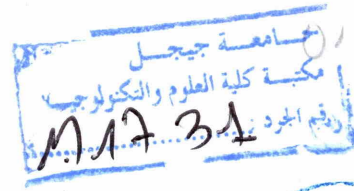
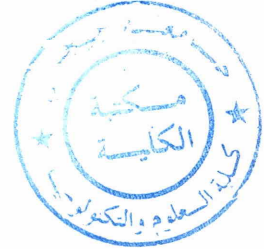


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université de Jijel



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE
En vue de l'obtention du diplôme de **Master en Electronique**
Option : **Energies renouvelables**

Thème :

**Etude du fonctionnement d'une éolienne à axe
horizontal.**

Encadré par :
Mr B. MEDJAHED

Réalisé par :
Remous Aissa

Promotion : Juin 2014

Remerciements

Avant tout nous remercions Allah le tout puissant qui nous a donné la force et la volonté pour qu'on puisse accomplir ce travail.

J'exprime toute ma gratitude à mon encadreur Monsieur B. MEDJAHED pour les conseils prodigués, sa disponibilité et surtout ses encouragements le long de la réalisation de ce travail.

Je n'oublie pas de remercier les enseignants du département d'électronique pour leurs savoirs qui m'ont donné durant mes études.

Mes remerciements vont aussi à ma famille et à mes amis pour leurs encouragements et leur soutien inestimable.

Merçi

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

*A mes chers parents à qui je dois tout ce travail
est le fruit de Leur amour, leurs encouragements
et sacrifices,*

Que Allah les gardes éternellement heureux.

*A toutes mes amies et toute personne qui ont
contribué à la réalisation de ce travail.*

Sommaire

Remerciments	i
dédicaces	ii
Sommaire.....	iii
Nomenclature	vii
Liste des tableaux et figures	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	1

Chapitre I : Généralité sur les éoliennes

<i>I.1. Introduction.....</i>	<i>3</i>
<i>I.2. Historique</i>	<i>3</i>
<i>I.3. Le vent.....</i>	<i>4</i>
<i>I.3.1. origine du vent.....</i>	<i>4</i>
<i>I.3.2. La mesure de la vitesse et de la direction du vent.....</i>	<i>4</i>
<i>I.4. Les différents types d'éoliennes.....</i>	<i>6</i>
<i>I.4.1. Eolienne à axe vertical.....</i>	<i>6</i>
<i>I.4.1.1. Savonius.....</i>	<i>7</i>
<i>a. Avantages.....</i>	<i>7</i>
<i>b. Inconvénients</i>	<i>7</i>
<i>I.4.1.2. Darrieus.....</i>	<i>7</i>
<i>a. Avantages.....</i>	<i>7</i>
<i>b. Inconvénients</i>	<i>7</i>
<i>I.4.2. Eolienne à axe horizontal.....</i>	<i>9</i>
<i>I.4.2.1. Les avantages de l'éolienne à axe horizontal.....</i>	<i>10</i>
<i>I.4.2.2. Les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale.....</i>	<i>10</i>
<i>I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne</i>	<i>11</i>
<i>I.5.1. La chaîne de transformation énergétique</i>	<i>11</i>
<i>I.6. Situation de L'énergie éolienne dans le monde</i>	<i>12</i>
<i>I.6.1. En Europe.....</i>	<i>12</i>
<i>I.6.2. En Amérique</i>	<i>13</i>
<i>I.6.3. En Asie.....</i>	<i>14</i>
<i>I.6.4. En Afrique</i>	<i>14</i>
<i>I.7. Aspect écologique de l'énergie éolienne.....</i>	<i>16</i>
<i>I.7.1. Destruction et la chute d'éléments composant l'éolienne.....</i>	<i>16</i>

<i>I.7.2. Le bruit</i>	17
<i>I.7.3. Risque pour les oiseaux</i>	17
<i>I.7.4. Impact visuel</i>	17
<i>I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne</i>	18
<i>I.8.1. les Avantages de l'énergie éolienne</i>	18
<i>I.8.2. Les inconvénients de l'énergie éolienne</i>	19
<i>I.9. Conclusion</i>	19

Chapitre II : les principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal

<i>II.1. Introduction</i>	20
<i>II.2. Les composants d'une éolienne à axe horizontal</i>	20
<i>II.2.1. Le rotor</i>	21
<i>II.2.1.1. Les rotors à vitesse fixe</i>	21
<i>II.2.1.2. Les rotors à vitesse variable</i>	21
<i>II.2.2. Les pales</i>	21
<i>II.2.2.1. La longueur des pales</i>	22
<i>II.2.2.2. La largeur (longueur de la corde du profil)</i>	22
<i>II.2.2.3. Le profil</i>	22
<i>II.2.2.4. Matériaux utilisés</i>	23
<i>a. Fibre de verre</i>	23
<i>b. Bois</i>	23
<i>c. Aluminium</i>	23
<i>II.2.2.5. Nombre de pale</i>	24
<i>a. Mono-pale</i>	24
<i>b. Bi-pales</i>	24
<i>c. Tri-pales</i>	24
<i>d. Multi-pales</i>	25
<i>II.2.3. La nacelle</i>	25
<i>II.2.4. Le mât</i>	25
<i>II.2.4.1. Rôle</i>	25
<i>II.2.4.2. Types</i>	26
<i>II.2.5. Génératrice</i>	26
<i>II.2.5.1. Principe de fonctionnement d'un générateur</i>	26
<i>II.2.5.2. Les différents types de générateurs</i>	27
<i>a. Le générateur à courant continu</i>	27

<i>b. Le générateur à courant alternatif</i>	27
1. <i>Génératrice synchrone</i>	27
2. <i>Génératrice asynchrone</i>	28
<i>II.2.6. Contrôleur électronique de l'éolienne</i>	28
<i>II.2.7. Multiplicateur</i>	29
<i>II.2.7.1. Principe</i>	29
<i>II.2.7.2. Fréquence de rotation</i>	30
<i>II.2.7.3. Rendement</i>	30
<i>II.2.8. Arbre lent</i>	30
<i>II.2.9. Arbre rapide</i>	30
<i>II.2.10. Le frein</i>	30
<i>II.2.11. Le système de refroidissement</i>	31
<i>II.2.12. Le système d'orientation de la nacelle</i>	31
<i>II.2.13. La fondation</i>	31
<i>II.2.14. Les outils de mesure du vent</i>	32
<i>II.2.14.1. Anémomètre</i>	32
<i>II.2.14.2. Girouette</i>	32
<i>II.2.15. armoire de couplage au réseau électrique</i>	33
<i>II.3. Conclusion</i>	33

Chapitre 3 : Aérodynamique d'un rotor d'éolienne

<i>III.1. Introduction</i>	34
<i>III.2. Énergie fournie par le vent</i>	34
<i>III.2.1. Énergie cinétique</i>	34
<i>III.2.2. La masse de l'air</i>	34
<i>III.2.3. L'énergie du vent</i>	34
<i>III.3. La limite de Betz</i>	35
<i>III.4. Caractérisations des éoliennes</i>	37
<i>III.4.1. le coefficient de puissance</i>	37
<i>III.4.2. La vitesse spécifique</i>	38
<i>III.5. Description d'un profil de la pale</i>	39
<i>III.6. Différents types de profils</i>	40
<i>III.6.1. Biconvexe symétrique</i>	40
<i>III.6.2. Biconvexe dissymétrique</i>	41
<i>III.6.3. Plan convexe</i>	41

<i>III.6.4. Creux</i>	41
<i>III.6.5. Double courbure</i>	41
<i>III.6.6. Supercritique</i>	42
<i>III.7. Aérodynamique de la pale</i>	42
<i>III.8. Présentation d'un rotor</i>	43
<i>III.9. L'élément de pale</i>	44
<i>III.10. Les forces aérodynamiques appliquées sur une pale</i>	45
<i>a. La portance</i>	46
<i>b. La traînée</i>	46
<i>c. Action aérodynamique</i>	46
<i>d. La force axiale et la force tangentielle</i>	47
<i>e. Couple aérodynamique</i>	47
<i>III.11. Organigramme</i>	48
<i>III.12. Conclusion</i>	50
CONCLUSION GENERALE	51
<i>Références Bibliographiques</i>	52

Nomenclature

m	Masse du volume d'air	[kg]
v	Vitesse instantanée du vent	[m/s]
E_c	Énergie cinétique	[J]
V	Volume d'air occupé	[m ³]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
P_{vent}	La puissance	[W]
p_0	La puissance idéale	[W]
V_0	La vitesse du vent	[m/s]
S	La surface d'air balayée par les pales	[m ²]
g	La gravité terrestre	[m/s ²]
Z	Le dénivelé vertical du conduit	[m]
P	La pression statique	[P]
v_1	La vitesse du vent avant le rotor	[m/s]
v_2	La vitesse du vent derrière le rotor	[m/s]
S_1	La surface d'air balayée avant le rotor	[m ²]
S_2	La surface d'air balayée derrière le rotor	[m ²]
F	La force exercée par le vent	[N]
Dm	Le débit massique	[kg/s]
r	Le rendement	
P_0	La puissance incidente du vent non perturbé	[W]
C_{Pmax}	Le coefficient de puissance	
λ	Vitesse spécifique	
R	Rayon de l'éolienne	[m]
Ω	La vitesse de rotation du rotor	[rad/s]
R_m	Le rayon de moyeu	[m]
ℓ	La corde	[m]
β_0	Le calage initial	[°]
N_p	Le nombre de pale	
V_r	Vitesse du vent résultant	[m/s]
V_0	Vitesse du vent incident	[m/s]
V_d	Vitesse du vent au déplacement de la pale	[m/s]
L	La force de portance	[N]

D	La force de traînée	[N]
dF_t	La force de poussée tangentielle	[N]
dF_a	La force de poussée axiale	[N]
B	Angle de calage	[°]
Φ	Angle d'incidence	[°]
α	Angle d'attaque	[°]
C_z	Coefficient de portance	
C_x	Coefficient de traînée	
T_t	Couple aérodynamique	[N.m]
C_T	Le coefficient de couple aérodynamique	

Liste des figures et tableaux

LISTE DES FIGURES

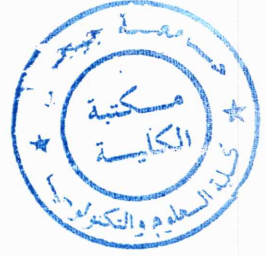
<i>Figure I.1 La direction du vent.</i>	6
<i>Figure I.2 La barbule.</i>	6
<i>Figure I.3 Eolienne verticale Savonius.</i>	7
<i>Figure I.4 Eolienne à axe vertical de type Darrieus.</i>	8
<i>Figure I.5 Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent.</i>	9
<i>Figure I.6 Schéma d'une éolienne à axe horizontal en aval et en amont.</i>	10
<i>Figure I.7 Schéma d'une éolienne.</i>	11
<i>Figure II.1 Les éléments de l'aérogénérateur.</i>	20
<i>Figure II.2. Le rotor.</i>	21
<i>Figure II.3 Profile NACA 4412</i>	23
<i>Figure II.4 Nacelle d'éolienne.</i>	25
<i>Figure II.5 Types de mât.</i>	26
<i>Figure II.6 Rotor et stator.</i>	27
<i>Figure II.7 Contrôleur d'éolienne.</i>	29
<i>Figure II.8 Multiplicateur de vitesse.</i>	29
<i>Figure II.9 Le dispositif d'orientation de l'éolienne.</i>	31
<i>Figure II.10 La fondation d'une éolienne.</i>	31
<i>Figure II.11 La girouette et l'anémomètre.</i>	32
<i>Figure II.12 L'anémomètre.</i>	32
<i>Figure II.13 La girouette.</i>	32
<i>Figure II.14 Armoire de couplage au pied d'une éolienne.</i>	33
<i>Figure III.1. Représentation du tube de courant</i>	35
<i>Figure III.2 Le rendement r en fonction de x</i>	37
<i>Figure III.3 Représentation des performances des différents types d'éolienne.</i>	38
<i>Figure III.4 Puissance en fonction de la vitesse spécifique</i>	39
<i>Figure III.5 Profil de la pale</i>	39

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

<i>Figure III.6 Le linge moyen, épaisseur et la corde</i>	40
<i>Figure III.7 L'angle d'incidence</i>	40
<i>Figure III.8 Profile biconvexe symétrique</i>	40
<i>Figure III.9 Profile biconvexe dissymétrique</i>	41
<i>Figure III.10 Profile plan convexe</i>	41
<i>Figure III.11 Profile creux</i>	41
<i>Figure III.12 Profile double courbure</i>	41
<i>Figure III.13 Profile supercritique</i>	42
<i>Figure III.14 La pale</i>	42
<i>Figure III.15 Présentation d'un rotor</i>	43
<i>Figure III.16 Un élément de pale au rayon local r et un anneau balayé par cet élément</i>	44
<i>Figure III.17 La pale divisée en éléments</i>	44
<i>Figure III.18 Diagramme des vitesses et des forces sur un profil aérodynamique</i>	45

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I.1 Echelle de beaufort</i>	5
<i>Tableau II.1 Coordonnées de profile NACA 4412</i>	23
<i>Tableau II.2 Comparatif les différents matériaux des pales d'éolienne</i>	24
<i>Tableau III.1 Caractéristiques aérodynamiques du profil NACA 4412</i>	48



Introduction générale

Introduction générale

Le soleil, l'eau, le vent, le bois et les autres produits végétaux sont autant de ressources naturelles capables de générer de l'énergie grâce aux technologies développées par les hommes. Leur relatif faible impact sur l'environnement en fait des énergies d'avenir face au problème de la gestion des déchets du nucléaire et aux émissions de gaz à effet de serre.

Les énergies renouvelables représentent par ailleurs une chance pour plus de 2 milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. Ces atouts, alliés à des technologies de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables mais de manière encore très inégale selon le type de ressources considérées. La consommation d'énergie ne cessant d'augmenter, il semble néanmoins peu probable que les énergies renouvelables remplacent les autres ressources énergétiques dans un avenir proche. Aussi est-il important que chacun de nous surveille au plus près sa propre consommation d'énergie [1].

Les énergies renouvelables sont inépuisables, propres et peuvent être utilisés de manière autogérée (puisqu'elles peuvent être utilisés dans le même lieu où elles sont produites). Elles présentent en outre l'avantage additionnel de se compléter entre elles. Par exemple, l'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité les jours dégagés (généralement avec peu de vent), tandis que dans les jours froids et venteux, avec des nuages, ce sont les aérogénérateurs qui prendront le relais et produiront la majorité de l'énergie électrique.

Une autre manière de produire de l'électricité proprement est l'utilisation de l'énergie du vent. Le dispositif capable d'effectuer cette conversion est appelé aérogénérateur ou générateur éolien, et consiste en un système mécanique de rotation, pourvu de pales comme les anciens moulins à vent, et d'un générateur électrique dont l'axe est solidaire au système moteur. Ainsi le vent, en faisant tourner les pales, fait aussi tourner le générateur électrique, qui peut être une dynamo ou un alternateur (l'alternateur présente l'avantage de fournir un plus grand rendement, de fournir de l'énergie à une vitesse plus petite, et d'apporter aussi de l'énergie à une vitesse supérieure) [2].

Dans ce projet, nous allons vous présenter notre exposé sur l'étude du fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal, Ce mémoire comprend trois chapitres :

- Le premier chapitre, on a donné des généralités sur les éoliennes et l'énergie éolienne , pour cela, on donne les différents types des éoliennes et leurs avantages et inconvénients, et la situation de la production mondiale.
- Le deuxième chapitre, nous allons vous présenter en détail les principaux éléments d'une éolienne à axe horizontal.
- Le troisième chapitre, présente une étude sur l'aérodynamique d'un rotor d'éolienne qui explique en brève la description d'un profil de la pale, et l'étude sur les forces aérodynamiques appliquées sur la pale d'une éolienne.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les éoliennes

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent.

I.2. Historique

L'idée d'exploiter l'énergie du vent date depuis l'antiquité, en effet des anciennes civilisations ont connu l'exploitation de l'énergie du vent (les perses, les égyptiens et les chinois). A partir du 12ème siècle, les moulins à vent firent leur première apparition en Europe et au cours des siècles qui suivirent, cette technologie se répandit à travers le monde. Ces moulins à vent (aéromoteurs) étaient économiquement rentables et ils ont contribué au développement économique de l'Europe par la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau, le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc....)

A partir du 19ème siècle ces applications commencent à perdre leur intérêt, cela est dû à l'évolution technologique qu'a connue l'Europe pendant la révolution industrielle.

Devant la montée de la combustion du charbon, l'éolien a en pratique disparu de la carte. Après le premier choc pétrolier, des efforts pour développer à nouveau l'énergie éolienne ont été consentis, et le monde occidental se mit une fois de plus à investir dans la ressource éolienne, cette fois-ci dans le but de produire de l'électricité.

Vers le début des années 1980, les budgets de recherche et développement accordé à cette énergie redécouverte ont littéralement explosé dans certains pays comme l'Allemagne, les Etats-Unis, le Danemark et l'Espagne.

Après une période de tâtonnement, il s'est révélé que la bonne stratégie consiste à augmenter progressivement la puissance des aérogénérateurs, en s'appuyant sur la création de marchés subventionnés donnant une base industrielle suffisante pour le développement de ce domaine.

En plus des investissements dans le domaine éolien, certains pays ont adopté une législation incitative visant à promouvoir ce secteur. Dans certains pays, ces mesures étaient assez efficaces pour faire naître une véritable industrie éolienne.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis des réductions de coûts, cette filière est aujourd'hui compétitive avec d'autres filières traditionnelles et occupe une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays [3].

I.3. Le vent

I.3.1. origine du vent

Le vent est un déplacement d'air horizontal dû à des différences de pression entre les points de la surface de la terre.

Le vent résulte de l'action de trois types de forces sur l'air en mouvement :

➤ **La force de gradient de pression**

Elle est due à la différence de pression entre les points de la surface de la terre. Elle entraîne l'air des hautes vers les basses pressions. Plus les différences de pression sont importantes et plus cette force est importante. En pratique lorsque l'on observe les isobares d'une carte météo, plus elles sont rapprochées et plus le vent est fort.

➤ **La force de coriolis**

Tout objet en mouvement dans l'hémisphère nord est dévié vers sa droite. (c'est le contraire dans l'hémisphère sud). Les particules d'air n'y font pas exception. Lors de son déplacement des hautes vers les basses pressions, l'air est dévié vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud.

➤ **Les forces de frottements**

Lors de son mouvement, l'air frotte contre les autres particules d'air et le sol. Cela entraîne des forces s'opposant à son mouvement. Elles ne le dévient pas mais le freinent [4].

I.3.2. La mesure de la vitesse et de la direction du vent

On décrit un vent par sa vitesse et sa direction.

➤ **Unités de mesure de la vitesse du vent**

La vitesse du vent peut être exprimée par différentes unités:

- Mètre par seconde (m/s)
- Kilomètre par heure (km/h)
- Nœud (Kt), Le nœud est une unité de mesure de la vitesse utilisée en navigation maritime et aérienne. Un nœud correspond à $1,852 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Il existe des modalités d'évaluer la vitesse du vent sans la mesurer vraiment. On utilise pour cela des échelles.

Une des échelles les plus souvent utilisées est celle de Beaufort, qui permet d'estimer la vitesse du vent selon ses effets sur l'environnement.

Degré de l'échelle	Appellation	Effets produits par le vent	Vitesse (km/h)	Vitesse (nœuds)
0	Calme	Calme, la fumée s'élève verticalement.	0 à 1	0 à 0,54
1	Brise très légère	La direction du vent est révélée par le sens de la fumée, mais non par la girouette.	1 à 5	0,54 à 2,7
2	Brise légère	On sent le vent sur la figure. La girouette est mise en mouvement. Les feuilles bougent.	5 à 11	2,7 à 5,9
3	Petite brise	Feuilles et petites branches constamment agitées. Le vent déploie les drapeaux légers.	11 à 19	5,9 à 10,2
4	Jolie brise	Soulève la poussière et les papiers, fait mouvoir les petites branches.	19 à 28	10,2 à 15
5	Bonne brise	Les arbustes en feuilles balancent. Des vaguelettes se forment sur les lacs ou étangs.	28 à 38	15 à 20,5
6	Vent frais	Les grandes branches bougent. Les fils électriques bougent. L'usage des parapluies devient difficile.	38 à 50	20,5 à 27
7	Grand vent	Les arbres entiers sont agités. Il est pénible de marcher contre le vent.	50 à 61	27 à 33
8	Coup de vent	Brise les petites branches des arbres.	62 à 74	33 à 40
9	Fort coup de vent	Domages aux constructions légères, cheminées et tuiles emportées.	75 à 88	40 à 47,5
10	Tempête	Arbres déracinés. Graves dégâts aux constructions.	89 à 102	47,5 à 55
11	Violente tempête	Ravages étendus.	103 à 117	55 à 63
12	Ouragan	Destructions considérables.	118 et plus	63 et plus

Tableau I.1 : échelle de beaufort.

➤ La direction du vent

La direction du vent est toujours donnée par la direction d'origine. On parlera par exemple d'un vent du nord lorsque le vent souffle du nord vers le sud.

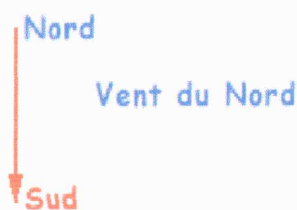


Figure I.1 : la direction du vent.

➤ Lire la vitesse et la direction du vent sur une carte

Sur une carte météorologique, les météorologues utilisent un symbole pour représenter à la fois la vitesse et la direction du vent. Ce symbole est la barbule.



Figure I.2 : la barbule.

La tête de la barbule pointe dans la direction d'où vient le vent. Sur l'image, le vent souffle donc de l'ouest vers l'est. C'est un vent d'ouest.

La vitesse du vent est donnée par le nombre de barres et / ou de drapeaux attachés à la barbule :

- 1 drapeau = 50 nœuds
- 1 longue barre = 10 nœuds
- 1 petite barre = 5 nœuds

Pour trouver la vitesse du vent, il suffit donc d'additionner la valeur de toutes les barres et des drapeaux attachés à la barbule [5].

I.4. Les différents types d'éoliennes

Il existe deux grands types d'éoliennes, caractérisées par la position de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent :

- Les éoliennes à axe vertical
- Les éoliennes à axe horizontal.

I.4.1. Eolienne à axe vertical

Elles présentent un axe vertical et peuvent se passer d'un système d'orientation étant donné qu'elles captent tous les vents, quelle que soit leur direction. Elles résistent bien aux vents turbulents mais produisent moins d'énergie que les éoliennes à axe horizontal. On en distingue deux types :

- Savonius
- Darrieus

I.4.1.1. Savonius

Elle a été inventée par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1924 et a été brevetée en 1929, Constituées de demi-cylindres reliés à un axe vertical, ce type d'éolienne utilise la force de traînée du vent, sur le principe des moulins à vent. Son rendement est plus faible que celui des éoliennes qui utilisent la force de portance, mais ce type de machine permet d'exploiter des vitesses de vent plus faibles [6].



Figure I.3 : Éolienne verticale Savonius.

a. Avantages

- esthétique et la possibilité de l'installer sur une toiture
- fonctionne même avec un vent faible (contrairement au système Darrieus), quelle que soit sa direction
- émet peu de bruit

b. Inconvénients

- faible rendement
- Masse non négligeable
- Couple non constant

I.4.1.2. Darrieus

Les rotors Darrieus (du nom d'un ingénieur français), qui ont fait l'objet d'un brevet français en 1925, utilisent la portance des pales subie par un profil soumis à l'action d'un vent relatif (plusieurs configurations possibles 2,3... pales de profile symétrique biconvexe) effet qui s'exerce sur l'aile d'un avion. Ils sont caractérisés par un faible couple de démarrage et une vitesse de rotation élevée, donc une grande puissance récupérable. Pour améliorer le couple de démarrage on les associe à un autre type de rotor (Savonius par

exemple), ce qui en diminue les autres propriétés (légereté, vitesse maximum, coût...). Malgré ces avantages, ces machines restent difficiles à maîtriser.

On distingue plusieurs déclinaisons autour de ce principe :

- simple rotor cylindrique c'est deux profils disposés de part et d'autre de l'axe rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical.
- rotor hélicoïdale
- rotor Darrieus H
- statoéolienne c'est un stator fixe qui canalise de manière optimale le vent sur un rotor mobile

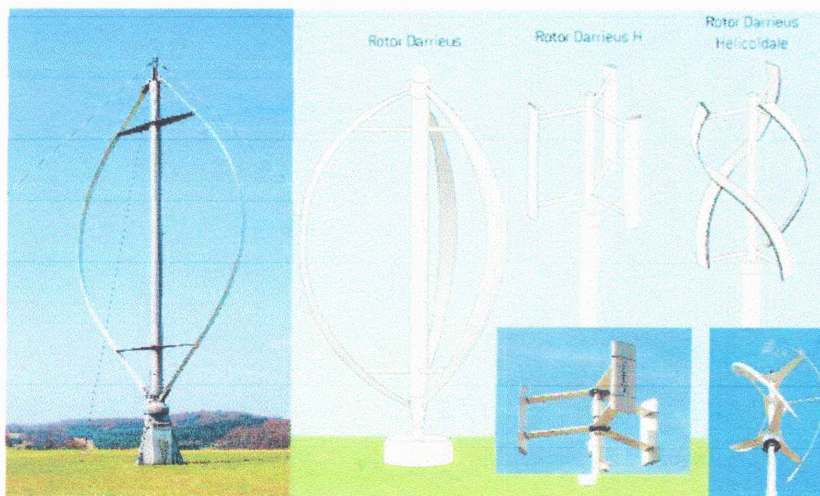


Figure I.4 : Eolienne à axe vertical de type Darrieus.

a. Avantages

- peut être installée dans des zones très venteuses (peut subir des vents dépassant les 220 km/h)
- émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale
- occupe moins de place
- son générateur peut ne pas être installé en haut de l'éolienne, au centre des rotors, mais en bas de celle-ci. Ainsi plus accessible, il peut être vérifié et entretenu plus facilement
- émet peu de bruit

b. Inconvénients

- faible rendement
- démarrage difficile dû au poids du rotor sur le stator

I.4.2. Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.

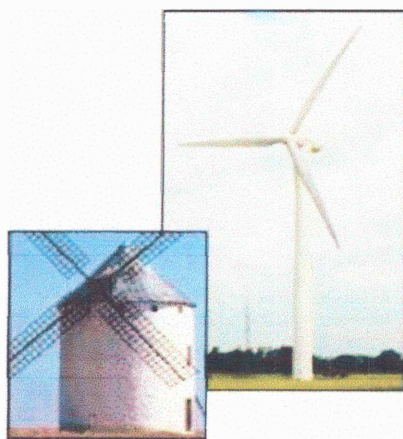


Figure I.5 : Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

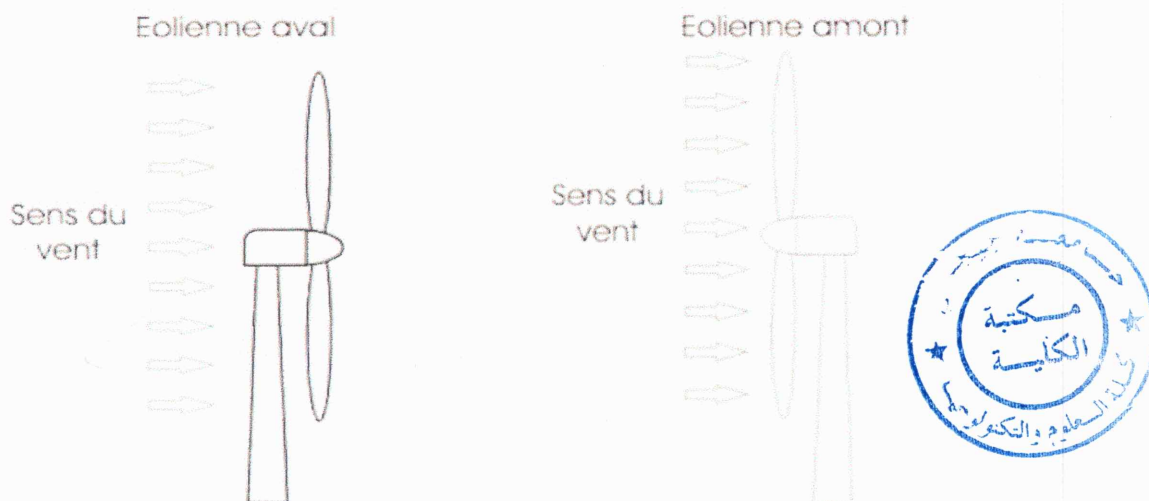


Figure I.6 : Schéma d'une éolienne à axe horizontal aval et amont.

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

Aujourd'hui, l'éolienne à axe horizontal avec un rotor du type hélice, présente un réel intérêt pour la production d'électricité à grande échelle [7].

I.4.2.1. Les avantages de l'éolienne à axe horizontal

- Le premier avantage de l'éolienne horizontale pour particulier est son rendement. En effet, elle capte au maximum son énergie, car elle s'oriente d'elle-même pour s'adapter à la direction du vent.
- Ensuite, ce type d'éolienne pour particulier étant plus répandu, trouver un vendeur ou un installateur est plus aisé.

I.4.2.2. Les inconvénients de l'éolienne à axe horizontale

L'éolienne à axe horizontal possède quelques inconvénients non négligeables :

- Moins résistante aux vents forts que l'éolienne verticale, l'éolienne horizontale doit être renforcée. Ainsi, dans les régions où le risque de vents violents existe, on a

recours à des mâts haubanés (l'ancrage est renforcé), et on installe un frein au niveau du rotor.

- Du reste, l'éolienne pour particulier horizontale met plus de temps à se déclencher qu'une éolienne verticale. En effet, elle doit s'orienter par rapport à la direction du vent, ce qui retarde d'autant son déclenchement.
- Enfin, l'installation est bruyante [8].

I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne

La fabrication d'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. De nombreuses étapes sont nécessaires à cette transformation, qui fait appel à des technologies très diverses.

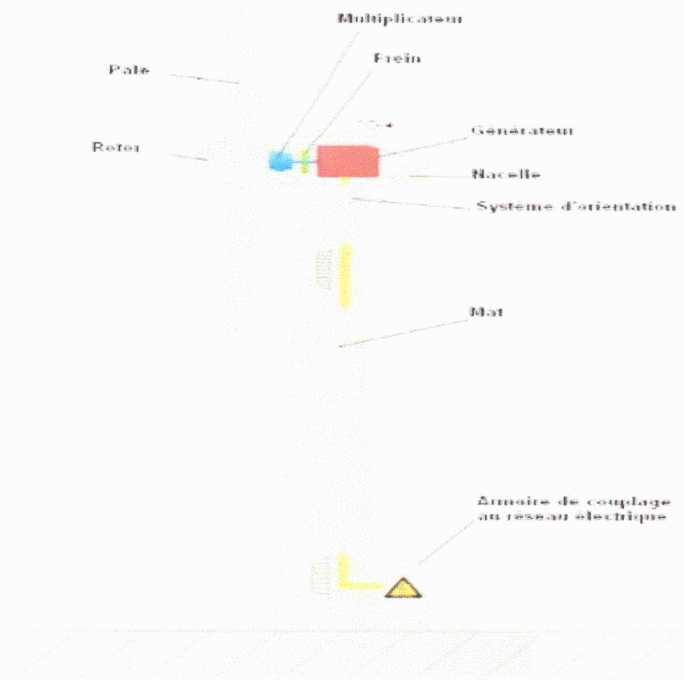


Figure I.7 : Schéma d'une éolienne.

I.5.1. La chaîne de transformation énergétique

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes :

➤ La transformation de l'énergie par les pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion, la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

➤ **L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur**

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

➤ **La production d'électricité par le générateur**

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité.

➤ **Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur**

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20 000 Volts par un transformateur.

L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches [9].

I.6. Situation de L'énergie éolienne dans le monde

La situation de l'énergie éolienne dans les différentes régions du monde selon l'année 2010 peut être récapitulée comme suit :

I.6.1. En Europe

➤ **Allemagne**

L'Allemagne, est le premier pays au monde dans ce domaine et qui possède la plus grande capacité installée (18.400 MW), et obtient maintenant 6 pour cent de son électricité de l'énergie du vent. Ce chiffre devrait passer à 20% d'ici 2020.

Selon l'Union fédérale de l'énergie éolienne (BWE), les exportations allemandes de turbines éoliennes ont augmenté de 55% en 2005 par rapport à 2004.

En Allemagne, l'éolien a permis de réduire les émissions de CO₂ de 24,6 millions de tonnes.

La R&D dans le domaine de l'énergie éolienne est particulièrement développée, l'Allemagne dispose actuellement de plusieurs Centres de recherche spécialisés.

➤ **Espagne**

L'Espagne, occupe la deuxième place avec plus de 10.000 mégawatts de capacité, elle obtient 8 % de son électricité du vent.

Au courant des dernières années, l'industrie éolienne espagnole a connu une croissance remarquable, en combinant des efforts dans le domaine de transfert technologique et achat de licence avec la recherche et développement locale.

Les entreprises espagnoles Gamesa et Ecotecnia développent actuellement un grand projet de recherche industriel subventionné par le Gouvernement et dont l'objectif principal est de maintenir l'Espagne à l'avant-garde de la technologie éolienne.

Windlider 2015 est un grand projet de fabrication de nouvelles machines de grande puissance pour dominer le marché éolien à partir de 2015.

➤ **Danemark**

Le Danemark est classé cinquième dans le monde en matière de puissance installée (3.100 mégawatts), mais occupe la première place mondiale dans un classement relatif par rapport à sa production en énergie électrique, car 20% son besoin d'électricité est assuré par les aérogénérateurs. Le Danemark est aussi le leader mondial dans installations éoliennes offshore, avec 400 mégawatts de capacité existante.

Mondialement, plus de 900 mégawatts de puissance éolienne offshore seraient installée vers la fin de 2006, entièrement en Europe.

Grâce à une stratégie claire et efficace, le Danemark ce petit pays scandinave, est devenu aujourd'hui le géant mondial de l'industrie éolienne, occupant 60% du marché mondial.

Le chiffre d'affaire global danois, concernant l'industrie éolienne, est de 3 Milliards d'Euros par année. Cinq des dix plus grandes firmes mondiales, productrices de turbines éoliennes, sont danoise.

I.6.2. En Amérique

➤ **Les Etats-Unis**

Les Etats-Unis a installé une puissance éolienne d'une capacité de 9.100 mégawatts. L'industrie éolienne américaine a battu un record en installant en 2005 une puissance éolienne de 2.400 mégawatts comparée à 370 mégawatts installée en 2004 et 1.700 mégawatts en 2003 (voir Table 1.2). Cette augmentation inattendue est due principalement à des mesures fiscales incitatives.

➤ **Canada**

Au Canada la capacité éolienne installée est de 680 mégawatts à la fin de 2005, elle est supposée augmenter à 1.200 mégawatts vers la fin de 2006. Le gouvernement fédéral de Canada vise l'installation de 4000 mégawatts d'énergie du vent vers 2010.

I.6.3. En Asie

Les pays asiatiques ont installé une puissance éolienne d'environ 7000 mégawatts pour produire de l'électricité. L'Inde avec 4400 mégawatts de capacité, est classé quatrième après l'Allemagne, les États-Unis, et l'Espagne. En Chine, la puissance installée actuellement est de 1260 mégawatts, et commence à se développer grâce à sa nouvelle loi sur les énergies renouvelables. Cette loi offre des incitations fiscales et des subventions à l'industrie éolienne et cible le développement de 30.000 mégawatts de puissance éolienne vers l'an 2010.

I.6.4. En Afrique

Le Maroc, la Tunisie, l'Algérie, l'Égypte, le Sénégal et la Mauritanie, étudient de près ou réalisent déjà des projets éoliens.

➤ L'Algérie

Les réalisations dans le domaine des énergies renouvelables, et particulièrement dans la filière éolienne, sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés.

L'utilisation de cette source d'énergie se limite aux éoliennes installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau. Pour les futures réalisations, un projet d'une ferme éolienne à Tindouf d'une puissance de 10 MW a fait récemment l'objet d'un appel d'offres. Ce projet hybride combine le diesel et l'énergie éolienne pour la production de l'électricité (dont 6 MW en éolienne et 4 MW en diesel). Trois autres projets de centrales éoliennes de 10 MW chacune seront lancés dans le sud du pays.

Ces projets s'inscrivent dans un programme de développement des énergies renouvelables, adopté par la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG).

L'objectif est de porter la part des énergies renouvelables dans le bilan électrique national à 5 ou 6 % vers l'horizon 2010-2015. Ce chiffre paraît ambitieux si l'on considère le taux actuel, qui ne représente que 0,02%, soit l'équivalent de moins de 5 GWh. Ce taux est très faible, même par rapport aux pays voisins.

Le recours aux énergies renouvelables est indispensable pour tout développement durable, en particulier dans le sud algérien, car la dispersion de la population dans cette région très vaste, rend le raccordement au réseau électrique très coûteux.

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année.

La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations à cause de l'augmentation de cette demande.

Il est évident que les hydrocarbures ne représentent pas une solution à long terme et que le potentiel de l'énergie éolienne ouvre une voie vers une solution sûre et respectueuse de l'environnement, particulièrement après que les études ont montré l'existence d'un gisement éolien important dans certaines régions du pays.

- **Le Maroc**

Pour réduire sa dépendance énergétique, le Maroc s'est orienté entre autres vers le développement des sources d'énergies renouvelables notamment l'énergie éolienne. En effet, le Maroc, par sa situation géographique favorable, dispose d'un potentiel éolien important estimé à environ 6 000 MW.

Le Maroc a réalisé en collaboration avec des entreprises européennes plusieurs projets éoliens. Parmi eux le parc éolien de A.Torres près de Tétouan qui contient 84 éoliennes avec une puissance totale de 50,4 MW destinées à couvrir la consommation de 400.000 habitants et le projet de Cap Sim Essaouira, dont la production est de 60 MW, qui est opérationnel depuis le début 2006.

Un autre projet à Tanger sera achevé, au courant de l'année 2007, et permettrait la production de 140 MW.

ONE (l'office national de l'électricité marocain) et l'entreprise espagnole Iberdrola ont signé un accord pour développer de nouvelles fermes éoliennes au Maroc.

Pour l'heure actuelle, c'est le Maroc qui assure la production la plus importante d'énergie éolienne en Afrique.

- **La Tunisie**

Le premier site d'éolien a été réalisé en 2000 à Sidi Daoud, au Cap Bon, avec une capacité de 8,7 mégawatts (MW). Une extension de ce site permettra selon les spécialistes d'atteindre, en 2007, la puissance de 34 MW.

La réalisation de trois nouvelles fermes éoliennes est prévue entre 2008 et 2009. Ce projet aura une capacité totale de 120 MW et permettra une économie de 134.000 Tep (tonnes équivalent pétrole), épargnant par la même, l'émission de 330.000 tonnes de gaz polluants. Suite à cette réalisation la Tunisie occupera le deuxième rang en Afrique avec une puissance totale installée de 180 MW [10].

I.7. Aspect écologique de l'énergie éolienne

L'approvisionnement énergétique est sans aucun doute l'un des enjeux majeurs du 21^{ème} siècle. En effet, les sources d'énergie actuellement utilisées présentent de grands risques environnementaux et sociaux. Le nucléaire a montré ses limites et ses dangers et l'utilisation des combustibles fossiles entraîne des changements climatiques. Seul un développement rapide des énergies renouvelables peut nous permettre de relever le défi.

À la suite de la conférence de Kyoto en décembre 1997, la majorité des pays ont décidé de réduire leurs émissions de gaz responsables de l'augmentation de l'effet de serre. Cette décision devrait aboutir à une diminution de la consommation en énergie fossile (pétrole, gaz naturel, charbon...) au profit des énergies renouvelables, dont fait partie l'éolien.

L'énergie éolienne, qui est devenue actuellement économiquement rentable, a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets. Enfin les aérogénérateurs en fin de vie peuvent être recyclés aisément et le site peut être remis à l'état naturel ou agricole sans dépenses notables.

Si l'énergie éolienne est considérée comme l'une des sources les plus propres, cette énergie comporte encore des risques mineurs sur l'environnement.

Parmi les aspects négatifs de l'énergie éolienne sur l'environnement, on peut citer :

I.7.1. Destruction et la chute d'éléments composant l'éolienne

Les risques potentiels d'accident concernent, par ordre de probabilité, le bris de pales et la chute de la tour. Lors de la construction d'éoliennes, la résistance à la fatigue des matériaux ainsi que le comportement dynamique de la structure dans sa globalité sont étudiés avec soins. Les constructeurs conçoivent leurs éoliennes pour résister à des conditions météorologiques extrêmes (vents fort, rafales etc..).

Les composants soumis à des flexions répétées, comme les pales, peuvent développer des faiblesses structurelles si elles ont été mal conçues ou fabriquées.

Si la chute d'une tour est tout à fait rare, la rupture de pales est statistiquement plus importante. Ce fut notamment le cas avec les premières machines installées au début des années 80 équipées de pales métalliques. La mauvaise tenue à la fatigue du métal pouvait engendrer des fissures. Les pales sont aujourd'hui fabriquées en majorité avec des matériaux composites qui ont l'avantage d'être légers et extrêmement résistants.

Malgré ces précautions, il peut arriver qu'une pale soit endommagée ce qui déclenche les systèmes automatiques d'arrêt d'urgence de la machine. Le cas d'un bris de pale et de projection de morceaux reste extrêmement limité selon les statistiques européennes.

I.7.2. Le bruit

La nuisance causée par le bruit de la turbine est l'une des limitations principales de placer un site éolien près des régions habitées.

C'est en Europe, où la densité de population est forte, qu'est née cette préoccupation. Les fabricants ont maintenant considérablement réduit cette nuisance potentielle en améliorant l'aérodynamisme et en trouvant des moyens pour réduire le bruit des engrenages dans la nacelle.

Le niveau acceptable des émissions de bruit dépend fortement de la réglementation locale. L'une des réglementations les plus strictes en la matière est celle de la Hollande où le niveau maximal toléré à côté des résidences est de 40 db.

En Europe la distance typique entre l'aérogénérateur et la maison la plus proche est de 150 à 200 mètres.

I.7.3. Risque pour les oiseaux

Des études scientifiques ont démontré que la plupart des oiseaux identifient et évitent l'hélice qui tourne. Les aigles, et probablement d'autres oiseaux de proie, semblent moins vigilants lorsqu'ils chassent et certains ont été frappés par les pales en mouvement. Enfin, les oiseaux affectionnent se poser sur les structures métalliques, comme les mâts en treillis. Ces derniers ne sont plus utilisés que pour les petites éoliennes domestiques. Les grandes tours blanches cylindriques empêchent les oiseaux de s'y installer et les éoliennes modernes comportent ainsi beaucoup moins de risques pour eux.

Il est néanmoins essentiel de s'assurer que le lieu d'un projet d'implantation d'éoliennes ne se situe pas dans un couloir de migration d'oiseaux, ni à proximité d'un site de reproduction.

I.7.4. Impact visuel

C'est la critique la plus fréquemment rencontrée. Il est vrai qu'avec ses 60 mètres de haut, une éolienne est facilement visible, d'autant plus que les parcs se situent en général sur des crêtes ou des sommets de colline.

La couleur blanche peut apparaître comme un choix peu judicieux mais c'est cependant celle qui se remarque le moins lorsque les éoliennes sont vues en contre-plongée avec le ciel en arrière-plan. Impossible à éliminer, l'impact visuel peut cependant être minimisé par des efforts de design des éoliennes et par le respect de certaines règles comme l'enfouissement

des lignes à haute tension et l'utilisation de tour tubulaire plutôt qu'en treillis (type pylône électrique à haute tension) [11].

I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.8.1. les Avantages de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.
- Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie: le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- Les éoliennes permettent grâce à la taxe professionnelle de participer au développement local des communes avec une contribution annuelle de l'ordre de

10 000 € par MW d'énergie éolienne produite (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées par les installations d'éoliennes).

- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
- Le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication.
- un crédit d'impôt en 2014 de 15 % (possibilité de 25 % avec un bouquet de travaux (2 réalisations de travaux éligibles au crédit d'impôt en même temps).
- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original [12].

I.8.2. Les inconvénients de l'énergie éolienne

- Le vent est une source intermittente, la production d'énergie est donc variable.
- L'installation d'une éolienne nécessite différents critères (vents fréquents, surface suffisante, pas d'obstacles au vent, accès facile, proximité du réseau électrique, pas de contraintes environnementales tels que les monuments historiques, site éloigné des habitations, avoir les autorisations réglementaires).
- Même si la surface utilisée au sol est faible, il faut disposer de 10 Ha afin d'installer un site éolien qui soit significatif. En effet, l'écart réglementaire entre les éoliennes est de 200m minimum.
- La pollution visuelle et sonore, et la perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige une installation des éoliennes éloignée des habitations.
- Le coût de production alourdit tout de même le prix total de l'éolienne.
- Bien que cette énergie soit propre, le coût énergétique de fabrication est très important.
- Bien que les éoliennes offshore soient un important atout, l'installation des éoliennes doit se faire relativement proche des côtes (10 km environ) du fait de la perte d'énergie dans les conduits électriques [13].

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble à découvrir les éoliennes, pour cela, nous présentons Les différents types d'éoliennes et fonctionnement pour la production d'énergie électrique, ainsi que la situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde et les aspects écologiques, et aussi leur avantages et les inconvénients.

Chapitre II
les principaux éléments d'une éolienne à axe
horizontal

II.1. Introduction

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.

II.2. Les composants d'une éolienne à axe horizontal

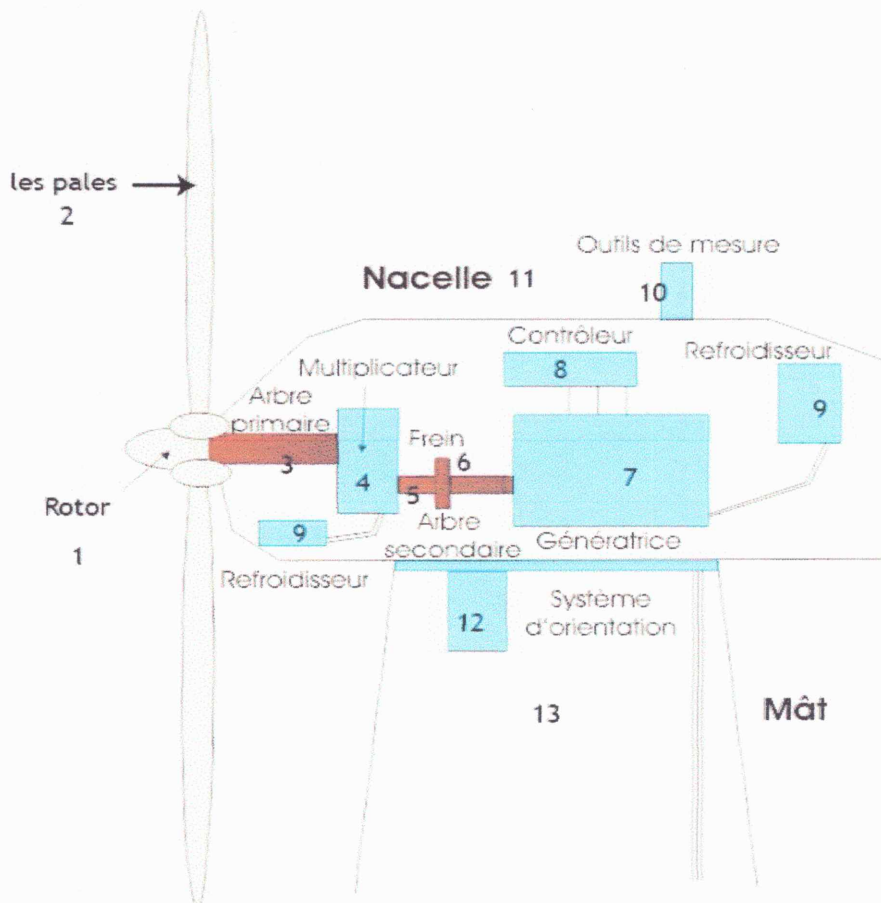


Figure II.1 : les éléments de l'aérogénérateur.

Une éolienne se compose des éléments suivants :

- | | |
|------------------------------------|---------------------------|
| 1. Le rotor | 8. Contrôleur |
| 2. Les pales | 9. Refroidisseur |
| 3. Arbre primaire (arbre lent) | 10. Outils de mesure |
| 4. Multiplicateur | 11. Nacelle |
| 5. Arbre secondaire (arbre rapide) | 12. Système d'orientation |
| 6. Frein | 13. Le mât |
| 7. Génératrice | |

II.2.1. Le rotor

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, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [14].

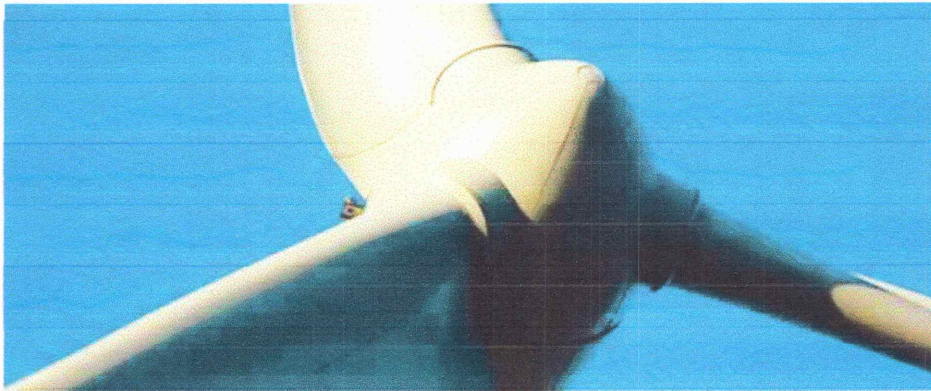


Figure II.2 : le rotor.

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable :

II.2.1.1. Les rotors à vitesse fixe

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance.

Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

II.2.1.2. Les rotors à vitesse variable

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié.
Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique) [15].

II.2.2. Les pales

Les pales sont une partie très importante de l'éolienne, le rendement, le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine dépendront de leur conception. Lorsqu'elles sont assemblées on parle de Rotor. différentes matières peuvent constituer les pales.

Les pales des petites éoliennes sont souvent en bois, en aluminium ou en fibre de verre. Les grandes éoliennes qui possèdent des pales de longueur de 30 à 40 mètres sont réalisées en fibre de verre ou en fibre de carbone. Très peu de fabricants dans le monde sont capables de construire ces pales de cette taille [16].

Les pales sont caractérisées par :

- la longueur
- la largeur
- le profil
- les matériaux de construction
- le nombre

II.2.2.1. La longueur des pales

La longueur des pales est la caractéristique la plus importante car elle définit la puissance récupérable. La longueur contrainte aussi l'aérogénérateur car plus les pales sont longues plus la fréquence de rotation maximum est petite. Cette limite est due à des phénomènes qui se passent en bout de pale et est dû à la force centrifuge. Le fait de ne pas tenir compte de cette caractéristique est susceptible de détruire la pale si on dépasse par exemple la vitesse du son en bout de pale.

II.2.2.2. La largeur (longueur de la corde du profil)

La largeur des pales n'a pas d'influence sur la puissance de l'aérogénérateur (qui est fonction de la surface balayée), mais elle influence le couple de démarrage (plus la pale sera large et plus le couple de démarrage sera bon). Cependant si l'on veut obtenir des vitesses de rotation élevées on utilisera plutôt des pales fines et légères.

II.2.2.3. Le profil

Le profil aérodynamique d'une pale correspond à la forme que possède la pale vue en coupe. Il est nécessaire de choisir le profil en fonction du couple désiré. Contrairement aux aérogénérateurs de grande puissance (> 100 kW), pour la grande majorité des aérogénérateurs de faible et moyenne puissance les pales ne sont pas vrillées (voir étude théorique action du vent sur les pales), l'angle d'incidence est donc optimal seulement sur une partie de la pale.

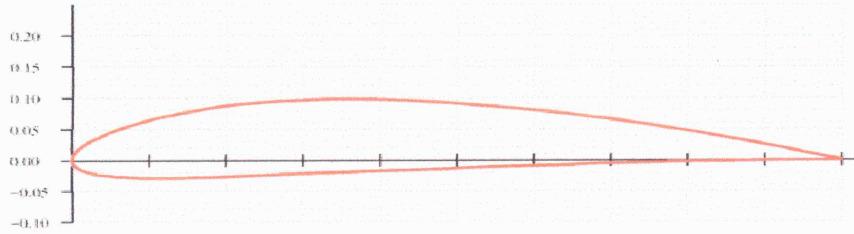


Figure II.3 : Profil NACA 4412.

X (station en %)	0	1,25	2,5	5,0	7,5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	95	100
y1 position haut (extrados) +	0	2,44	3,39	4,73	5,76	6,59	7,39	8,00	9,41	9,76	9,80	9,19	8,14	6,69	4,89	2,71	1,47	0
y2 position bas (intrados) -	0	1,43	1,95	2,49	2,74	2,86	2,88	2,74	2,50	2,26	1,80	1,40	1,00	0,65	0,39	0,22	0,16	0

Tableau II.1 : coordonnées de profile NACA 4412.

II.2.2.4. Matériaux utilisés

Il existe 3 principaux matériaux pour les pales d'éolienne :

a. Fibre de verre

Matériau le plus efficace. En effet, il est résistant et léger. Mais, le bois reste plus simple à mettre en œuvre et moins onéreux. Construire une pale en fibre de verre implique une certaine technicité, à commencer par la création d'un moule dans lequel elle sera coulée.

b. Bois

Une bonne alternative, car il est plus simple à mettre en œuvre. Par contre, si vous optez pour le bois, la vigilance est de mise. En effet, le bois est plus sensible à l'humidité et plus fragile s'il présente des défauts. Ainsi, pour des pales en bois, il faut :

- choisir une essence adaptée,
- un bois sec,
- un bois sans nœuds,
- un bois sans fissure.

c. Aluminium

Une bonne solidité ainsi qu'une longévité très appréciable. Mais, tout comme la fibre de verre, il est techniquement difficile à utiliser et nécessite un outillage adapté.

MATÉRIAU	FIBRE DE VERRE	BOIS	ALUMINIUM
RÉSISTANCE	Bonne résistance aux intempéries	Moyenne. Demande un traitement régulier	Très bonne résistance
POIDS	Léger	Léger (selon l'essence)	Léger si utilisé sous forme de tôles fines
SENSIBILITÉ À L'HUMIDITÉ	Imputrescible	Résistance à l'humidité limitée	Imputrescible
FACILITÉ DE MISE EN ŒUVRE	Difficile, nécessité de réaliser un moule, temps de séchage.	Facile	Très difficile. Demande un outillage et une technique adaptés.
LONGÉVITÉ	Bonne longévité	Moyenne	Bonne longévité
PRIX	Élevé	Peu élevé	Très élevé

Tableau II.2 : Comparatif les différents matériaux des pales d'éolienne.

II.2.2.5. Nombre de pale

a. Mono-pale

Très rarement utilisée du au contrepoids nécessaire et un équilibrage difficile. Une société italienne construisait de telles unités.

b. Bi-pales

Le plus courant pour les petites unités est sa facilité de mise en œuvre à la portée de tous, ou presque. La particularité des hélices bi-pales est de tourner généralement très vite. Leur inconvénient est que le couple de démarrage est souvent très faible sans astuces de variation du pas (angle d'attaque).

c. Tri-pales

Une hélice tri-pales semble offrir le meilleur des deux mondes. Couple nettement plus élevé au démarrage et vitesse de rotation proche des bi-pales. Cette vitesse de rotation est inférieure d'environ moins 4 % par rapport à une hélice bi-pales de même diamètre. Le couple est plus élevé, avantage non négligeable lors de vents relativement faibles.

d. Multi-pales

Il y a des unités comportant de 4 à 6 pales sur des sites où les vents sont particulièrement faibles ou, lorsque le couple nécessaire est plus important que la vitesse de rotation. L'approche des moulins de pompage multi-aubes est caractéristique de ces engins où un couple important est nécessaire au détriment de la vitesse de rotation qui est très faible (environ 50 à 75 tour par minute max) [17].

II.2.3. La nacelle

La nacelle est le moteur de l'éolienne. C'est à l'intérieur de cet équipement que se trouve le générateur d'électricité qui permet de convertir l'énergie produite par le mouvement de l'hélice en électricité et le reste de la machinerie qui dirige les pales en fonction de la force du vent (frein, suivi du vent, mise au repos).



Figure II.4 : Nacelle d'éolienne.

La nacelle supervise ainsi l'éolienne qui peut être arrêtée dès que le vent n'est pas suffisant ou au contraire trop puissant ou dans tout autre cas qui pourrait poser problème. Les systèmes de supervision et de contrôle sont très performants [18].

II.2.4. Le mât

II.2.4.1. Rôle

Le mât est plus ou moins imposant selon la force de l'éolienne et est conçu en métal afin d'apporter solidité à l'ensemble. Il supporte les principaux éléments de l'éolienne : la nacelle et le rotor. Certains mâts peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres en hauteur : plus le rotor est haut et plus le rendement de l'éolienne sera bon, les hélices n'étant plus gênées par aucun obstacle. Un mât solide permet une plus grande longueur de pale.

II.2.4.2. Types

Il y a en quelques types:

Mât haubané, tour en treillis et tour tubulaire [19].

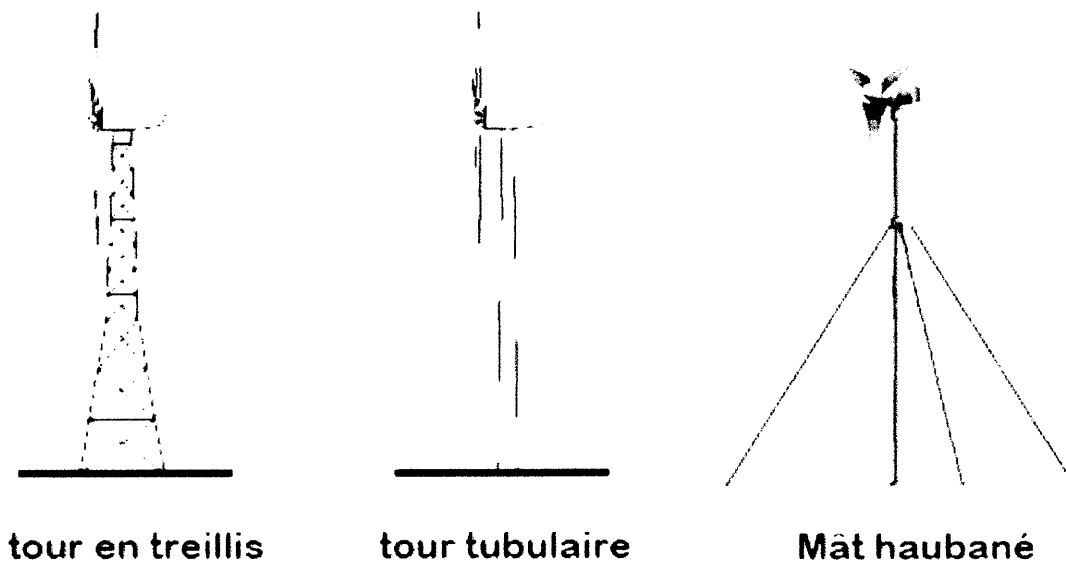


Figure II.5 : Types de mât.

II.2.5. Génératrice

Une Génératrice éolienne est une machine électrique effectuant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique dans une éolienne.

II.2.5.1. Principe de fonctionnement d'un générateur

Un générateur est constitué de deux parties :

- **le stator** : Un axe fixe.
- **le rotor** : Une partie tournante de forme cylindrique.

La rotation des pales de l'éolienne autour du moyeu entraîne le mouvement du rotor autour du stator, ce qui crée un champ magnétique. Plus le mouvement des pales est rapide, plus le champ magnétique est fort, et plus il y a d'électricité produite.

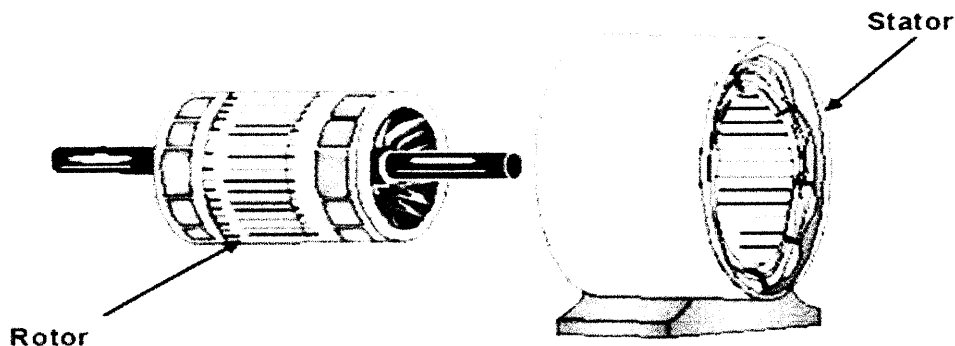


Figure II.6 : rotor et stator.

II.2.5.2. Les différents types de générateurs

Il existe deux types de générateurs :

- Le générateur à courant continu, ou dynamo.
- Le générateur à courant alternatif, ou alternateur.

a. Le générateur à courant continu

On trouve rarement des dynamos dans les éoliennes. Ces machines comportent deux parties :

- Le circuit magnétique, ou bobine magnétisante, qui crée un champ magnétique dans l'entrefer : c'est l'inducteur.
- L'enroulement d'induit, dans lequel on récupère l'énergie électrique produite par la rotation du rotor.

b. Le générateur à courant alternatif

Les alternateurs sont beaucoup plus fréquents. On distingue deux types de machines :

1. Génératrice synchrone

La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'entraînement direct, c'est-à-dire lorsque la liaison mécanique entre la turbine éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que cette génératrice soit nécessairement raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure.

➤ Machine synchrone à électroaimants

A électroaimants. Les bobines des électroaimants sont alimentées en courant continu à l'aide d'un système de balais et de bagues collectrices fixées à l'arbre de la génératrice. Cette alimentation peut se faire par exemple via un convertisseur qui transforme le courant alternatif

du réseau électrique en courant continu. Diverses méthodes de génération de l'excitation existent. La génératrice à électroaimants est la plus utilisée actuellement.

➤ **Machines synchrones à aimants permanents**

A aimants permanents ou MSAP. La source d'excitation du rotor est indépendante du réseau contrairement à la machine synchrone à électroaimant. Ce type de machine tend à être de plus en plus utilisé par les constructeurs d'éoliennes car elle peut fonctionner en mode autonome.

➤ **Machine synchrone à réluctance variable**

La machine synchrone à réluctance variable est structurellement une machine synchrone à pôles saillants dépourvue d'excitation. Son stator est identique à celui des machines à courant alternatif ordinaires. Le couple électromagnétique est constitué exclusivement du couple de saillance. La conversion d'énergie dans la machine s'effectue par variation des inductances propres et mutuelles de ses enroulements de phases due à la rotation d'un rotor magnétiquement dissymétrique entre les axes directs (de réluctance minimale) et en quadrature de réluctance maximale.

2. Génératrice asynchrone

La plupart du temps la Machine Asynchrone (MAS) est utilisée car la génératrice est capable de supporter de légères variations de vitesse ce qui est un atout majeur pour des applications du type éolien où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales. Ces dernières engendrent des sollicitations mécaniques importantes pour le système qui sont ainsi plus réduites avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone fonctionnant normalement à vitesse fixe. La machine asynchrone est peu utilisée sur site isolé car elle nécessite des batteries de condensateurs pour la fourniture d'énergie réactive.

➤ **Machine asynchrone à rotor bobiné**

A rotor bobiné ou à bagues. Les enroulements du rotor couplés en étoile sont reliés à un système de bagues/balais permettant ainsi l'accès à leurs bornes pour la connexion d'un convertisseur statique dans le cas d'un pilotage de la machine par le rotor.

➤ **Machine asynchrone à cage d'écureuil**

A cage d'écureuil. Le rotor est constitué de barres court-circuitées par des anneaux aux deux extrémités de l'armature. Les enroulements rotoriques ne sont alors pas accessibles [20].

II.2.6. Contrôleur électronique de l'éolienne

Le contrôleur de l'éolienne consiste en un certain nombre d'ordinateurs qui surveillent continuellement l'état de l'éolienne et recueillent les statistiques sur son fonctionnement.

Comme son nom l'indique, le contrôleur contrôle également un grand nombre de contacts, pompes hydrauliques, soupapes et moteurs à l'intérieur de l'éolienne. Comme les dimensions de l'éolienne augmentent pour passer à des machines mégawatts, il devient même plus important qu'elles aient un taux de disponibilité supérieur, c'est-à-dire qu'elles fonctionnent de façon fiable en permanence [21].



Figure II.7 : Contrôleur d'éolienne.

II.2.7. Multiplicateur

Egalement appelé boîte de vitesse ou encore boîte d'engrenages.

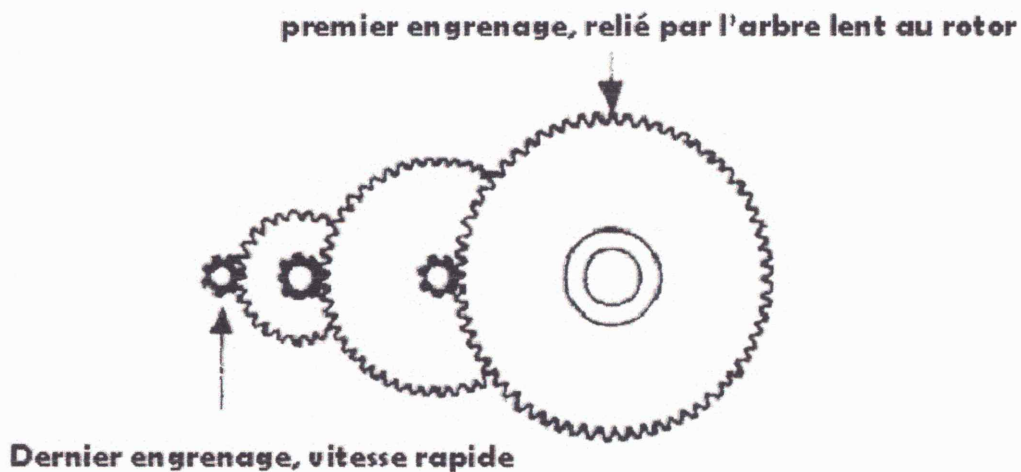


Figure II.8 : Multiplicateur de vitesse.

II.2.7.1. Principe

Le multiplicateur permet de transformer la puissance à vitesse lente et à un couple élevé produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse et à un couple faible utilisée par la génératrice.

II.2.7.2. Fréquence de rotation

La fréquence de rotation est liée au diamètre du rotor et elle diminue lorsque le diamètre augmente. Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande.

La plupart des générateurs ont besoin de tourner à une certaine vitesse (de 1 000 à 2 000 tours/min), pour garder un bon rendement au générateur électrique il est nécessaire d'augmenter la fréquence de rotation obtenue avec l'aéromoteur avant d'entraîner un générateur électrique classique. Cette augmentation est réalisée à l'aide du multiplicateur, aussi appelé boîte de vitesse qui est un train d'engrenages. Dans le cas de la boîte de vitesse d'un aérogénérateur, on utilise généralement un système d'engrenages composé de roues dentées de différents diamètres avec un nombre de dents différents. Le rapport des vitesses de rotation des arbres d'entrée et de sortie est égal au rapport des diamètres des roues d'entrées.

II.2.7.3. Rendement

Le rendement est variable suivant la puissance transmise mais en moyenne 97%, il s'agit d'une composante lourde et coûteuse mais elle permet d'avoir un rotor relié par l'arbre lent au multiplicateur tournant lentement (30 à 40 tours/min) et de se coupler à un générateur de série, donc peu cher, qui tourne lui 40 à 50 fois plus vite relié au multiplicateur par l'Arbre rapide [22].

II.2.8. Arbre lent

Cette pièce fait le lien entre les pales et la boîte d'engrenage, il tourne à la même vitesse que les pales.

II.2.9. Arbre rapide

L'arbre rapide tourne à environ 1 800 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence, soit lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

II.2.10. Le frein

Le frein permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.

II.2.11. Le système de refroidissement

Des refroidisseurs sont prévus pour le multiplicateur de vitesse qui encaisse les efforts mécaniques d'un arbre à l'autre, et pour la génératrice. Ils se présentent sous la forme de ventilateurs, de radiateurs d'eau ou d'huile. Le refroidissement à huile est utilisé pour les multiplicateurs.

II.2.12. Le système d'orientation de la nacelle

Le système d'orientation est un moteur qui veille à ce que l'éolienne soit toujours placée face au vent. Il est commandé par le système de contrôle, un ordinateur qui surveille en permanence l'état de la machine et celui de son environnement et à l'aide de la girouette qui indique la direction du vent et l'anémomètre qui en montre la vitesse.



© 1998 www.WINDPOWER.org

Figure II.9 : Le dispositif d'orientation de l'éolienne.

II.2.13. La fondation

La fondation est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne [23].

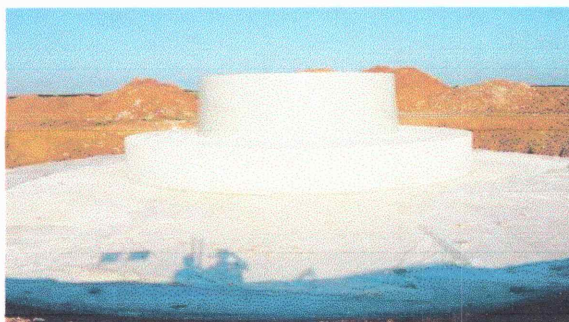


Figure II.10 : la fondation d'une éolienne.

II.2.14. Les outils de mesure du vent :

Les outils de mesure du vent sont de deux types : une girouette et un anémomètre.



Figure II.11 : la girouette et l'anémomètre.

II.2.14.1. Anémomètre

L'anémomètre mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter.



Figure II.12 : l'anémomètre.

II.2.14.2. Girouette

La girouette indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent [24].



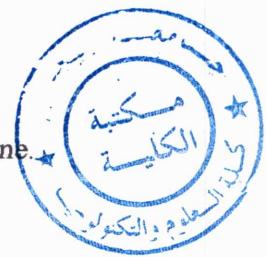
Figure II.13 : la girouette.

II.2.15. armoire de couplage au réseau électrique

L'armoire de couplage au réseau électrique transforme la tension afin de rendre l'énergie produite par l'éolienne compatible à celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau [25].



Figure II.14 : Armoire de couplage au pied d'une éolienne.



II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents éléments d'une éolienne à axe horizontal en détail, performances des principaux composants (le mât, le rotor, la génératrice, les pales) contribuer à l'amélioration le fonctionnement et la production énergie électricité de l'éolienne.

Chapitre III

Aérodynamique d'un rotor d'éolienne

III.1. Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Cette énergie mécanique est exploitée à des éoliennes, hélices installées au sommet de pylônes et qui tournent sous l'action du vent. La rotation des hélices actionne un système produisant de l'électricité. Pour comprendre le mode de fonctionnement d'une éolienne, il faut introduire quelques concepts d'aérodynamique.

III.2. Énergie fournie par le vent

III.2.1. Énergie cinétique

Le vent est de l'air en mouvement, et comme tout corps en mouvement on peut lui associer une énergie cinétique, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constant, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse :

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

m : Masse du volume d'air (en kg)

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

E_c : Énergie cinétique (en joules)

III.2.2. La masse de l'air

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

$$m = \rho \cdot V \quad \text{III.2}$$

m : masse du volume d'air (en kg)

V : volume d'air occupé (en m³)

ρ : masse volumique (en kg/m³)

Dans le cas de l'éolien, le volume d'air occupé dépend de la surface balayée par le rotor de l'éolienne. La puissance du vent traversant le rotor correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor à chaque seconde [26].

III.2.3. L'énergie du vent

L'énergie du vent est l'énergie cinétique véhiculée par l'air qui traverse une certaine surface S , la puissance associée est donc :

L'écoulement amont est supposé uniforme de vitesse V_1 . Dans le cas d'une Eolienne, le flux d'air traversant le disque rotor de surface S est ralenti et lui Fournit de l'énergie On a donc naturellement :

$$v_1 > v > v_2 \quad \text{III.5}$$

La loi de conservation de la quantité de mouvement donne les égalités suivantes :

$$S_1 v_1 = S v = S_2 v_2 \quad \text{III.6}$$

D'après la loi du bernoullie :

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad \text{III.7}$$

et

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad \text{III.8}$$

La soustraction (III.7) - (III.8) donne :

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{III.9}$$

La force exercée par le vent sur le capteur est :

$$F = (p_1 - p_2) \cdot S = \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2) \cdot S = \rho \cdot S \cdot \frac{(v_1 + v_2)}{2} (v_1 - v_2) \quad \text{III.10}$$

Dans le cas examiné le débit massique est constant :

$$Dm = \rho \cdot S \cdot v = cste \quad \text{III.11}$$

Mais cette force peut aussi s'exprimer par application de la loi de Newton :

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = Dm \cdot \Delta V = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad \text{III.12}$$

L'égalité des deux expressions (III.10) et (III.12) implique que :

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad \text{III.13}$$

et la puissance développée par cette force est :

$$P = F \cdot v = \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2) \cdot S \cdot v \quad \text{III.14}$$

Si on exprime cette puissance en fonction de $x = \frac{v_2}{v_1}$, du rendement r , et de P_0 la puissance incidente du vent non perturbé :

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad \text{III.15}$$

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{III.3}$$

P_{vent} : La puissance en Watt)

V_0 : La vitesse du vent en m/s

ρ : : Masse volumique de l'air,

S : la surface d'air en m^2 balayée par les pales

III.3. La limite de Betz

Les premiers travaux pour évaluer le rendement d'une hélice datent du XIXe siècle avec Rankine et Froude. Pour simplifier, les hypothèses retenues sont celles d'un fluide parfait et incompressible : on peut alors utiliser les lois de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie pour évaluer les performances d'un rotor.

L'équation de Bernoulli peut être considérée comme un principe de conservation d'énergie adapté aux fluides en mouvement

$$\rho \frac{v^2}{2} + \rho g z + P = Cte \quad \text{III.4}$$

ρ : La masse volumique en Kg/m³.

V : la vitesse du fluide en m/s.

g : la gravité terrestre 9.81 m/s².

Z : le dénivelé vertical du conduit en mètres.

P : la pression statique en pascals.

$\rho g z$: est la pression de pesanteur ou énergie potentielle ($E_p = mgh$).

$\rho \frac{v^2}{2}$: est la pression cinétique ou énergie cinétique ($E_c = \frac{1}{2} mV^2$).

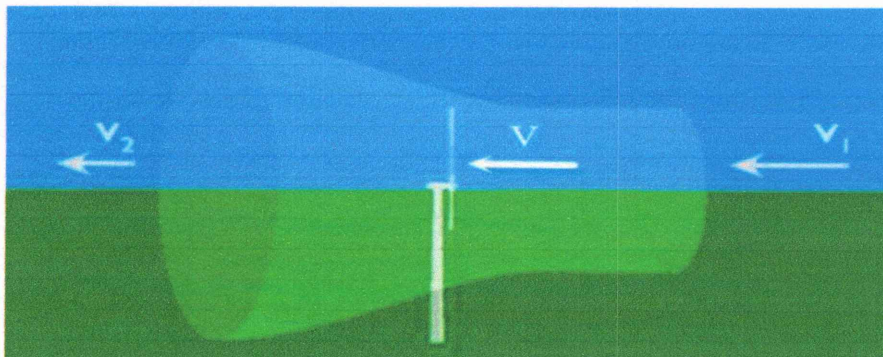


Figure III.1: Représentation du tube de courant.

On obtient :

$$v = v_1 \frac{1+x}{2} \quad \text{III.16}$$

Et

$$r = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} (1 - x^2)(1 + x) \quad \text{III.17}$$

On peut alors tracer le rendement r de l'éolienne en fonction de x :

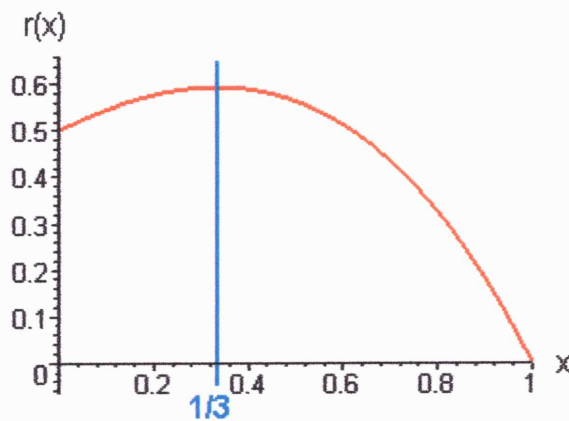


Figure III.2 : Le rendement r en fonction de x .

La valeur maximale de C_p est atteinte pour $x = \frac{1}{3}$, donc cette valeur maximale est :

$$C_{Pmax} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad \text{III.18}$$

Cette valeur limite est appelée la limite de Betz [27].

III.4. Caractérisations des éoliennes

Pour classer les éoliennes par rapport à cette limite de Betz, on utilise couramment :

- le coefficient de puissance
- La vitesse spécifique

III.4.1. le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance ou coefficient de performance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Ce coefficient diffère suivant les turbines. Si on prend la courbe de puissance et la divisons par la surface balayée par le rotor pour obtenir la puissance de sortie par mètre carré de la surface balayée par le rotor.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S V_0^3} \quad \text{III.19}$$

C_p : Coefficient de puissance

S : surface balayée par l'éolienne

ρ : densité de l'air

V_0 : Vitesse du vent

P : puissance d'une éolienne

On peut ainsi positionner les différents types d'architecture de machine

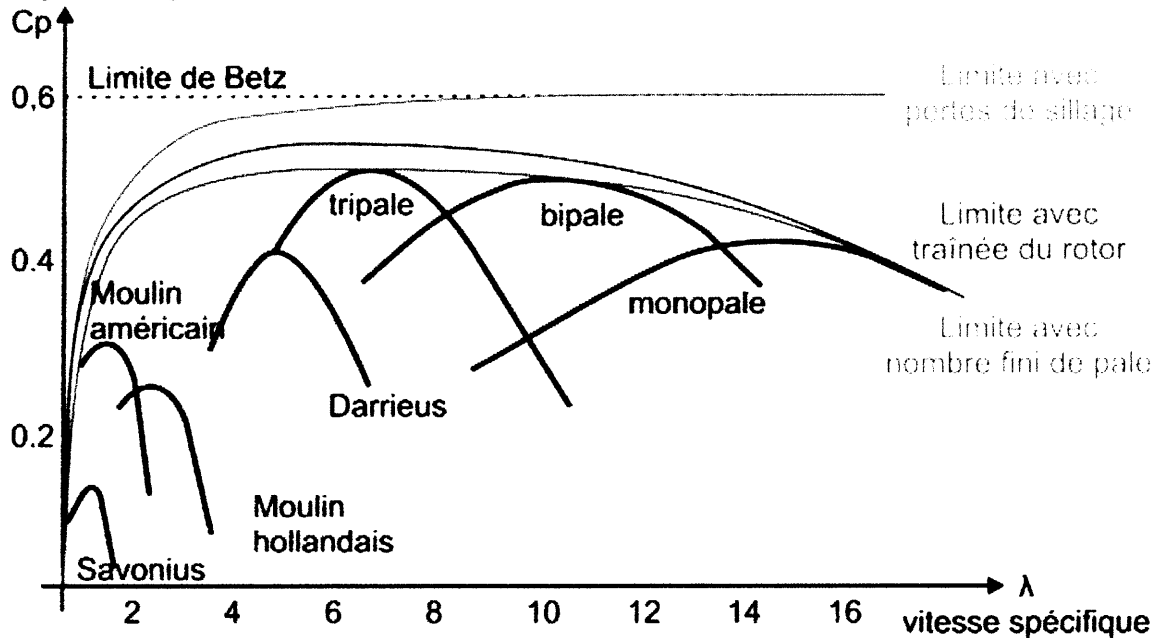


Figure III.3 : Représentation des performances des différents types d'éolienne.

III.4.2. La vitesse spécifique

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ (Lambda) en anglais *Tip Speed Ratio* (TSR) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre :

- si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente.
- si λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide [28]

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

III.20

λ : Vitesse spécifique

R : Rayon de l'éolienne

V_0 : Vitesse du vent

Ω : Fréquence de rotation du rotor en rad/s

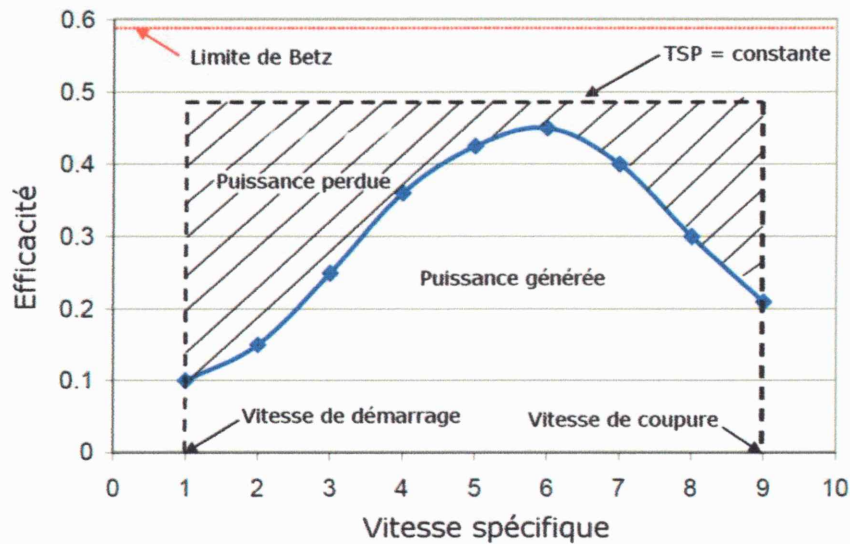


Figure III.4 : Puissance en fonction de la vitesse spécifique.

III.5. Description d'un profil de la pale

La géométrie des profils c'est la forme des profils des pales déterminent généralement leur performance aérodynamique ou hydrodynamique, selon les figures, on définit les grandeurs géométriques suivantes d'un profil aérodynamique :

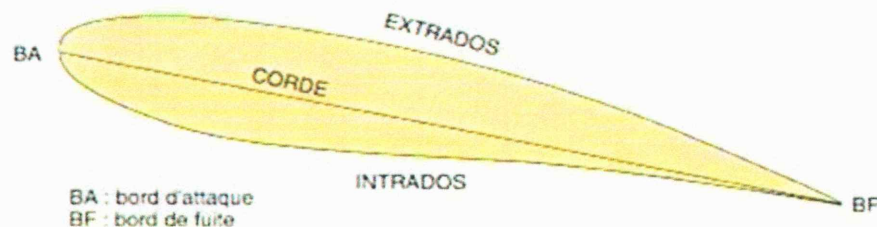


Figure III.5 : Profil de la pale.

- Le bord d'attaque (BA) est le point le plus en avant du profil. C'est là que le flux se divise en deux, celui qui passera par l'extrados et celui passant par l'intrados.
- Le bord de fuite (BF) est le point le plus en arrière du profil. C'est aussi là que les filets d'air passant par l'extrados et ceux passant par l'intrados se rejoignent.
- L'extrados est la partie supérieure du profil, comprise entre le bord d'attaque et le bord de fuite. C'est la distance la plus long du profil.
- L'intrados, est la partie inférieure du profil, comprise entre le bord d'attaque et le bord de fuite. Sa distance est moins longue que celle de l'extrados.

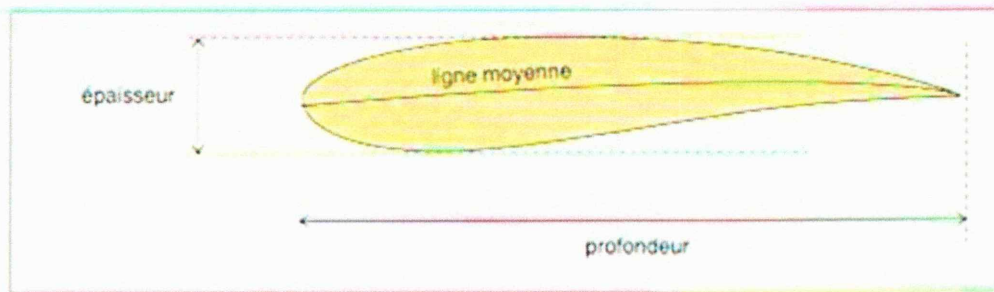


Figure III.6 : Le linge moyen, épaisseur et la corde.

- La ligne moyenne est la ligne formée par la distance moyenne entre l'extrados et l'intrados.
- L'épaisseur est la moyenne de la distance maximale entre l'extrados et l'intrados (elle est mesurée de façon perpendiculairement à la corde).
- La corde (profondeur) est le segment qui va du bord d'attaque au bord de fuite. La longueur de la corde est une mesure importante, car elle est aussi la longueur du profil.

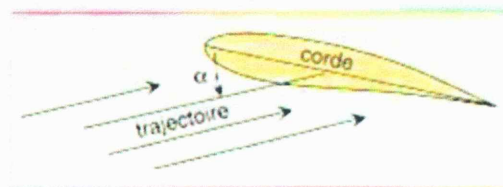


Figure III.7 : L'angle d'incidence.

- L'incidence est l'angle formé entre la corde et la trajectoire des filets d'air, elle est noté α [29].

III.6. Différents types de profils

Il existe plusieurs types de profils :

III.6.1. Biconvexe symétrique

La ligne moyenne est rectiligne (confondue avec la corde).

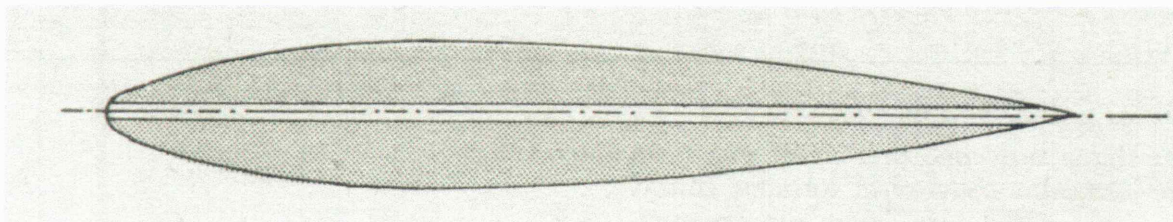


Figure III.8 : Profil biconvexe symétrique.

III.6.2. Biconvexe dissymétrique

La ligne moyenne est à simple courbure (intrados et extrados convexes).

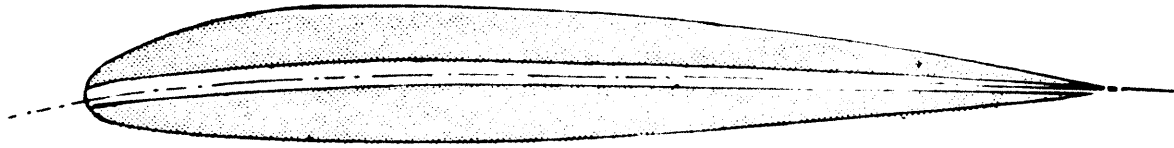


Figure III.9 : Profile biconvexe dissymétrique.

III.6.3. Plan convexe

La ligne moyenne est à simple courbure (intrados plat et extrados convexe)

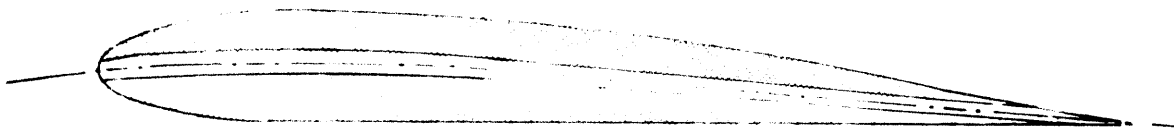


Figure III.10 : Profile plan convexe.

III.6.4. Creux :

La ligne moyenne est à simple courbure (intrados concave, extrados convexes)

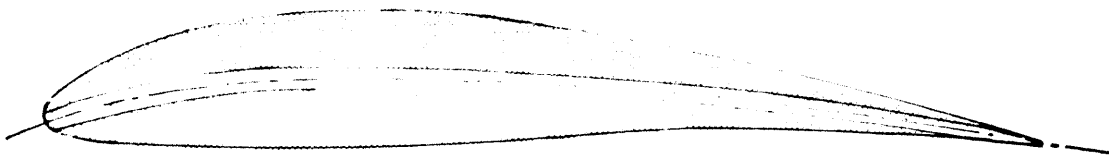


Figure III.11 : Profile creux.

III.6.5. Double courbure

La ligne moyenne est à double courbure

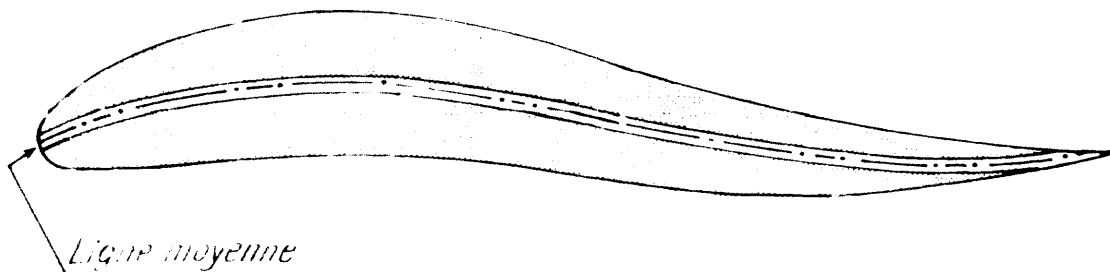


Figure III.12 : Profile double courbure.

III.6.6. Supercritique

Extrados relativement plat, intrados convexe, épaisseur relative variable [30].



Figure III.13 : Profil supercritique.

III.7. Aérodynamique de la pale

La connaissance de l'aérodynamique d'une pale implique non seulement la compréhension des caractéristiques des profils utilisés mais aussi l'influence de leur répartition le long de l'envergure. Il convient donc d'utiliser une bonne évolution de la corde, de l'épaisseur et du vrillage de chaque section, ce que l'on nomme la forme en plan, pour obtenir la meilleure efficacité possible sur toute la plage de vitesse.

Enfin, la définition des profils et des extrémités de pale peut influencer sur le niveau acoustique du rotor [31].

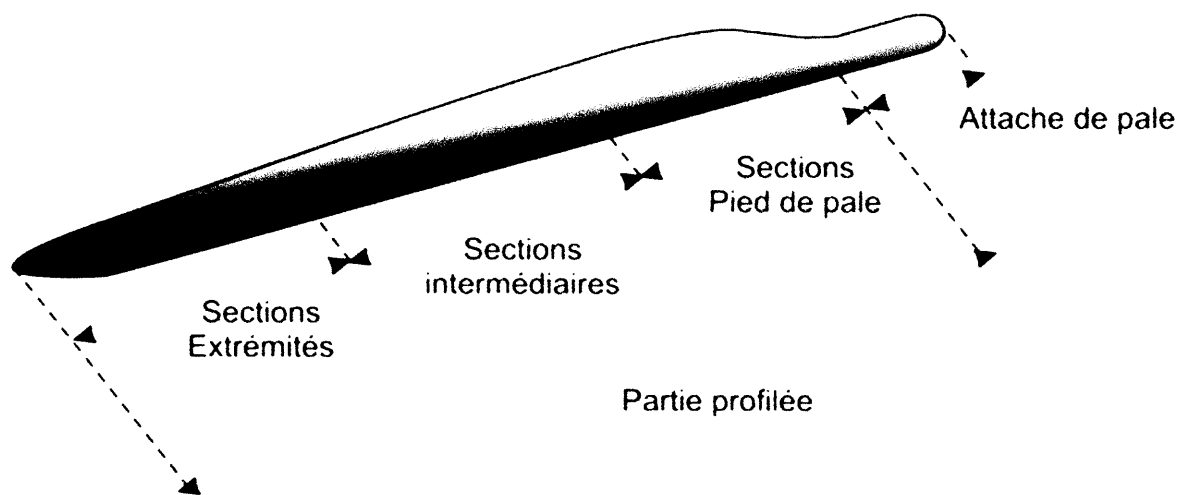


Figure III.14 : La pale.

III.8. Présentation d'un rotor

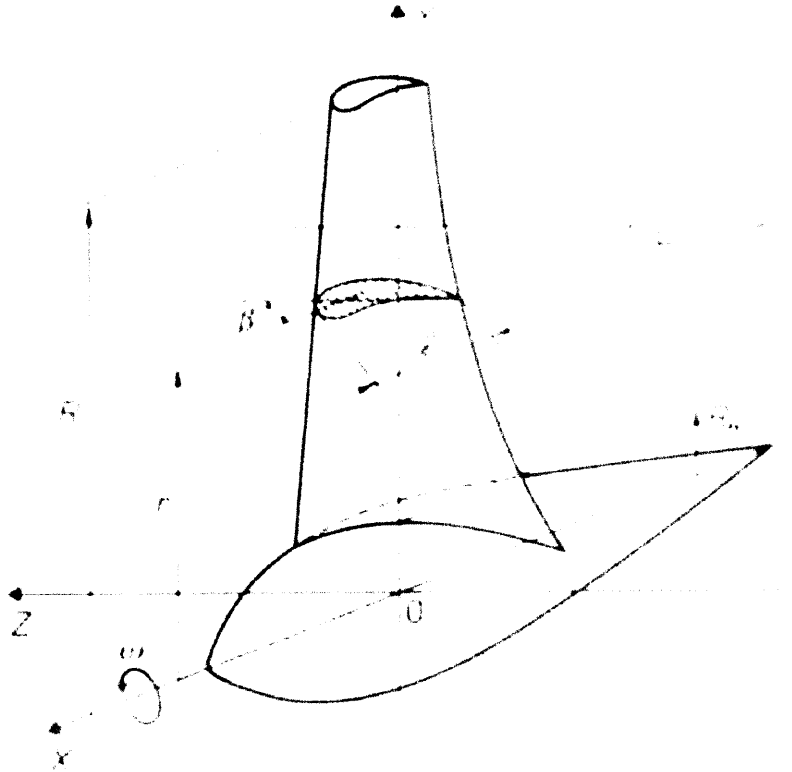


Figure III.15 : Présentation d'un rotor.

Les paramètres nécessaires à la définition géométrique d'un rotor sont :

- La nature du profil
- Le rayon extérieur R
- Le rayon de moyeu R_m
- La corde ℓ
- Le calage initial β_0 (à $0,7R$ en général).
- Le nombre de pale N_p

On se donne en outre un repère :

X : axe du moyeu autour duquel tournent les pales l'hélice appelé axe de rotation, parallèle à la direction du vent à l'infini amont.

Y : Axe de pale autour duquel, quand l'hélice est à pas variable la pale peut tourner.

Plan Π : défini par les axes X et Z ; c'est le plan de rotation dans lequel l'hélice tourne à une vitesse Ω (rd/s)

Plan P : plan de section de la pale au rayon r , perpendiculaire à l'axe YY' , permettant de définir le calage β et la corde ℓ d'une section droite de pale donnée (trace de la pale dans le plan P) [32].

III.9. L'élément de pale

La figure (III.16), montre un rotor tournant à vitesse angulaire avançant par la vitesse du vent, une vue de coupe d'un élément d'une pale de largeur dr situé à une distance r de l'axe du rotor

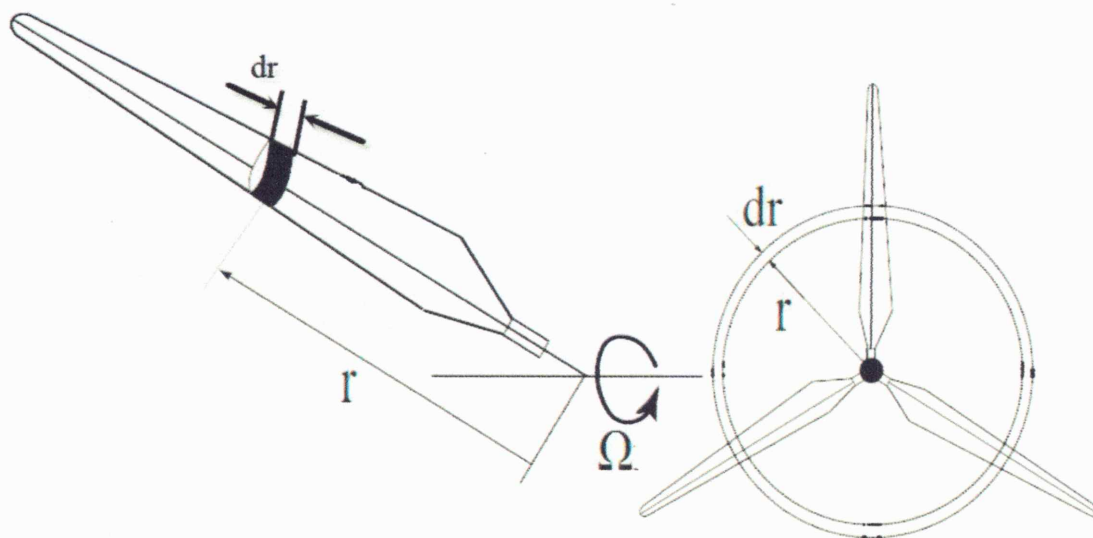


Figure III.16 : Un élément de pale au rayon local r et un anneau balayé par cet élément.

Selon la figure III.17, la pale se compose de plusieurs éléments.

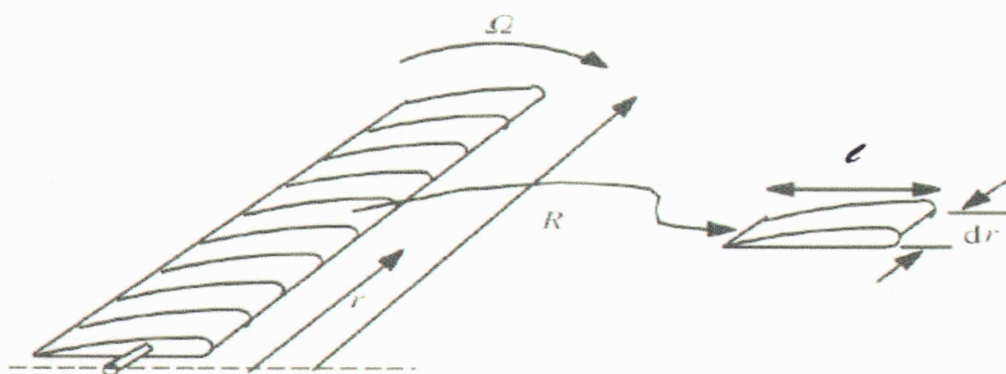


Figure III.17 : La pale divisée en éléments.

III.10. Les forces aérodynamiques appliquées sur une pale

La pale en rotation par l'action du vent soumise aux efforts aérodynamiques appliquées en chaque point de la surface, le schéma de la figure (III.18) présente un profil aérodynamique d'une pale qui détermine les vitesses et les forces appliquées.

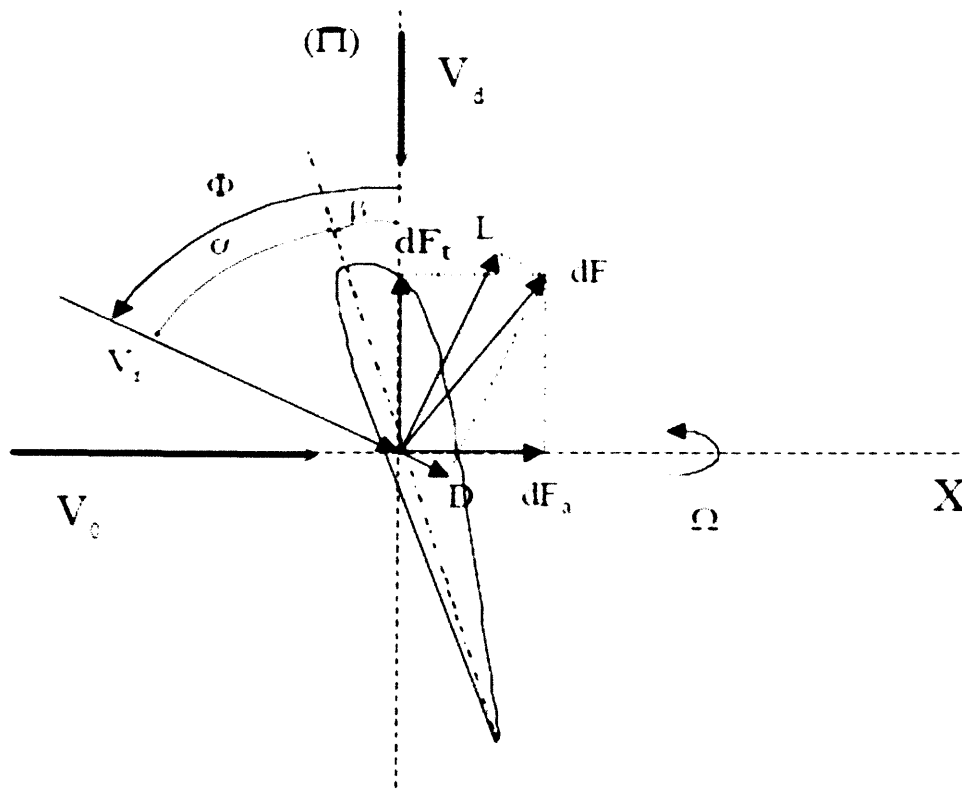


Figure III.18 : Diagramme des vitesses et des forces sur un profil aérodynamique.

On définit également :

V_r : vitesse du vent résultant

$$V_r^2 = V_0^2 + V_d^2 \quad \text{III.21}$$

V_0 : vitesse du vent incident

V_d : vitesse du vent au déplacement de la pale

$$V_d = -r \cdot \Omega \quad \text{III.22}$$

L : la force de portance

D : la force de traînée

dF_t : La force de poussée tangentielle

dF_a : La force de poussée axiale

Ω : vitesse de rotation

β : l'angle de calage

Φ : angle d'incidence

α : angle d'attaque

$$\alpha = \phi - \beta \quad \text{III.23}$$

a. La portance

La portance représente la force exercée sur l'extrados de la pale. Cette force tend à tirer la pale perpendiculairement à la direction du vent relatif. L'écoulement du vent sur le profil de la pale génère la portance.

La portance est égale à :

$$L = \frac{1}{2} \rho \cdot V_r^2 \cdot S \cdot C_z \quad \text{III.24}$$

L : La portance en (N)

ρ : Masse volumique

V : Vitesse de déplacement (en m/s)

S : La surface balayée par le rotor (en m^2)

C_z : Coefficient de portance sans unité

b. La traînée

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.

$$D = \frac{1}{2} \rho \cdot V_r^2 \cdot S \cdot C_x \quad \text{III.25}$$

D : Trainée en (N)

ρ : Masse volumique

V : Vitesse de déplacement (en m/s)

S : La surface balayée par le rotor (en m^2)

C_x : coefficient de traînée sans unité

c. Action aérodynamique

L'équation de l'action aérodynamique ou résistance de l'air est la résultante :

$$dF = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_r^2 \cdot dS \quad \text{III.26}$$

On a la surface élément de la pale :

$$dS = \ell \cdot dr \quad \text{III.27}$$

On obtenu :

$$dF = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_r^2 \cdot \ell \cdot dr \quad \text{III.28}$$

d. Force axiale et la force tangentielle

A partir des expressions de la portance et la traînée, on calcule les forces de poussée axiale dF_a et tangentielle dF_t agissant sur un élément de pale :

$$dF_a = dL \cdot \cos(\Phi) + dD \cdot \sin(\Phi) \quad \text{III.29}$$

$$dF_t = dL \cdot \sin(\Phi) - dD \cdot \cos(\Phi) \quad \text{III.30}$$

Dans ces équations (III.29) et (III.30), dL et dD sont les éléments de forces agissant sur le profil et peuvent être calculés à l'aide du coefficient de portance C_z , du coefficient de traînée C_x et de la corde ℓ du profil au rayon local r de la pale.

$$dL = \frac{1}{2} \rho \cdot V_r^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot C_z(r) \quad \text{III.31}$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho \cdot V_r^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot C_x(r) \quad \text{III.32}$$

On obtient :

$$dF_a = \frac{1}{2} \rho \cdot V_r^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot (C_z(r) \cdot \cos(\Phi) + C_x(r) \cdot \sin(\Phi)) \quad \text{III.33}$$

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho \cdot V_r^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot (C_z(r) \cdot \sin(\Phi) - C_x(r) \cdot \cos(\Phi)) \quad \text{III.34}$$

e. Couple aérodynamique

La somme des intégrales sur toutes les pales, des composantes horizontales et verticales des forces de portances et de traînée, permet le calcul de la force de poussée axiale F_a et du couple aérodynamique T_t (couple capté par la turbine). Ainsi ces expressions sont les suivantes :

$$F_a = \sum_{K=1}^{N_p} \int_{R_m}^R dF_a \cdot dr \quad \text{III.35}$$

$$F_a = \sum_{K=1}^{N_p} \int_{R_m}^R \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot (C_z(r) \cdot \cos(\Phi) + C_x(r) \cdot \sin(\Phi)) \quad \text{III.36}$$

$$T_t = \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_m}^R r \cdot dF_t \cdot dr \quad \text{III.37}$$

$$T_t = \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_m}^R \frac{1}{2} \rho \cdot V_r^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot (C_z(r) \cdot \sin(\Phi) - C_x(r) \cdot \cos(\Phi)) \cdot r \cdot dr \quad \text{III.38}$$

N_p est le nombre de pales, R est le rayon de l'aéroturbine et R_m est la distance du centre du moyeu au coin de la pale côté moyeu.

On a aussi le couple s'exerçant sur les pales est donné :

$$T_t = \frac{P}{\Omega} = \frac{1}{2} \rho \cdot V_0^3 \cdot S \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\Omega} \quad \text{III.39}$$

On a :

$$S = \pi \cdot R^2 \quad \text{III.40}$$

$$\Omega = \frac{\lambda V_0}{R} \quad \text{III.41}$$

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \cdot V_0^2 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad \text{III.42}$$

On pose le coefficient de couple :

$$C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad \text{III.43}$$

On obtient :

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \cdot V_0^2 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot C_T(\lambda) \quad \text{III.44}$$

III.11. Organigramme

Dans ce travail, nous avons réalisé un programme Matlab qui a pour objectif de :

- Calculer les forces appliquées sur les pales (La traînée, la portance, la force axial et tangentielle)
- Détermination du couple et de la puissance fournie par le vent

Tout d'abord, on propose le type du profil, on choisit par exemple le type NACA 4412.

α	-10°	-8°	-6°	-4°	-2°	0°	2°	4°	5°	6°	7°	8°	10°	12°	14°
C_z	-0.7	-0.45	-0.25	-0.05	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-0.9	-1.0	-1.1	-1.2	-1.3	-1.45	-1.5
C_x	0.010	0.008	0.007	0.0065	0.006	0.006	0.006	0.0065	0.007	0.008	0.009	0.0105	0.012	0.014	0.016

Tableau III.1 : Caractéristiques aérodynamiques du profil NACA 4412 [31].

Le tableau III.1 présenter les valeurs de l'angle d'attaque α , coefficient de portance C_z , et le coefficient de traînée C_x .

On prend la corde du profil constante $\ell = 6 \text{ m}$, et on prend les caractéristiques suivant :

Le rayon $R = 18 \text{ m}$, la vitesse du vent $V = 10 \text{ m/s}$, angle de calage $\beta = 3^\circ$, le nombre de pale $N_p = 2$, on a aussi la masse volumique $\rho = 1.204 \text{ kg/m}^3$, et l'élément de la pale dr qui variable entre la longueur de rayon R .

Pour l'angle d'incidence ϕ , et la vitesse de rotation Ω on calcule par les équations suivant :

$$\phi = \beta + \alpha \quad \text{III.45}$$

$$\Omega = \frac{v}{\text{Tg}(\phi) \cdot R} \quad \text{III.46}$$

On calcule la portance dL et traînée dD , et la force axial dF_a et tangentielle dF_t :

$$dL = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot C_z \quad \text{III.47}$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot C_x \quad \text{III.48}$$

$$dF_a = dL \cdot \cos(\Phi) + dD \cdot \sin(\Phi) \quad \text{III.49}$$

$$dF_a = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot (C_z \cdot \cos(\Phi) + C_x \cdot \sin(\Phi)) \quad \text{III.50}$$

$$dF_t = dL \cdot \sin(\Phi) - dD \cdot \cos(\Phi) \quad \text{III.51}$$

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot \ell \cdot dr \cdot (C_z \cdot \sin(\Phi) - C_x \cdot \cos(\Phi)) \quad \text{III.52}$$

Après on calcule sur un élément de la pale, on utilise l'intégrale sur tous les profils de la pale, pour notre cas on a utilisé la méthode de trapèze qui donné par la suite suivant :

$$S^{\text{Trapèze}} = h \left(\frac{f(0)+f(R)}{2} + \sum_{i=1}^{N-1} f(x_i) \right) \quad \text{III.53}$$

Avec :

h : le pas

$$x_i = h : h : R - h \quad \text{III.54}$$

L'intégrale sur les équations des forces donne F_a et F_t puis on calcule le couple de rotation d'éolienne pour le nombre de pale N_p :

$$T = F_t \cdot \frac{R}{2} \cdot N_p \quad \text{III.55}$$

En fin on déterminé la puissance :

$$P = T \cdot \Omega \quad \text{III.56}$$

$$P = F_t \cdot \frac{R}{2} \cdot \Omega \cdot N_p \quad \text{III.57}$$

III.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressé à l'étude de l'énergie fournie par le vent ainsi que sur l'aérodynamique d'une pale soumise aux forces appliquées sur le rotor d'une éolienne.

Conclusion générale

Conclusion générale

Energie éolienne désigne l'énergie cinétique véhiculée par les masses d'air, c'est-à-dire par les vents, autour de notre planète. Il s'agit d'une énergie renouvelable de plus en plus utilisée pour produire une électricité verte à grande échelle. Les éoliennes, se chargent ainsi de convertir l'énergie éolienne en une énergie mécanique (le vent fait tourner les pales du dispositif), qui alimente ensuite un générateur électrique, où elle est convertie en énergie électrique.

Le travail présenté dans ce mémoire de Master concerne une étude du fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal. L'objectif principal consiste à l'étude de l'aérodynamique d'un rotor d'éolienne par la détermination des efforts et du couple aérodynamique et la puissance extraite par le vent.

Pour cela l'étude a été basée sur les efforts aérodynamiques appliquées sur l'élément de pale et la description d'un profil, à partir l'effet de la vitesse du vent sur les pales éolienne en rotation, on a déterminé les efforts aérodynamiques : la portance et la traînée, la force axiale et la force tangentielle, puis le couple et la puissance extraite pour estimer les performances énergétiques.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] la Fondation Nicolas Hulot pour la Nature et l'Homme
<http://www.fondation-nicolas-hulot.org/>
- [2] Franck Teillard & Jean-Louis Aubert & Philippe Marchand, Energies Renouvelables, Bulletin institut dalkia, France, 2010
- [3] Mahri Zine Labidine, Etude dynamique et optimisation des Pales d'un aérogénérateur, Thèse de doctorant en Energétique, Université de Constantine.algérie, 2012.
- [4] Frédéric WILLOT et Didier VANDERPERRE, Météorologie, Les coordonnateurs du CIRAS de l'Académie de LILLE.2010.
- [5] <http://meteocentre.com/intermet/main/experts.htm>
- [6] Le site Futura Science, <http://www.futura-sciences.com/>
- [7] F. Youcef Ettoumi, Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie, Thèse de doctorat d'état, USTHB, Algérie, 2002.
- [8] Jean-Louis Fanchon, Guide de l'énergie éolienne, Nathan 2001.
- [9] Christian Wagner / Fotolia. Syndicat des énergies renouvelables, paris, février 2009
- [10] <http://www.energies-renouvelables.org/>
- [11] M. Huart, Energies Non Conventionnelles, Cours, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Bruxelles, Belgique, 2005.
- [12] http://uved.univ-perp.fr/module2/co/Module-2-etat-lieux_26.html
- [13] Serhoud Hicham, Contribution à l'étude de la machine synchrone à réluctance variable, thème de Magister, Université de Biskra, Algérie, 2009.
- [14]<http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16662>
- [15].Frédéric Poitiers, Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne, thèse de doctorat de l'université de Nantes, soutenue le 19/12/2003.
- [16] Laurent SENEZ, Etude sur Les composants d'une éolienne,Le site école technocollège & géologie : <http://lsenez.free.fr/spip.php?rubrique140>
- [17]<http://eolienne.comprendrechoisir.com>
- [18] Site Internet de l'Association Info Eolien
<http://www.info-eolien.com/>

- [19] M. Khechana, M. Nadjah, L. Laiche, T. Ouksel et C. Mahfoudi, Etude de la nacelle et du mat d'une éolienne de faible puissance, Revue des Energies Renouvelables, Institut des Sciences Technologiques, Oum El Bouaghi, Algérie, 2008
- [20] NAOUEL HAMDI, Modélisation et commande des génératrices éoliennes, mémoire de magister de l'université mentouri de constantine, 2008.
- [21] La Canadian Copper and Brass Development Association (CCBDA)
<http://www.coppercanada.ca/>
- [22] <http://wikiEolienne.com>
- [23] Alexis Banvillet, contribution à l'étude aérodynamique d'une éolienne par une méthode de sillage libre, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, décembre 2001.
- [24] Andre Ferrand « Aérodynamique des rotors d'éoliennes », INSA Toulouse, 2009.
- [25] <http://www.skyteamfs.free-h.net/theorie/aerodynamique.php>
- [26] quentin lux, calcul des coefficients aérodynamiques d'un avion, université de montréal, département de génie mécanique école polytechnique, Canada, 2013.
- [27] Z. Mehri « Etude des vibrations des vibrations des pales d'un aérogénérateur », Thèse de Magister, Université de Constantine, Janvier 1991.
- [28] Marc Rapin & Jean-Marc Noël, étude sur l'énergie éolienne, institue de l'environnement et de la maitrise énergie, France, 2010.
- [29] Munif JOURIEH, Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, France, 2007.
- [30] chelirem tayeb, étude dynamique d'une pale d'éolienne effilée, thème de magister, université des sciences exactes département de physique constantine, Algérie, 2010.
- [31] <http://mshades.free.fr/flapping/profilautoincident.html>