moment cinétique de la pale, par rapport au trièdre  $Oxy'z'$  ont pour Expression :

$$\Delta = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix}$$

$$\Delta(\vec{\Omega} + \vec{\omega}) = \begin{bmatrix} I_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ \Omega \sin \theta \\ \Omega \cos \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \omega \\ 0 \\ I_1 \Omega \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

L'application du théorème du moment cinétique à la pale dont l'axe longitudinal coïncidence avec Oy' dans le repère Oxy'z' , permet d'écrire :

$$\frac{d}{dt} [\Delta(\vec{\Omega} + \vec{\omega})]_R + (\vec{\Omega} + \vec{\omega}) \wedge \Delta(\vec{\Omega} + \vec{\omega}) = \vec{M} \quad (\text{III.11})$$

Désignant le moment résultant appliqué à la pale par rapport au point O, c'est-à-dire la résultante du moment des forces aérodynamiques Ma et du moment d'encastrement dû au moyeu que nous supposons de rayon négligeable.

Tous calculs faits, on obtient:

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} \frac{I_1}{2} \Omega_2 \sin 2\theta \\ 0 \\ I_1 \frac{d\Omega}{dt} \cos \theta - 2I_1 \Omega \omega \sin \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Dans le cas où la direction de l'éolienne ne varie pas ( $\dot{\Omega} = 0$ ), le moment  $\vec{M}$  est nul. On a alors  $\vec{M} = \vec{M}_e + \vec{M}_a = 0$  soit  $\dot{M}_e = -\dot{M}_a$ . Le moment d'encastrement équilibre le moment aérodynamique.

Dans le cas où la direction de l'éolienne change, le moment M qui apparaît, développe des contraintes supplémentaires qui accroissent la fatigue du matériau constitutif au niveau de la fixation de la nacelle avec le mat. L'équation vectorielle précédente qui peut se mettre sous la forme équivalente:  $\dot{M}_a + \dot{M}_i + \dot{M}_e = 0$ , montre en effet que  $(\dot{M}_a + \dot{M}_i) = -\dot{M}_e$ , le montant  $\dot{M}_i$  des forces d'inertie étant égal à  $-\dot{M}_e$ .

La fatigue due à l'effet gyroscopique est donc maximale lorsque la pale est verticale. La quantité  $2I_1 \alpha_0 \omega_1 \omega = 2I_1 \Omega_0 \omega$  représente le moment fléchissant maximum supplémentaire dû à l'effet gyroscopique, qui vient s'ajouter alors, au moment fléchissant dû aux forces aérodynamiques. Si on appelle  $i_1$ , le moment d'inertie mécanique par rapport à l'axe longitudinal de la section x, du tronçon de pale compris entre l'extrémité R et l'abscisse x, la contrainte due à l'effet gyroscopique à la distance x s'exprime par la relation :

$$\sigma_g = \frac{2i_1 \Omega_0 \omega v}{I_x} \quad (\text{III.13})$$

### III. 4 Calcul de la fatigue due à la flexion par vent de tempête, éolienne arrêtée face au vent

Soit  $C_x$  le coefficient de traînée de la pale placée perpendiculairement au Vent. La force qui agit sur l'élément de surface compris entre  $r$  et  $r + dr$  est:

$$df = \frac{1}{2} \rho C_x IV^2 dr = f_v dr \quad (\text{III.14})$$

Le moment de flexion dû au vent de tempête, dans la section située à la distance  $x$  de l'axe, a donc pour expression:

$$M_f = \int_x^R (r - x) f_v dr \quad (\text{III.15})$$

En pratique, la surface de pale étant quasi perpendiculaire au vent,  $C_x$  est voisin de 2. Dans le cas où l'angle de calage  $\alpha$  est relativement important, on peut prendre

$$C_x = 2 \cos \alpha \quad (\text{III.16})$$

La connaissance du moment de flexion pour le vent de tempête, permet alors de calculer la fatigue correspondante:

$$\sigma_f = \frac{M_f \cdot v}{I_x} \quad (\text{III.17})$$

$M_f$  désignant le moment calculé ci-dessus,  $I_x$  et  $v$  ayant les mêmes significations qu'au paragraphe 1 précédent. En pratique, la fatigue, éolienne arrêtée face au vent, est déterminante pour le dimensionnement des structures résistantes des roues à faibles vitesses spécifiques ( $\lambda_0 < 4$  environ) et des pales d'aérogénérateurs disposées en dièdre. Pour les éoliennes à pales perpendiculaires à l'axe de rotation, la fatigue à l'arrêt est faible par rapport à la fatigue en service normal.

### III.5. Evaluation des efforts s'exerçant sur l'ensemble de l'installation

La connaissance des profils et des largeurs de pales permet d'évaluer la poussée axiale quelles valeurs la pression axiale peut-elle atteindre ?

Les mesures effectuées sur l'éolienne de Gedser ont permis de constater que la poussée en Newtons par m<sup>2</sup> de surface balayée s'exprimait approximativement en marche normale par la relation:  $P = 0,4V_2^2$ ,  $V$ : étant en m/s, ce qui correspond à un coefficient :  $CF = 0,64$  La force exercée par le vent, par unité de surface balayée, éolienne arrêtée, étant les 40 % de la pression exercée, éolienne en mouvement. Les essais effectués au laboratoire Eiffel à Paris,

### Chapitre III : Calcul des pales du point de vue de la résistance des matériaux

---

sur la maquette de l'aérogénérateur de Nogent-le-Roi, ont montré que le coefficient CF en marche normale ( $\lambda_0 = 7$ ) atteignait pour une vitesse de vent de 20 m/s, la valeur  $CF = 0,418$  et pour la vitesse d'emballement ( $\lambda_0 \sim 14$ ), la valeur  $CF = 1,318$ . Ce qui correspond à des pressions dynamiques en N/m<sup>2</sup> sur la surface balayée: ( ) Respectivement égales à:  $P = 0,26 V_2$  et  $P = 0,83 V_2$ . Les essais ont par ailleurs mis en évidence dans l'un et l'autre cas une diminution des coefficients CF avec la vitesse du vent. Il convient de remarquer que l'application du théorème d'Euler pour une vitesse en aval  $V_2=0$  conduit pour la pression dynamique à l'expression:  $P = 0,63 V_2$  en prenant  $\rho = 1,26 \text{ kg/m}^3$ . Pour les éoliennes lentes, les efforts exercés par le vent sur la roue sont relativement plus importants en raison des très nombreuses pales et de l'importance de la structure métallique de soutien. Il est prudent de prendre:  $P = V_2$  (Pour une surface métallique plane perpendiculaire au vent, la pression de l'air est en effet donnée en fonction de la vitesse du vent, par l'expression  $p= 1,25 V_2$ ). Dans toutes ces relations, P est exprimée en N/m<sup>2</sup> ou pascals et V en mètres par seconde. Précisons que la détermination à l'aide de l'ordinateur du coefficient CF en fonction de  $\lambda_0$  permet de calculer la poussée qui s'exerce sur l'éolienne pour n'importe quel régime de fonctionnement.

## IV.1 Généralités sur la maintenance

### IV.1.1 La fonction maintenance

#### IV.1.1.1 Introduction à la fonction maintenance

Définition selon l'AFNOR (Association Française de Normalisation): « Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié, ou en mesure d'assurer un service déterminé » (NF X60-010).

- **La maintenance de fabrication (production)**

Elle consiste principalement à :

- Dépanner les machines utilisées pour la production
- Réparer, réviser, rénover et les maintenir en état

- **La maintenance générale**

Elle consiste principalement à :

- Réparer et maintenir en état les bâtiments, les engins de transport, les espaces verts...
- Contrôler et surveiller les travaux concernant l'hygiène, la sécurité, la pollution, la gestion de l'énergie...

- **La maintenance sous-traitée**

Il s'agit dans ce cas de :

- Négocier les contrats d'assistance technique
- Veiller au respect de ces contrats

#### IV.1.1.2 Rôle de la maintenance

-Elle doit assurer la rentabilité des équipements en tenant compte de la politique définie par l'entreprise.

- Elle procède à des études préalables afin de permettre la réduction des coûts et des interventions.
- Elle prépare le travail, étudie les conditions de fonctionnement, les défaillances possibles et les conditions d'intervention.

#### IV.1.1.3 Fonctions d'un service maintenance

- **Fonction étude et méthode**

Elle consiste à mettre en place des études techniques pour :

- Rechercher des améliorations.

- Participer à la conception de travaux neufs.
- Participer à l'analyse des accidents de travail.
- Etablir des fiches d'instructions pour les interventions.
- Etablir les plannings d'intervention.
- Gérer les approvisionnements.
- Analyser les coûts de maintenance.
- Définir des stratégies de maintenance.

- **Fonction exécution et mise en œuvre**

Son aspect pluri-technique nécessite une bonne connaissance des matériels ainsi qu'une bonne maîtrise des diverses technologies.

### IV.1.2. Les options de la maintenance

Les options susceptibles d'être mises en œuvre par le service maintenance relèvent de deux concepts principaux :

- La maintenance corrective
- La maintenance préventive

#### IV.1.2.1 La maintenance corrective

Elle correspond à une attitude passive d'attente de la panne ou de l'incident ; la réaction consiste alors à éliminer le défaut, grâce à un dépannage ou une réparation.

#### IV.1.2.2 La maintenance préventive

Elle correspond à la volonté de prévoir la dégradation de l'équipement afin d'éviter d'être pris au dépourvu par la panne.

Il existe alors deux solutions :

- Le changement ou la réparation systématique d'organes : c'est la maintenance systématique qui consiste à bien connaître les processus de dégradation
- Le changement ou la réparation des organes en fonction de leur état de dégradation : c'est la maintenance conditionnelle qui impose une surveillance de la progression du défaut

Il existe aussi un troisième concept qui consiste à se débarrasser définitivement des défaillances : c'est la maintenance améliorative. Elle nécessite une réflexion pour :

- Déterminer les causes réelles du problème
- Envisager les remèdes adaptés à leur suppression.

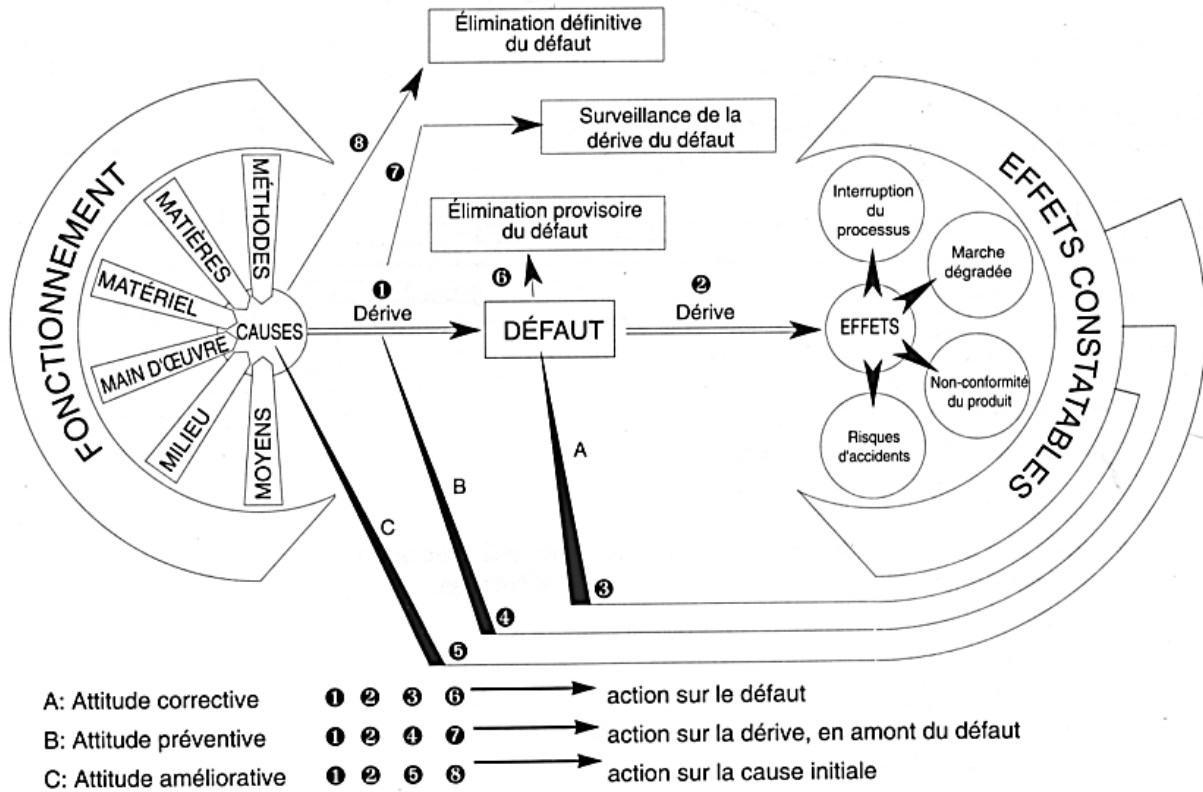


Figure IV.1 : Liaisons entre les options de la maintenance.

### IV.1.2.3 Les diverses options de la maintenance (selon AFNOR)

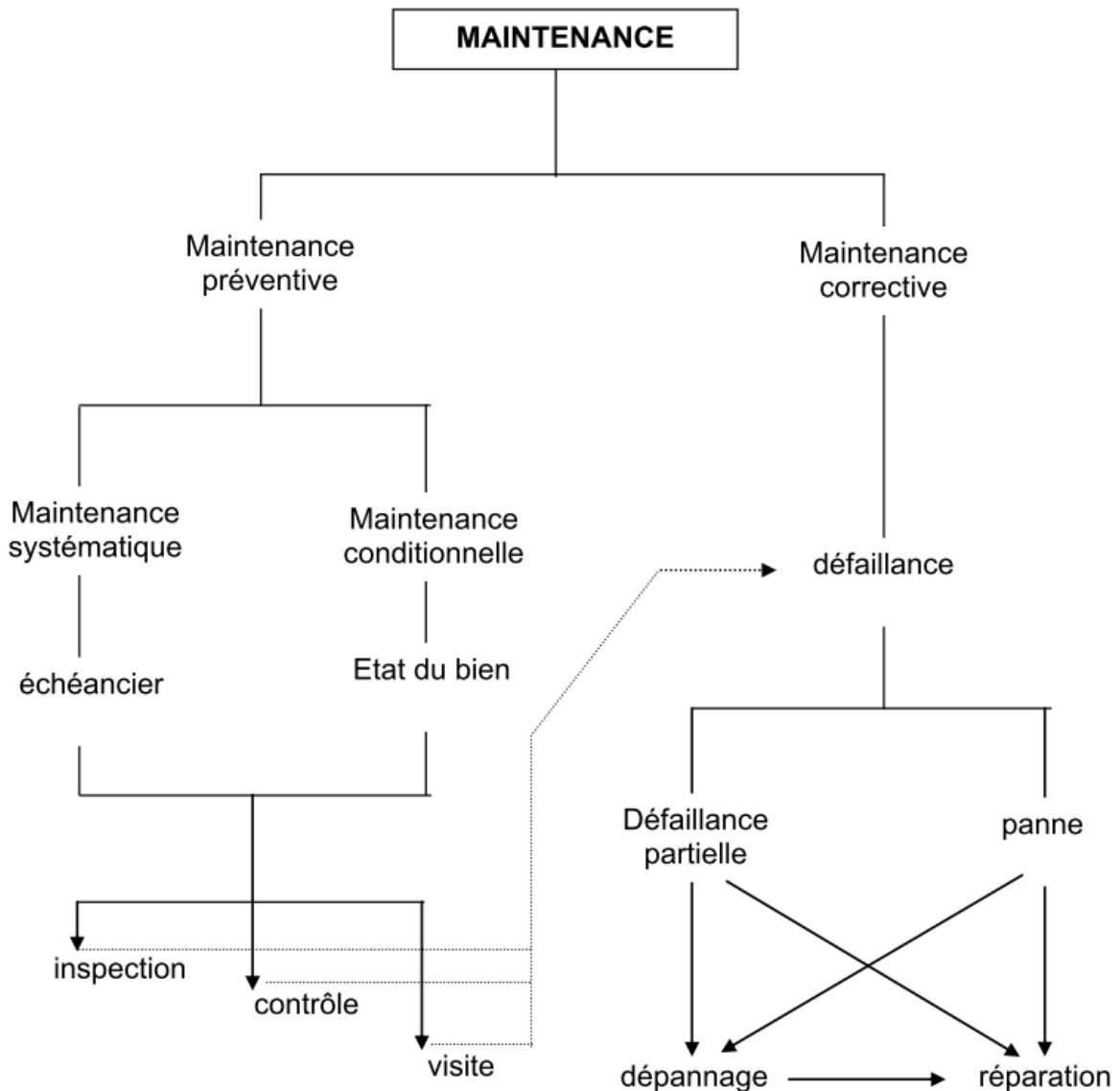


Figure IV.2 : Les options de la maintenance.

### IV.1.2.4 Termes et définitions relatifs à la maintenance

- **Maintenance préventive**

Maintenance effectuée selon des critères déterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

- Maintenance systématique : maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage.

- Maintenance conditionnelle : maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, etc.) révélateur de l'état du bien.

- **Maintenance corrective** : maintenance effectuée après une défaillance.

### IV.1.2.5 Les opérations de maintenance

- **Les opérations de maintenance préventive**

Les opérations suivantes sont effectuées de manière continue ou à des intervalles prédéterminés calculés sur le temps ou le nombre d'unités d'usage.

- **Inspection** : activité de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie. Elle peut être effectuée sous forme de « rondes » et a pour but la détection de défaillances mineures :

- défauts de lubrification (contrôles des niveaux)
- défauts de pression, de températures, de vibrations.
- détection visuelles de fuites, détection d'odeurs, de bruits anormaux.
- dépannages simples : réglage de tension de courroie, échanges de lampes...

- **Contrôle** : vérification de la conformité par rapport à des données préétablies, suivies d'un jugement (décision de non-conformité, d'acceptation, d'ajournement)

- **Visite** : activité consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout ou partie des éléments d'un bien. Elle peut entraîner certains démontages et déclencher des opérations correctives des anomalies constatées.

- **Les opérations de maintenance corrective**

-**Dépannage** : action sur un bien en panne en vue de le remettre en état de fonctionnement, provisoirement avant réparation.

- **Réparation** : intervention définitive et limitée de maintenance corrective

- **Autres activités du service maintenance**

- **Les travaux d'amélioration** : ils consistent à modifier un équipement pour augmenter sa sécurité, sa fiabilité et sa maintenabilité.

- **Les travaux de modernisation** : ils consistent à remplacer des composants âgés ou à leurs adjoindre des composants d'une génération nouvelle.

- **La rénovation**: ces travaux comprennent l'inspection complète de tous les organes suivie de:

- la réparation des éléments usés.
- l'achat d'éléments neufs.

- **les travaux neufs** : ils contiennent, entre autres, les tâches suivantes :

- avis sur le choix du matériel.

- réception technique et vérification de la conformité.
- Installation.
- mise au point (réglages, essais préliminaires...).
- mise en service.

- **La reconstruction** : elle intervient à la fin de vie du bien. Toutes les pièces sensibles sont remplacées par des pièces d'origine. On peut prévoir des performances supérieures à celles d'origine.

niveaux	Types de travaux	Personnel d'intervention	Moyens
1 <sup>er</sup> niveau	réglages simples prévus par le constructeur au moyen d'organes accessibles sans aucun démontage d'équipement, ou échange d'éléments accessibles en toute sécurité.	pilote ou conducteur du système	outillage léger défini dans les instructions d'utilisation.
2 <sup>ème</sup> niveau	dépannage par échange standard d'éléments prévus à cet effet, ou d'opérations mineures de maintenance préventive (rondes)	technicien habilité	outillage léger défini dans les instructions d'utilisation et pièces de rechanges disponibles sans délai.
3 <sup>ème</sup> niveau	identification et diagnostic de pannes, réparation par échange de composants fonctionnels, réparations mécaniques mineures.	technicien spécialisé	outillage prévu et appareils de mesure, banc d'essai, contrôle...
4 <sup>ème</sup> niveau	travaux importants de maintenance corrective ou préventive	équipe encadrée par un technicien spécialisé	outillage général et spécialisé, matériels d'essais, de contrôle...
5 <sup>ème</sup> niveau	travaux de rénovation, de reconstruction ou réparation importantes confiées à un atelier central	équipe complète et polyvalente	moyens proches de la fabrication

### IV.1.3 Autres aspects de la maintenance

#### IV.1.3 .1 La fiabilité

- **Définition :**

« Aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise dans des conditions données pendant un temps donné ». La notion de temps peut prendre la forme :

- Du nombre de cycles effectués.
- De la distance parcourue.
- Du tonnage produit...

- **Commentaires**

Un équipement est fiable s'il subit peu d'arrêts pour pannes. La notion de fiabilité s'applique à:

- Du matériel réparable (équipements industriels ou domestiques)
- Du matériel non réparable (composants, lampes...)

La fiabilité peut se caractériser par la moyenne des temps de bon fonctionnement (MTBF).

### IV.1.3 .2 La maintenabilité

- **Définition**

« Dans les conditions d'utilisation pour lesquelles il a été conçu, aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état dans lequel il peut remplir sa fonction, lorsque sa maintenance est accomplie ».

- **Commentaires**

La maintenabilité caractérise la facilité à remettre ou à maintenir un bien en bon état de fonctionnement.

La maintenabilité d'un équipement dépend de nombreux facteurs :

- Ceux liés à l'équipement : documentation, aptitude au démontage, facilité d'utilisation...
- Ceux liés au constructeur : qualité du service après-vente, facilité d'obtention de pièces de rechange, coût des pièces de rechange...
- Ceux liés à la maintenance : préparation et formation du personnel, outillages adéquats, études d'améliorations...

- **Quantification de la maintenabilité**

On peut caractériser la maintenabilité par la « moyenne des temps techniques de réparation »

Où MTTR

$$\text{MTTR} = \frac{\sum \text{temps d'intervention pour pannes}}{\text{Nombre de pannes}}$$

Exemple : en janvier 1998, la somme des temps d'intervention d'un équipement a été de 7,45 heures pour 9 pannes ; d'où  $\text{MTTR} = 7.45/9 = 0.83$  heures.

### IV.1.3 .3 La disponibilité

- **Définition**

« Aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions de temps déterminées ».

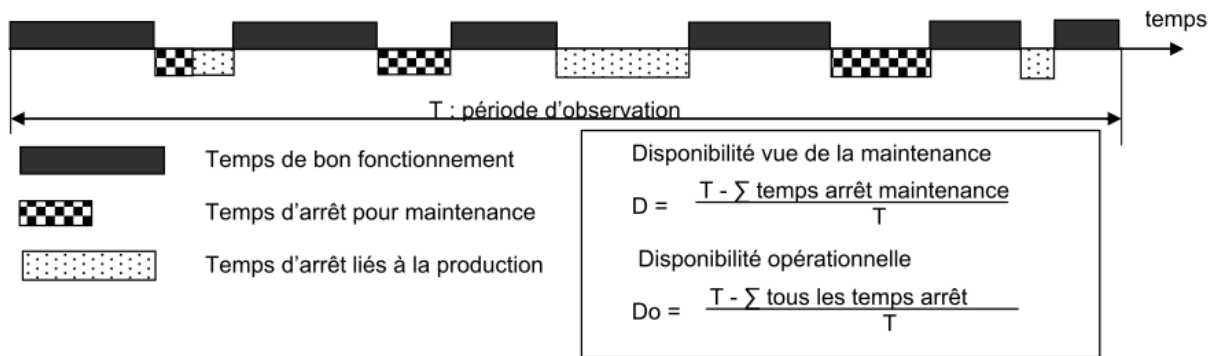
- **Commentaires**

Pour qu'un équipement présente une bonne disponibilité, il doit :

- Avoir le moins possible d'arrêts de production.
- Etre rapidement remis en état s'il tombe en panne.

La disponibilité d'un équipement est donc liée à la fiabilité et à la maintenabilité.

- **Quantification de la disponibilité**



*Figure IV.3 : Quantification de la disponibilité*

#### IV.1.4 La démarche de maintenance

Les interventions sur les équipements sont nécessaires pour garantir leur bon état de fonctionnement. Pour cela, l'équipe de maintenance doit s'organiser pour :

- que ce bon fonctionnement soit atteint dans les meilleures conditions de coût et de réalisation
- que les problèmes passés et présents soient mis à profit pour améliorer la situation future de l'équipement.

Il est donc possible de garder en mémoire :

- les pannes et incidents qui se sont présentés.
- les coûts de remise en état.
- les temps d'indisponibilité.
- les coûts de perte de production liés à l'indisponibilité.
- les modifications techniques apportées.
- les valeurs avant et après corrections, etc.

Cette nécessité conduit à mettre en place, pour chaque équipement, un dossier qui, en pratique, se présente en deux parties :

- le dossier technique
- le dossier machine

### IV.1.4 .1 Le dossier technique

Il regroupe tout ce qui est propre à un modèle de machine : données constructeur, plans, schémas électriques, caractéristiques générales, nomenclatures, documents pièces de rechanges...

Exemples :

- le dossier technique des palettiseurs de type « Z » de la marque « W ».
- le dossier technique des presses de type « P » de la marque « R ».

### IV.1.4 .2 Le dossier machine

Appartenant à chaque machine, il regroupe :

- Les renseignements propres à la machine (année de mise en service, configuration de fonctionnement, GRAFCET, GEMMA, modifications apportées, opérations spécifiques de réglage, travaux d'entretien, instructions de graissage, résultats de contrôles et visites etc.
- La trace écrite de toutes les opérations réalisées sur la machine (dépannages, réparations, révisions, graissages, améliorations, etc. ainsi que les temps passés, les coûts, les sorties de pièces ou de produits). Cette partie constitue le « dossier historique » ou plus simplement « l'historique ».

Ces renseignements pourront ensuite être exploités pour la gestion de la maintenance de façon à :

- Constituer une source d'informations précise et complète concernant chaque équipement.
- Stocker toutes les informations relatives aux pannes, aux opérations d'entretien.
- Améliorer la disponibilité de l'équipement.
- Adapter le stock de pièces de rechange ainsi que les procédures d'entretien à appliquer
- Optimiser la durée de vie des équipements et les coûts de maintenance.

Cette démarche est nécessaire pour dépasser le stade de l'entretien et progresser vers la maintenance.

### IV.1.4 .3 Déroulement type d'une intervention de maintenance

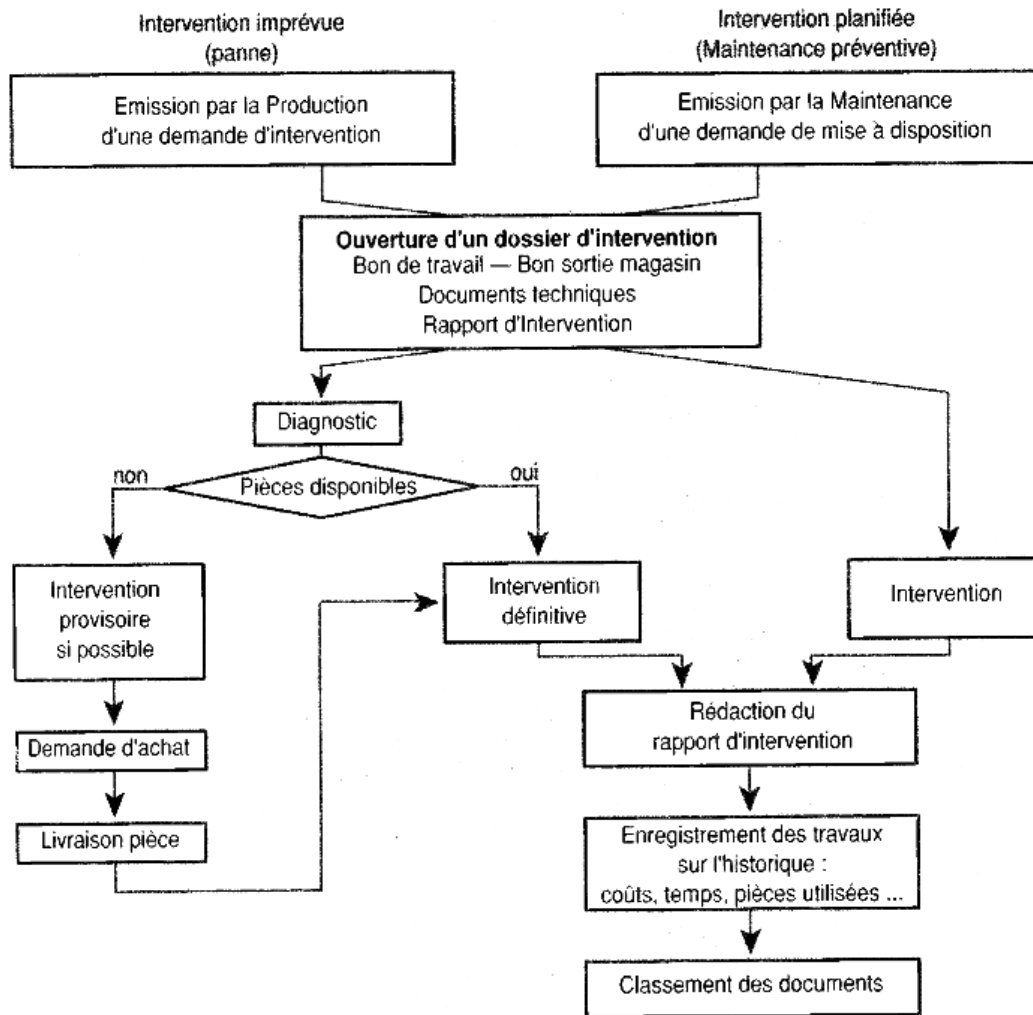


Figure IV.4 : Déroulement type d'une intervention de maintenance.

La volonté d'efficacité conduit à maîtriser des données nombreuses et complexes qui justifient le passage à la maintenance assistée par ordinateur (MAO). La maintenance est aussi concernée par la maîtrise de qualité symbolisée par l'objectif des cinq zéros :

- **zéro panne** : objectif naturel de la maintenance.
- **zéro défaut** : outil de production en parfait état (tout défaut entraîne un arrêt de production d'où augmentation des coûts et des délais).
- **zéro stock, zéro délai** : un outil de fabrication fiable permet une fabrication sans stock (flux tendu) et une livraison sans délai.
- **zéro papier** : il faut comprendre « zéro papier inutile », c'est à dire les papiers engendrés par les erreurs, les défauts, les défaillances, les retards qui viennent alourdir le travail et l'organisation.

### IV.2 L'entretien et la durée de vie d'une éolienne

Les éoliennes doivent être entretenues régulièrement. Le coût élevé nécessite l'intervention de sociétés spécialisées.

#### IV.2.1 L'entretien d'une mini éolienne

Le prix d'une éolienne domestique à usage privé dépend essentiellement du procédé de fabrication. Les constructeurs proposent aujourd'hui des modèles plus simples et plus abordables. Quel système électrique de mise en route du matériel souhaitez-vous ? Quels niveaux de sécurité votre installation possède pour éviter la surchauffe et les risques d'incendies en cas de mauvaise régulation de l'ensemble du système.

Plusieurs questions doivent être posées avant d'installer un mini éolien :

- Quelle stabilité avez-vous au sol ?
- Les pales résistent-elles aux vents violents ?
- Quelle est la solidité des matériaux ?
- Comment assembler les pièces en hauteur ?

Qui contacter ? Ces éléments sont à prendre en considération pour éviter la dégradation rapide du matériel. On estime la durée de vie d'un mini éolien à 5 années, sans compter les lourdes réparations concernant la maintenance. Inspecter votre éolienne après chaque tempête  
Tous les 6 mois, une révision de l'ensemble du matériel s'impose pour remplacer notamment certaines pièces Réparer une éolienne, c'est prévoir également les moyens d'accès aux différentes pièces en hauteur

#### IV.2.2 L'entretien des grandes éoliennes

Conçu pour durer 20 ans, le parc des éoliennes géantes demande des réparations importantes bien avant les 20 années écoulées. Ce constat est l'un des obstacles majeurs concernant la rentabilité du matériel... La plupart des éoliennes n'atteignent pas leur durée de vie prévue et sont laissées à l'abandon par leurs propriétaires.

Les nouvelles générations d'éoliennes, plus modernes et plus performantes sont équipées de systèmes mécaniques et électroniques très onéreux à entretenir. Le coût de l'entretien n'a pas été véritablement solutionné et restera sans doute un frein à l'investissement.

Les grandes éoliennes sont équipées de composants assez fragiles qu'il vous faudra surveiller en opération de maintenance :

- Les systèmes hydrauliques
- La génératrice

- Les multiplicateurs
- Les systèmes électroniques
- Les hélices et les pales

La sécurité des équipements passe également par l'installation de systèmes électroniques de détection des problèmes mécaniques.

### **IV.3 La maintenance des éoliennes**

L'entretien est coûteux en raison des normes de sécurité, des équipements nécessaires, de la main d'œuvre obligatoire d'intervention : par exemple : deux personnes doivent être sur le terrain pour des raisons de sécurité. Cette mesure est imposée par les règles de sécurité du travail en hauteur. L'intervention du matériel est onéreuse et encombrante également : Il faut prévoir le déplacement des grues ou des mats. L'entretien et le remplacement des pièces mécaniques obligent à souscrire un contrat annuel de maintenance.

### **IV.4 Les sociétés compétentes pour l'entretien des éoliennes**

L'intervention sur les mats, la réparation des pales et leur nettoyage, les interventions saisonnières : le déneigement des éléments, la suppression des insectes, des sels marins pour les éoliennes offshore (implantées en pleine mer). Des produits d'entretien sont utilisés et spécifiquement adaptés aux types de nettoyages à réaliser. Exemple : L'emploi d'une résine époxyde pour l'entretien des pales.

Une éolienne est conçue pour fonctionner 120 000 heures approximativement sur une durée moyenne estimée à 20 ans. Les éoliennes les plus récentes représentent environ 2% du prix de l'investissement total. Les composants touchés par l'usure sont les pales du rotor et le multiplicateur. Ces deux éléments vieillissent plus rapidement en raison de quasi ininteruption de fonctionnement mais aussi en raison de la puissance importante, électrique et mécanique requise.

Combien coûte un ensemble de pales, un multiplicateur et une génératrice d'éolienne ?

On estime que ces accessoires représentent 15 à 20% du prix initial d'une éolienne

### Conclusion générale

L'effort de ce travail s'inscrit dans le cadre de la maîtrise des technologies du système de l'éolienne. Dans un premier temps, nous avons présenté le système avec une description complète, surtout la partie du rotor, ensuite, nous avons procédé à les aspects mécaniques de l'éolienne et le calcul des pales du point de vue de la résistance des matériaux, tout cela entrant dans le cadre de l'étude du système. Dans le deuxième temps, nous avons présenté une généralité sur la maintenance industrielle, ensuite, la maintenance générale du système éolienne.

Cette étude nous rend plus efficace de travailler dans le domaine de recherche académique, puisque nous avons essayé de maîtriser l'une des technologies actuelles et la façon de la maintenir.

## Références bibliographiques

- [1] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2006.
- [2] 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).
- [3] ADINEOLE, "Visite guidée dans l'univers de l'énergie éolienne," Association danoise de l'industrie éolienne, 2002.
- [4] Cuntz, G., Éolienne et aérogénérateurs. Guide de l'énergie éolienne. Edisud ed. 2001.
- [5] D. L. Gourières, "Les éoliennes: Théorie, conception et calcul pratique," Editions du Moulin Cadiou, 2008.
- [6] G. Zwingelstein, La maintenance basée sur la fiabilité: Guide pratique d'application de la RCM, Hermès ed., 1996.
- [7] <http://www.windpower.org/fr/core.htrn>.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] M. Hadid, A. Guerrah, Z. Harara, and M. Debbache, "Caractérisation statique d'une tour d'éolienne d'une puissance de 1.6MW sous des conditions locales extrêmes de sollicitation," 2ème International Conference on Energy and Sustainable Development, 19-20 February 2013.
- [11] M. Olivier and M. Jérôme, "Etude bibliographique : éoliennes, effet Magnus et production électrique," Ecole des Mines de Douai, 2007.
- [12] P. GARIN, S. LOUBIER, G. GLEYSSES, J. PLATON, and D. L. Y. LUNET, "Les associations syndicales autorisées: bilan d'étude sur leur fonctionnement et leur stratégies de maintenance," Montpellier, France, Cemagref-Wp Ur Irrigation, à paraître, 2000.
- [13] P. Leconte, M. Rapin et E. Szechenyi, Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, Réf : BM 4 640.
- [14] R. Radia, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," Mémoire de Magistère, Université de Constantine, 2009.
- [15] S. Bachir and B. Amine, "Etude Technologique d'une Eolienne à axe Horizontal et l'Utilisation de la CAO dans sa Conception " Mémoire d'ingénieur d'état Université Mohamed Khider Biskra, 2010.

## Résumé

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le plus souvent cette énergie est elle-même transformée en énergie électrique. Les éoliennes produisant de l'électricité sont appelées aérogénérateurs, tandis que les éoliennes qui pompent directement de l'eau sont parfois dénommées éoliennes de pompage.

Notre étude s'intéresse à une partie du système l'éolienne, cette partie est rotor mobile. L'effort de ce travail s'inscrit à l'aspect mécanique du l'éolienne. Dans un premier temps, nous avons présenté le système l'éolienne avec une description complète, surtout rotor, ensuite, nous avons présenté l'aspect mécanique du l'éolienne. Dans le deuxième temps, nous avons présenté une généralité sur la maintenance industrielle, puis on étudie principalement maintenance de rotor.

**Mots clés :** éolienne, rotor, maintenance, pale, vent.

---

## ملخص

لقد اصبحت للطاقات المتجددة مكانة كبيرة في التكنولوجيا الحديثة، و هذا بسبب حاجة الانسان لمصادر جديدة لطاقات صديقة للبيئة، و من بين هذه الطاقات المتجددة الطاقة الهوائية التي يتم استغلالها عن طريق عنفة الرياح.

تركز دراستنا على جزء من جهاز عنفة الرياح ألا و هو الجزء ادوار. حيث أن المجهود في هذا العمل في اطار التحكم و اتقان تكنولوجيات أجهزة الطاقة الهوائية. في المرحلة الأولى، عرضنا الجهاز مع وصف كامل له، خاصة الجزء الدوار و العناصر المرتبطة به، ثم يليه، دراسة ميكانيكية للجزء المدروس من الجهاز من حيث الحركة و اقوى المؤثرة فيها، كذلك دراسة للأجنحة من ناحية مقاومة المواد . و في المرحلة الثانية، عرضنا عموميات حول الصيانة الصناعية، ثم ذكرنا بالخصوص صيانة جهاز عنفة الهوائية.

**كلمات مفتاحية :** عنفة الرياح، جزء دوار، صيانة، أجنحة، دراسة ميكانيكية.