

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

**UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER PHYSIQUE ENERGETIQUE**

Thème

**Etude des paramètres énergétiques et
aérodynamiques d'une petite éolienne**

Soutenu le : juin 2016

Présenté par :

Président :

M^{elle} HADJ SOUDI Faiza

Mr T. BOUSSOUKAIA Univ. ADRAR

M^{elle} BOUZIANE Asma

Promoteur :

Examineurs

Mr. OMARI-B Univ. ADRAR

Mr. GUENFOUD-M Univ. ADRAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous remercions Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années d'étude.

Nous remercions Mr : OMARI Boumediene, qui a accepté de nous encadrer, et nous lui exprimons particulièrement toutes notre reconnaissance pour avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

Nos remerciements vont également à Monsieur T. BOUSSOUKAIA et M. GUENFOUD pour avoir accepté d'être le jury de notre mémoire.

Que soient remercié tous nos enseignant durant toute nos années l'étude. Et tous personnes du département science de la matière.

ASMA FAIZA



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

didicace

Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire " Ya Kayoum "

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère ... A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que dieu les garde et les protège.

Bouziane

A tous la famille et safi

amies ,

A mes

collègues de S

A tous mes

travail.

Je dédie ce

Asma

DEDICACES

Nous rendons grâce à Dieu le tout puissant de nous avoir donné le savoir et la volonte surtout la patience pour réaliser ce modeste travail

Comme, je dédie ce travail à la mémoire de

A ma mère

A mon cher père

A mes frères et mes sœurs

A grand_mère

A toute la famille HADJ SOUDI, SOUDI, BAICHI ,BRAHIMI,KRBOU et BEN ALI.

Enfin à toutes mes amis et les étudiants de la promotion Physique énergétique

FAIZA

Nomenclature

Nomenclature

- $\langle P \rangle$: Puissance énergétique éolienne moyenne disponible
- ρ : Masse volumique de l'air
- $\langle V \rangle$: Vitesse moyenne du vent
- V_{am} : La vitesse en amont
- V_{av} : La vitesse en aval de la surface
- F : la Force
- A : Surface de la roue
- P : le produit d'une force par la vitesse
- P_{Max} : Puissance récupérable par la roue
- $\langle P_r \rangle$: Densité de Puissance récupérable par la roue
- $\langle E \rangle$: Densité d'énergie moyenne récupérable sur une année
- F(v) : fonction de densité de probabilité de Weibull
- C : paramètre d'échelle
- K : paramètre de forme
- V : vitesse du vent.
- V : vitesse moyenne du vent
- h_m : Hauteur moyen du l'éolienne
- h_{mes} : Hauteur de mesures (généralement 10 m)
- v (h mes):vitesse du vent à la hauteur des mesures
- v (hm) : vitesse de vent à la hauteur hm
- P : densité de puissance éolienne
- Pn.ge : puissance nominale de l'éolienne
- V_d : vitesse de démarrage
- E_{ap} : Énergie annuelle produite par une éolienne
- E_{an} : Production maximale annuelle de l'éolienne
- V_n : vitesse correspondante à la puissance nominale
- V_c : vitesse de coupure de la machine
- F_c : facteur de capacité de l'éolienne
- L_{cc} : coût total sur le cycle de vie de l'éolienne
- C_{ii} : coût d'investissement initial

Nomenclature

C_m : coût actualisé de maintenance.

C_{ma} : coût annuel de la maintenance

D: taux d'intérêt annuel fixe

N: durée de vie de l'éolienne

σ : variance de la vitesse du vent

α : facteur empirique (rugosité)

ρ : densité de l'air

P_{eff} : puissance effective de l'énergie éolienne

C_e : Coefficient de rendement de la puissance

D: diamètre

η : coefficient d'efficacité de perte ou de perte de puissance

L: longueur

C_p : Coefficient de puissance

CP: Coefficient de performance

Γ : fonction gamma

V_i : est la vitesse médiane du vent du $i^{\text{ème}}$ intervalle de vitesse

f_i : est la fréquence d'occurrences des vitesses appartenant au $i^{\text{ème}}$ intervalle de vitesse
(%)

Listes des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1: Configuration à axe horizontal.....	05
Figure I-2: Eolienne de type Darrieus et Savonius	06
Figure I-3: Principe de fonctionnement des éoliennes.....	09
Figure I-4: Mat haubané	10
Figure I-5: Un multiplicateur.....	12
Figure I-6 : Constitution d'une nacelle.....	13
Figure I-7: Un schéma représente un générateur.....	14
Figure I-8: Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.....	15
Figure I-9: Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie éolienne avant utilisation.....	17
Figure I-10 : Bilan sur une section de l'hélice.....	18

Chapitre II

Figure II-1 : Carte de La région d'Adrar.....	22
Figure II- 2: Photographie du site éolien.....	23
Figure II-3 : Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent au niveau de la région d'ADRAR	25
Figure II-4 : Evolution de la vitesse moyenne horaire vent pour le site d'Adrar (à 10m du sol).....	26
Figure II-5: Vitesses moyennes annuelles du vent à différentes altitudes pour le site d'ADRAR.....	27
Figure II-6 : Histogramme et distribution de Weibull des vitesses du vent	30
Figure II-7: Courbes de puissances des éoliennes.....	35
Figure II-8: Comparaison des facteurs de capacité obtenus pour différentes éoliennes et différentes hauteurs.....	37
Figure II-9: Production d'énergie d'une ferme éolienne	38

Listes des figures

Chapitre III

Figure III-1: Remplacement de la surface balayée par les pales du rotor par un disque perméable	
Figure III-2: Efforts subis par un élément de pale d'un rotor éolien soumis à un vent.....	43
Figure III-3: Un élément de pale et un anneau balayé par cet élément.....	45
Figure III-4: Un élément de pale et un anneau balayé par cet élément	47
Figure III-5 : La puissance du vent en fonction de sa vitesse de l'éolienne.....	50
Figure III-6: La limite de Betz du en fonction de la vitesse du vent de l'éolienne.....	52
Figure III-7 : La vitesse de rotation des pales de l'éolienne en fonction de La diamètre....	54
Figure III-8 : Rendement de l'éolienne en Fonction de diamètre.....	56
Figure III-9 : Rendement de l'éolienne en fonction de vitesse de vent.....	57
Figure III-10 : La puissance mécanique du rotor en fonction de la vitesse de rotation de vent..	59
Figure III-11 : Epaisseur profil en fonction de largeur profil.....	62
Figure III-12 : Evaluation de épaisseur profil en fonction de largeur	64
Figure III-13 : Evaluation de puissance mécanique rotor en fonction de la vitesse de rotation rotor.....	67

Listes des tableaux

Liste des tableaux:

Chapitre I

Tableau I-1 : classification des turbines éolienne.....	7
---	---

Chapitre II

Tableau II-1 : Distribution fréquentielle de la vitesse de vents à 10 m sur le site d'Adrar.....	28
Tableau II-2 : Données techniques des éoliennes.....	33
Tableau II-3 : production d'énergie annuelles des éoliennes pour différentes hauteurs du moyeu (site d'Adrar).....	36

Chapitre III

Tableau III-1 : La puissance du vent de sa vitesse de l'éolienne.....	49
Tableau III-2 : Estimation la limite de betz du en fonction de sa vitesse du vent de l'éolienne	51
Tableau III-3 : La vitesse de rotation des pales de l'éolienne en fonction de le diamètre ..	54
Tableau III-4 : Rendement de l'éolienne en Fonction de diamètre.....	55
Tableau III-5 : Rendement de l'éolienne en fonction de vitesse de vent.....	56
Tableau III-6 :La puissance mécanique du rotor en fonction de la vitesse de rotation de vent..	58
Tableau III-7 : Epaisseur profil en fonction de largeur profil.....	62
Tableau III-8 : Epaisseur profil et sa larger.....	64
Tableau III-9 : Puissance mécanique rotor et sa vitesse de rotation.....	66

Sommaire

Sommaire :

Introduction générale.....	1
I-1 Introduction.....	3
I-2 La production éolienne.....	3
I-3 Définition de l'énergie éolienne.....	3
I-3-1 Conservation de l'énergie mécanique.....	3
I-3-2 Transformation en force motrice.....	4
I-3-3 Production d'énergie électrique.....	4
I-4 Les éoliennes se divisent en deux grandes familles.....	4
I-4-1 Les éoliennes à axe horizont.....	4
I-4-2 Les éoliennes à axe vertical.....	5
I-5 Les raisons pour choisir une éolienne.....	7
I-5-1 Les raisons pour choisir une grande éolienne.....	7
I-5-2 Les raisons pour choisir une éolienne plus petite.....	7
I-6 Fonctionnement d'une éolienne.....	8
I-6-1 Principe général.....	8
I-6-2 Les éléments constituant une éolienne.....	9
I-7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	15
I-7-1 Avantages.....	15
I-7-2 Inconvénients.....	16
I-8 Potentiel énergétique éolien.....	16
I-8-1 Puissance énergétique disponible.....	17
I-8-2 Potentiel énergétique éolien récupérable (théorème de BETZ).....	17
I-9 Conclusion.....	19
II-1 Introduction.....	21
II-2 Spécification de la région d'Adrar.....	21
II-3 Situation géographique.....	21
II-4 Situation et description.....	23
II-5 Estimation du potentiel des ressources éoliennes.....	24
II-5-1 Evaluation des ressources éoliennes.....	24
II-5-2 Analyse des données de la vitesse moyenne du vent.....	24
II-5-3 Distribution de la vitesse du vent.....	27
II-5-4 Extrapolation verticale des vitesses de vent.....	30
II-5-5 Densité de puissance éolienne.....	31

Sommaire

II-6 Modélisation de l'éolienne.....	32
II-7 Estimation de l'énergie éolienne produite.....	36
II-7-1 Production d'énergie d'une ferme éolienne.....	38
II-8 Conclusion.....	39
III-1 Introduction.....	40
III -2 Les enjeux de la modélisation aérodynamique instationnaire des éoliennes....	40
III-3 Aérodynamique du rotor éolien.....	40
III-4 Méthodes de modélisation aérodynamique.....	41
III-4-1 Théorie de Froude-Rankine.....	41
III-4-2 Théorie de l'élément de pale.....	42
III-4-3 Théorie de l'élément de pale-quantité de mouvement.....	43
III-4-4 Méthodes "Dynamic Inflow".....	45
III-4-5 Méthodes basées sur la résolution des équations de Navier-Stokes (CFD).....	46
III-4-6 Méthodes tourbillonnaires.....	47
III-5 La puissance du vent en fonction de la vitesse de l'éolienne.....	48
III-6 La limite de betz du en fonction de la vitesse du vent de l'éolienne.....	50
III-7 Le diamètre de l'éolienne en fonction de la puissance souhaité et de la vitesse du vent.....	52
III-8 Rendement de l'éolienne en Fonction de diamètre.....	54
III-9 Rendement de l'éolienne en fonction de vitesse de vent.....	55
III-10 La vitesse de rotation de l'hélice et de sa puissance mécanique.....	56
III-11 Puissance mécanique rotor et sa vitesse de rotation	58
III-12 Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale:

Face à une demande croissante d'énergie et à l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Suite aux crises pétrolières, certains pays ont mené une politique orientée vers le nucléaire alors que d'autres ont massivement utilisé les énergies renouvelables avec l'adoption de l'éolien.

Les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente.

D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés.

Les types de modèles utilisés dans le domaine des énergies nombreux, parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : les énergies renouvelables sont d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...). Pendant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique. L'exemple le plus connu est le moulin à vent. En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batteries.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il aura vendu 72 exemplaires en 1908.

Introduction générale

En Algérie, on a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s, voir carte des vents). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux.

L'Algérie est confrontée à des problèmes d'énergie électrique. La puissance fournie ne suffit plus à la demande elle atteint des pointes de 5100 MW, valeur dépassant sa capacité de production de 200 MW. Il est grand temps de se retourner vers les autres formes d'énergies renouvelables disponibles en grandes quantités dans notre pays comme le vent, qui n'est qu'une forme indirecte de l'énergie solaire.

Malheureusement ces ressources sont mal ou peu exploitées. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il faut connaître le potentiel éolien d'une région.

Dans la présente étude, nous nous intéressons à la région d'Adrar, car cette région est balayée durant toute l'année par des vents forts mais pour l'exploitation idéale de cette énergie, il est nécessaire de connaître la vitesse du vent.

Dans le premier chapitre, on fait une description générale, et le principe de fonctionnement de système éolien.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de du site d'Adrar et traitement des données énergétiques du vent sur site d'Adrar, en argumentant notre choix de la région avec toutes les conditions requises pour l'implantation d'éolienne.

Le Troisième chapitre sera consacré à l'étude des paramètres aérodynamiques d'une petite éolienne.

Enfin, nous avons terminé notre travail par une conclusion générale, quelques perspectives et des recommandations susceptibles de constituer une base de travail pour une éventuelle poursuite de ce présent et modeste travail.

Chapitre I

Généralité sur l'énergie éolienne

I-1 Introduction:

L'énergie éolienne est en train de jouer un rôle important en ces dernières années, non seulement sur le plan écologique mais aussi sur le plan de performance énergétique. En utilisant les nouvelles technologies et les nouvelles méthodes d'installations des système qui sont de plus en plus parfait et performants, la maîtrise de cette nouvelle voie d'énergie devient de plus en plus demander pour satisfaire à la fois la demande de puissance qui ne cesse d'accroître mais aussi en respectant l'écologie qui devient sensible au fil du temps.

I-2 La production éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.[3]

I-3 Définition de l'énergie éolienne: [4]

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable. Elle tire son nom d'Éole (en grec ancien), le maître des Vents dans la Grèce antique.

L'éolienne, aussi nommée aérogénérateur, est une machine qui permet de transformer l'énergie du vent en divers énergies. Elle peut être utilisée de trois manières :

I-3-1 Conservation de l'énergie mécanique:

Le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

I-3-2 Transformation en force motrice:

Pompage de liquides, compression de fluides....

I-3-3 Production d'énergie électrique:

L'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.[4]

I-4 Les éoliennes se divisent en deux grandes familles :

I-4-1 Les éoliennes à axe horizontal :[5]

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- ✓ Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées Éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipâles pour le pompage de l'eau.
- ✓ Elles ont un rendement élevé.
- ✓ Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

Sur base la du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes:

➤ les éoliennes à rotation lente “multipales”

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi-exclusivement au pompage de l'eau.

➤ Aérogénérateurs

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant “d'aérogénérateurs”.

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent

« hélice au vent et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ».



Figure I-1: Configuration à axe horizontal [2]

I-4-2 Les éoliennes à axe vertical :

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

✓ **L'éolienne Savonius** : comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :

-Elle est simple à fabriquer.

-Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s .

✓ **L'éolienne Darrieus** : est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet.[5]



Éolienne de type Darrieus



Éolienne de type Savonius

Figure I-2: éolienne de type Darrieus et Savonius [5]

I-5 Les raisons pour choisir une éolienne:

Le Tableau (I-1): présente une classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIMÈTRE DE L'HÉLICE	PUISSANCE DELIVRÉE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 Kw
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I-1 : classification des turbines éolienne.[6]

I-5-1 Les raisons pour choisir une grande éolienne:[7]

✓ Le Principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes.

Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle-commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quel que soit la taille de l'éolienne.

✓ Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût Des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les Coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

✓ Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une Grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une Petite.

I-5-2 Les raisons pour choisir une éolienne plus petite:

✓ Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.

✓ La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de

plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt Petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

✓ Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins Suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne Constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de Petites éoliennes.

✓ Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes Plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne Attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36KW). [7]

I-6 Fonctionnement d'une éolienne :

I-6-1 Principe général : [8]

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.

➤ **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 à une tension d'environ 690 volts.

➤ **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. [8]

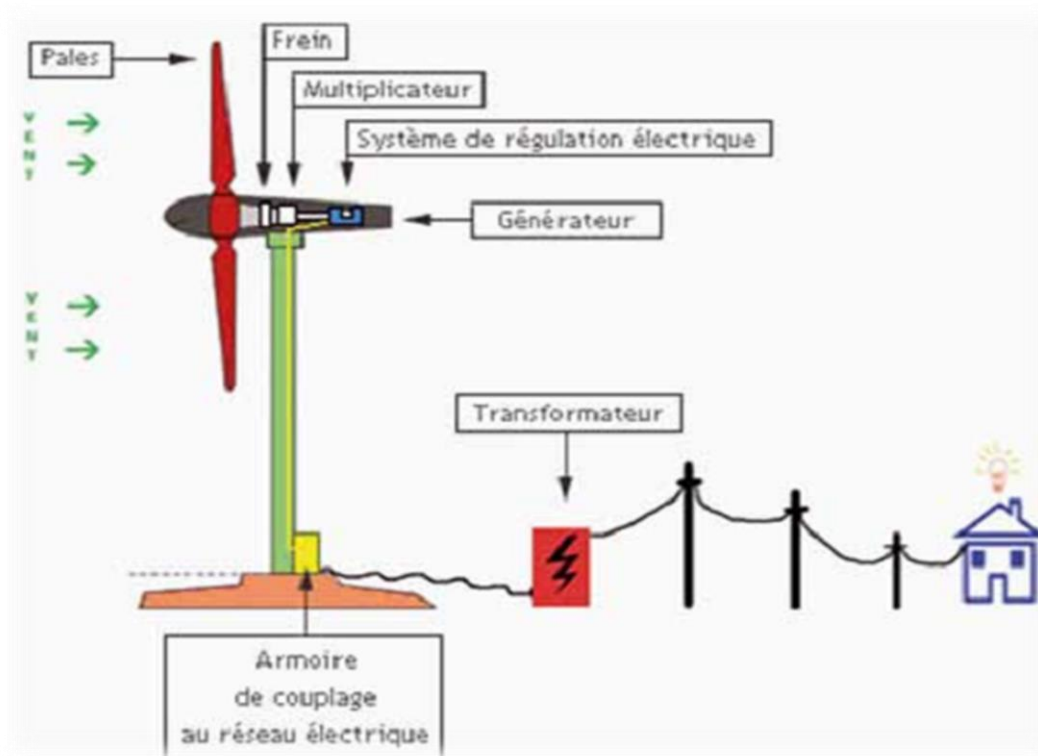


Figure I-3: Principe de fonctionnement des éoliennes [9]

I-6-2 Les éléments constituant une éolienne:

Les aérogénérateurs les plus courants sont à axe horizontal. et composés d'un mât, d'un rotor, d'une nacelle, du système de régulation, et du poste de transformation moyenne tension:

➤ **Le mât:**

C'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante: plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales. [10]

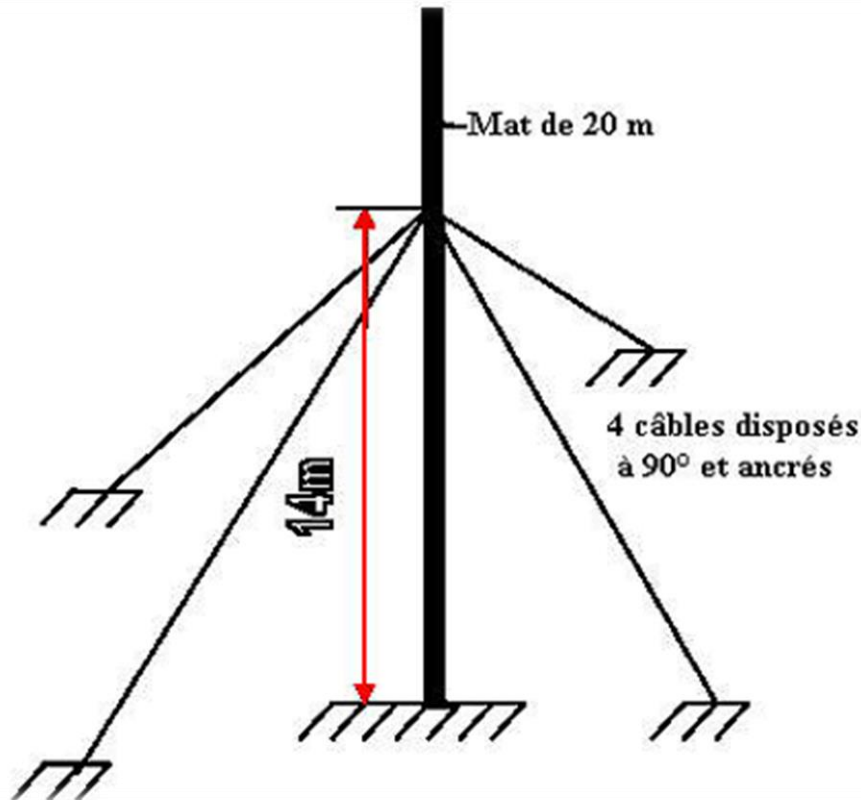


Figure I- 4 : Mat haubané. [11]

➤ **Pales:**[10]

Les pales captent l'énergie du vent et la transfèrent au moyeu du rotor ; Elles sont fabriquées en polyester renforcé par de la fibre de verre ou du carbone ; Elles peuvent également être constituées de bois combiné à de l'époxy.

Ces pales sont montées sur une pièce intermédiaire en acier, elle pèse environ 9 tonnes.

Si l'axe longitudinal des pales est maniable (cas le plus fréquent), il s'agit d'un système dit de "pas variable" ou "réglage pitch". C'est un système mécanique qui agit

sur l'inclinaison des pales en les faisant pivoter autour de leurs axes. C'est d'ailleurs grâce aux moteurs pitch que les pales peuvent se mettre en drapeau en cas de grand vent ou de tornade, et s'arrêter de tourner.

➤ **un rotor:**

Un rotor est composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne.

➤ **Les pales :** [12]

Sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor.

➤ **Arbre de transmission :**

Transmet la puissance vers le générateur. Celui-ci peut être asynchrone ou synchrone. Dans le premier cas, un système d'engrenages assure la transformation de l'énergie de rotation en puissance électrique (turbines Vestas, Nordex, Neg-Micon...) ; dans le second la transmission se fait directement (turbines Enercon et Lagerwey).

Les turbines actuelles fournissent du courant au réseau public d'électricité par le biais d'un générateur synchrone ou asynchrone.

Celui-ci transforme l'énergie de rotation en énergie électrique. Cette énergie doit être compatible pour une injection sur le réseau électrique et cette transformation se fait via des convertisseurs: transformateurs, électronique de puissance. [10]

➤ **multiplicateurs:**

L'arbre lent, appelé aussi « arbre primaire » est une pièce en acier sur lequel est placée à une extrémité le moyeu (qui supporte les pales) et est connecté à son autre extrémité au multiplicateur. Même avec un vent très fort, la vitesse de rotation des pales est trop faible pour produire de l'électricité, c'est pourquoi on place entre la génératrice et le moyeu un multiplicateur.

Le multiplicateur est un convertisseur de puissance : il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice

électrique, en multipliant parfois par 70 la vitesse de rotation initiale. Il est constitué d'un assemblage d'engrenages.

De manière générale, on trouve le multiplicateur ou boîte de vitesse intercalée entre l'arbre et la génératrice. En effet, la majorité des génératrices imposent une vitesse de leur rotor significativement supérieure à la vitesse du rotor de l'éolienne. Par conséquent, il est nécessaire de placer une boîte de vitesse pour multiplier la vitesse de rotation et assurer le couplage entre ces deux entités.

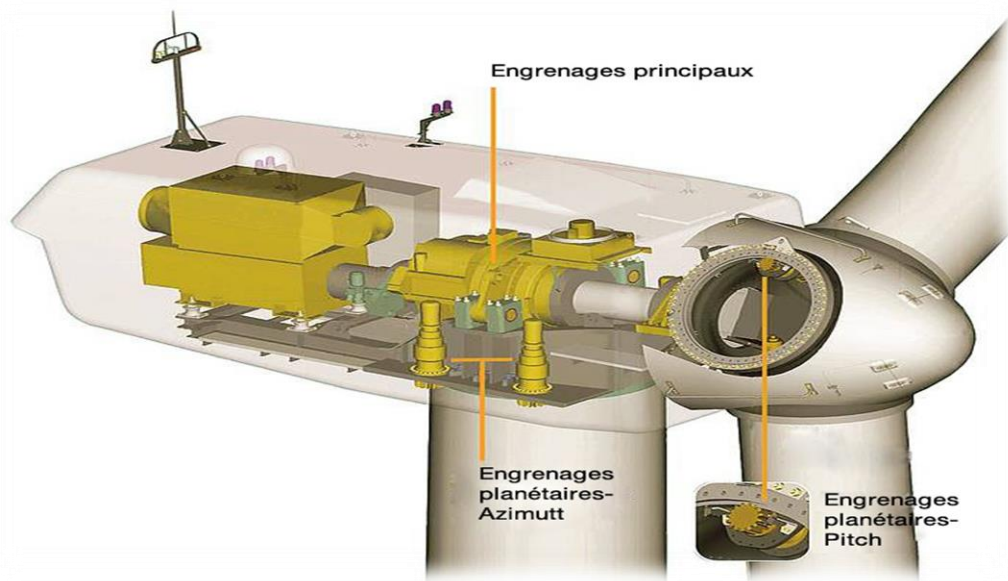


Figure I-5:un multiplicateur [8]

➤ **Frein:**

Lors de vitesses de vent très élevées, la turbine se met en position de sécurité au moyen du système aérodynamique. On dit alors qu'elles se mettent en drapeau. Un frein à disque sert comme système complémentaire pour assurer l'arrêt immédiat de la turbine. Des systèmes de parafoudre et de dégivrage (pour éviter les chutes de blocs de glace des pales) peuvent également être installés. Il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance.[10]

➤ **Le système d'orientation de la nacelle:**

C'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

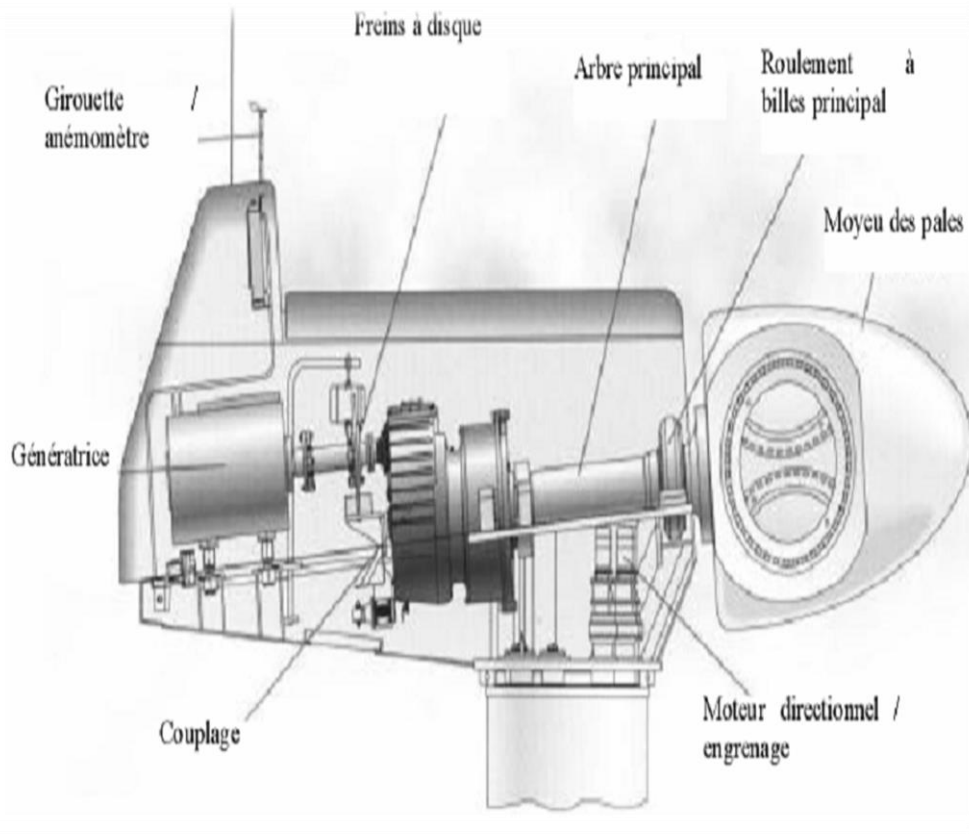


Figure I-6 : Constitution d'une nacelle.[27]

➤ **Le système de refroidissement:**

Il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

➤ **Les outils de mesure du vent :**

Girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

➤ **Le système de contrôle électronique:**

Il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

➤ **Génératrice :**

La génératrice est l'élément d'une éolienne qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Les pales transforment l'énergie cinétique en énergie mécanique, celle-ci étant transmise à la génératrice via le système de transmission. Une fois le courant produit, celui-ci est généralement injecté sur le réseau électrique.

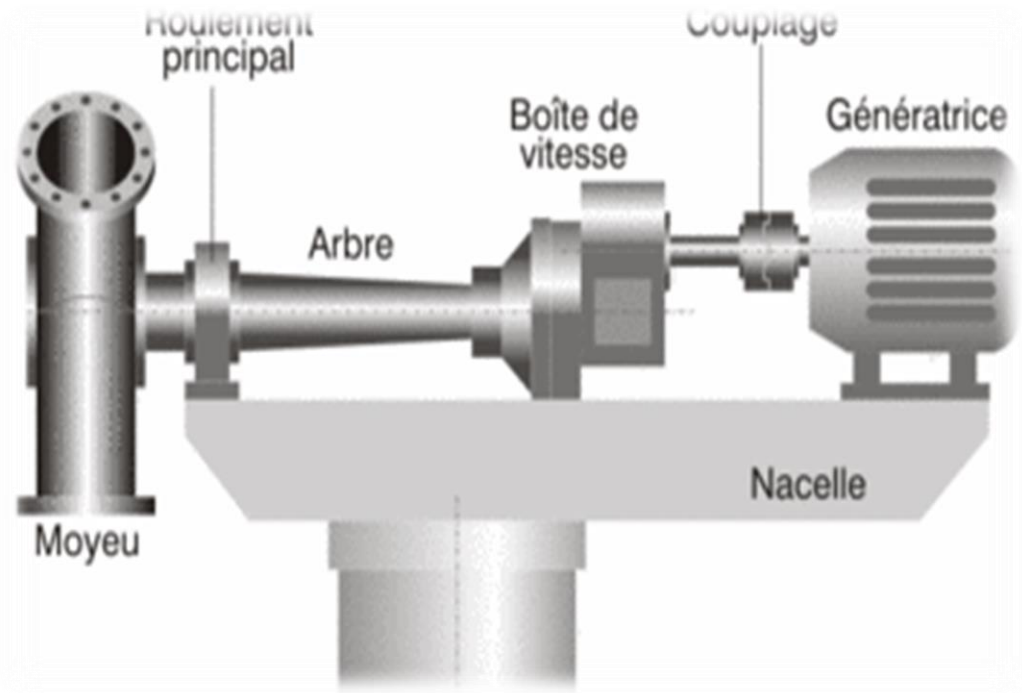


Figure I-7 : un schéma représente une génératrice. [10]

- Dans le cas des machines synchrones, son rotor doit tourner à une vitesse constante dépendant de cette fréquence (à la vitesse dite de synchronisme). Si le stator est directement connecté au réseau électrique, la fréquence du stator, f , est la fréquence du réseau (50 Hz). Par conséquent, le rotor de la génératrice tourne à une vitesse fixe imposée par le réseau que l'on ne peut changer.
- Dans le cas des machines asynchrones, son rotor tourne à une vitesse différente de la vitesse de synchronisme. Cette différence de vitesse de rotation dépend à la fois des propriétés de la machine et du couple moteur exercé sur le rotor de la génératrice. En conclusion, même si la machine est directement connectée au réseau électrique, il reste une certaine latitude sur la vitesse de rotor. [10]

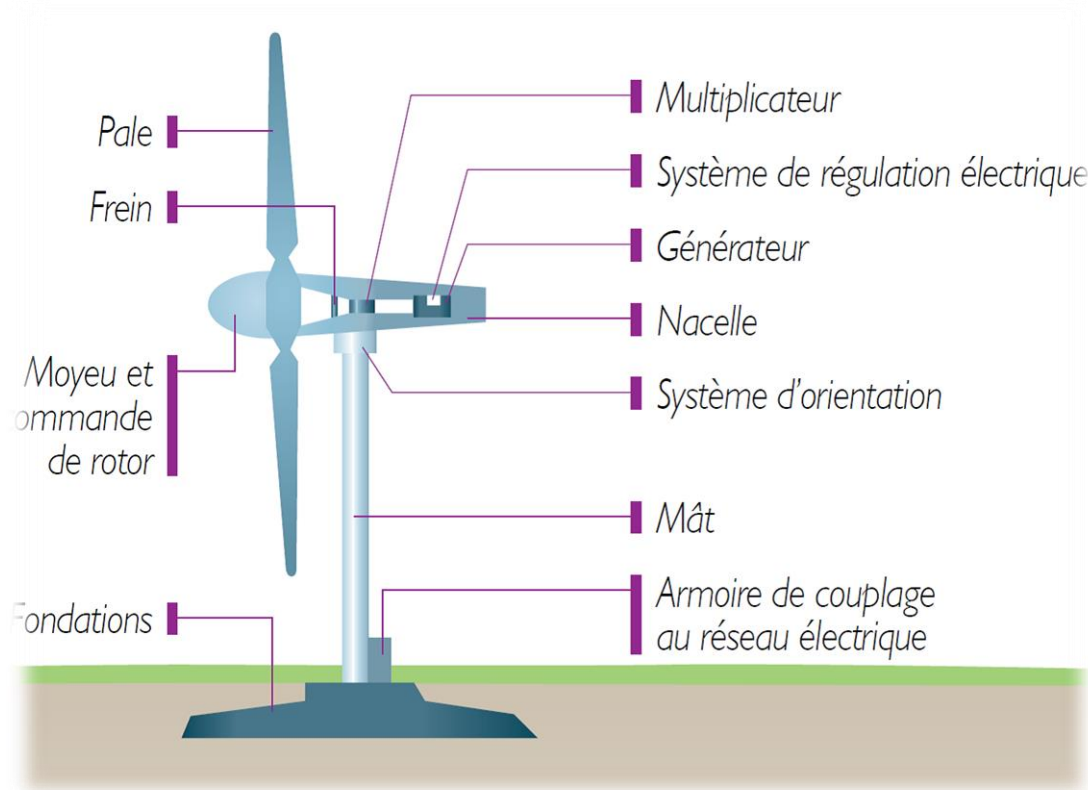


Figure I-8:Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur. [13]

I-7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement. [14]

I-7-1 Avantages :

- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [15].
- ✓ L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [16], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [17].
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [18].
- ✓ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [19].
- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [20], selon l'article

[21] le coût de l'éolienne à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [19].

- ✓ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [18].
- ✓ Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [22].

I-7-2 Inconvénients :[23]

- ✓ La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- ✓ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- ✓ Impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage
- ✓ Un obstacle mortel.
- ✓ En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit.
- ✓ Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci.

I-8 Potentiel énergétique éolien:[24]

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'éolienne) l'énergie disponible (potentiel) subit une suite de pertes en cascades, jusqu'à la sortie machine, (limite de Betz, seuils machine et pertes de conversion)[25]. Cette dégradation de l'énergie est représentée schématiquement en figure(I-9).

En effet, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné, appelée puissance utile est réellement obtenue en fin de processus, soit à la sortie de l'éolienne.

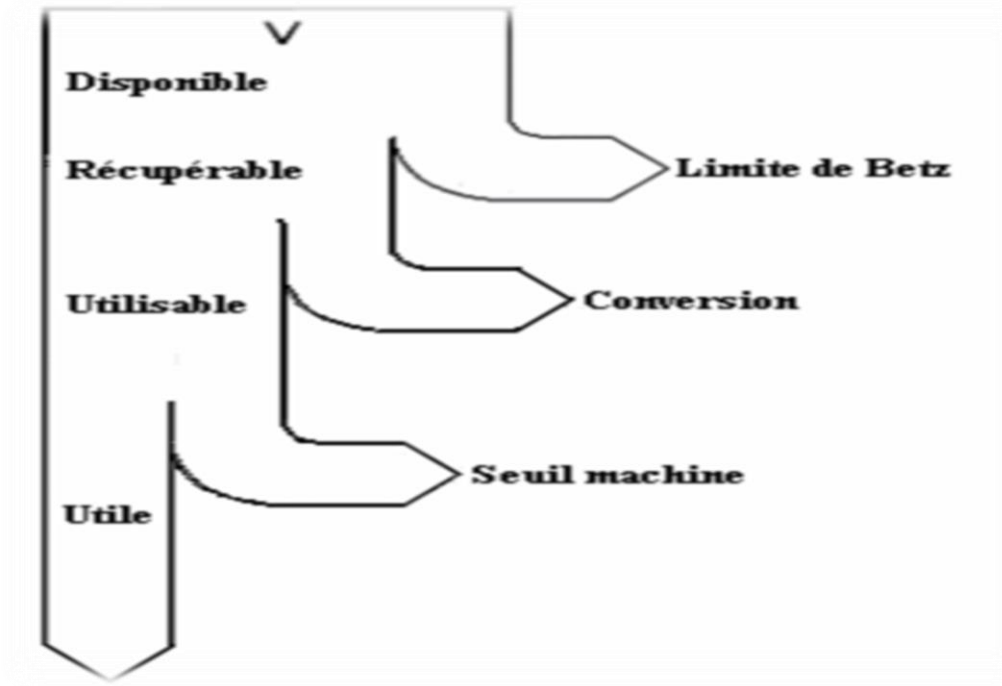


Figure I-9: Représentation schématique des dégradations successives de l'énergie éolienne avant utilisation. [24]

I-8-1 Puissance énergétique disponible:

L'énergie cinétique moyenne, disponible sur un site donné, par unité de temps et par unité de surface, due à la vitesse du vent, s'écrit:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho \langle V^3 \rangle$$

(I-1)

La détermination de la vitesse moyenne et cubique moyenne se fait à partir de l'étude statistique de la distribution des fréquences, par classes, de la vitesse du vent.

I-8-2 Potentiel énergétique éolien récupérable (théorème de BETZ):

L'énergie cinétique disponible est convertie en énergie mécanique en utilisant une machine à aubes (où pâles) dite communément éolienne. La vitesse du vent en aval de la roue n'étant jamais nulle, ceci implique que la puissance éolienne disponible n'est pas entièrement récupérée au niveau de l'hélice, [26].

Soit une masse d'air traversant un disque de surface A , à une vitesse V et soient V_{am} et V_{av} les vitesses respectives en amont et en aval de la surface, (voire figure I.10).

L'équation de conservation de la quantité de mouvement permet d'écrire que la force qui s'exerce sur le disque est égale à la variation de la quantité de mouvement, soit :

$$F = \rho VA(V_{av} - V_{am}) \quad (\text{I-2})$$

En appliquant l'équation qui définit l'énergie, comme le produit d'une force par la vitesse, il vient

$$P = FV = \rho AV^2(V_{av} - V_{am}) \quad (\text{I-3})$$

Comme par ailleurs, la variation d'énergie cinétique donne :

$$P = \frac{1}{2}\rho AV(V_{av}^2 - V_{am}^2) \quad (\text{I-4})$$

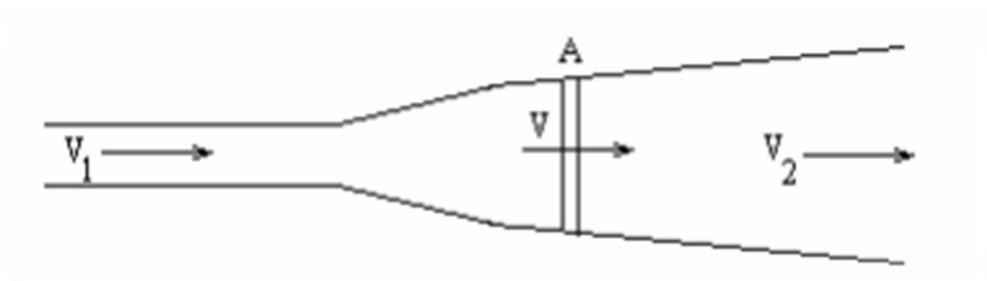


Figure I.10 : Bilan sur une section de l'hélice. [24]

Par identification, il vient

$$V = \frac{V_{av} + V_{am}}{2} \quad (\text{I-5})$$

En remplaçant V dans l'équation (I-1) on obtient :

$$P = \frac{1}{2} \rho A (V_{av}^2 - V_{am}^2) \left(\frac{V_{av} + V_{am}}{2} \right) \tag{I-6}$$

Le maximum récupéré par la roue est obtenu pour :

$$\frac{\partial P}{\partial V_{am}} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2 P}{\partial V_{am}^2} < 0 \tag{I-7}$$

Soit pour :

$$3V_{am}^2 + 2V_{av} V_{am} - V_{av}^2 = 0 \tag{I-8}$$

Equation dont la solution est donnée par :

$$V_{am} = \frac{1}{3} V_{av} \tag{I-9}$$

En remplaçant dans l'équation (I-6), la puissance maximale qui peut être extraite par:

Une roue est égale à :

$$P_{Max} = \frac{1}{2} A \rho \left(V_{av}^2 - \left(\frac{V_{av}}{3} \right)^2 \right) \left(\frac{V_{av}}{2} + \frac{V_{av}}{6} \right) \tag{I-10}$$

En se référant à l'équation (I-1), on obtient :

$$\langle P_{Max} \rangle = \frac{16}{27} \langle P \rangle \tag{I-11}$$

Cette limite (environ 0.59) est appelée "limite de BETZ".

En prenant en considération la limite de BETZ et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par:

$$\langle P_r \rangle = 0.37 \langle V^3 \rangle$$

(I-12)

Enfin la densité d'énergie moyenne récupérable sur une année, $\langle E \rangle$ est égale à: [3]

$$\langle E \rangle = \langle P_r \rangle \Delta t = 0.37 * 24 * 365.25 \langle V^3 \rangle$$

(I-13)

Soit en kWh:

$$\langle E \rangle = 3.25 \langle V^3 \rangle$$

(I-14)

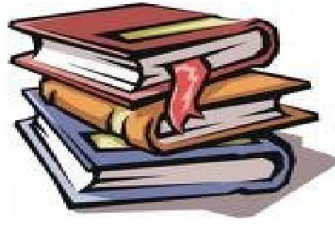
I-9 Conclusion:

☞ Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre, les principales définitions du vent et les deux grandes familles des aérogénérateurs, éolienne à axe horizontale et à axe verticale, les différents composants d'une éolienne, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

☞ Nous avons défini les différents paramètres qui le régissent ainsi que d'autres grandeurs qui sont indispensables à sa mesure.

☞ Ce chapitre va nous permettre d'avoir une bonne connaissance des phénomènes régissant le vent, des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique.

☞ On peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées, ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.



BIBLIOGRAPHIES

[1]M. Adamowicz, R. Strzelecki, D. Wojciechowski, Steady state analysis of twinstator cascaded doublyfed induction generator, in IEEE 5the International Conference-Workshop-CPE 2007.

[2] ABDELHAMID LILIA. Thèse doctorat en sciences en électrotechnique option ; Maîtrise des Energies

[3]O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson, « A comparison of electricalsystems for variable speed operation of wind turbines », European wind energy conf., 1994, p. 500-505.

[4] ABDELMOUMEN MOHAMED GHOFRANE. Energieéolienne. Ecole Technique de Blida

[5] Energie éolienne, Théorieconception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.

[6]EL-HADI Zaim Mohammed, REZZOUG Abderrezak . Machines électriques non conventionnellesTechnique de l'ingénieur D 3 960.

[7]L. Moreau, « Modélisation conception et commande de génératrice à réluctance variable basse vitesse », thèse de doctorat, de l'université de Nantes, le 9 décembre, 2005.

[8] HOUCINAT. Energie éolienne Central de Formation ,BLIDA.

[9]Bulletin des énergie Renevlable –Ministre de L'enseignemnt Supérieur Et de La Recherche Scientifique.

[10] HOUCINAT. Energie éolienne Central de Formation ,BLIDA.

[11] puissance M. Khechana*, M. Nadjah, L. Laiche†, T. Ouksel et C. Mahfoudi Département de Génie Mécanique, Institut des Sciences Technologiques, Ain Beïda

Centre Universitaire Larbi Ben M'Hidi, «Revue des Energies Renouvelables CISM'08 »,Etude de la nacelle et du mat d'une éolienne de faible puissance, Oum El Bouaghi (2008) 195 - 203

[12] L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, December 2001.

[13] Source : guide ADEME de l'énergie éolienne – juin 2013.

[14] REDJEM Radia «Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne», magistère en Electrotechnique

[15]H. Ben Ahmed, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.

[16] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Eoliennes en milieu urbain État de l'art », janvier 2006, pp. 1-129.

[17] J. Chen, C. Nayar, L. XU, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directly-coupledwind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1, pp. 387-394.

[18]Site Internet « L'éolien, un gisement d'énergie renouvelable exploitable en Ile- de France », agence régionale de l'environnement et de nouvelles énergies, <http://www.areneidf.org>.

[19] J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C31. C3 8.

[20] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renevlable energy in the development and electrification offre mote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à12, 2004.

[21] R. Ramakumar, P. Chiradeja, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 2002 -37th intersociety energy conversion engineering conférence, IECEC 2002 paper N° 20027, pp. 716-724.

[22]S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

[اكتب عنوان المستند]

[23] BOUHEDDA Ali, Thème: « Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienn », thèse de Magister en1 électronique.

[24]Nachida KASBADJI MERZOUK. Docteur En physique énergétique et matériaux sur le thème: « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie» , Thèse de Doctora.

[25]Technical note of WMO, « Meteorological Aspect of the Utilisation as an Energy Sources », N°175, 1981.

[26]Takle E.S. et J.M. Brown, «Note on the Use of Weibull Statistic to Characterize Wind Speed Data ». Journal of applide Meteorology, N° 17, 1978.

Chapitre II

Etude énergétique éolienne

sur site d'ADRAR

II-1 Introduction:

Ce chapitre est divisé en deux parties, la première partie consiste à l'estimation du potentiel éolien. En effet, une analyse des données de la vitesse moyenne du vent est présentée suivie d'une étude de la représentation de la distribution des vitesses du vent en dernier lieu, considérée comme un bon indicateur du potentiel éolien disponible, la densité de puissance éolienne est estimée pour la deuxième partie présente d'une part, les différents modèles utilisés pour l'estimation de la puissance produite par les éoliennes avec l'étude de leur adéquation avec les données des constructeurs et, d'autre part, l'estimation de la production annuelle d'énergie fournie par une ferme éolienne qui sera installé prochainement sur le site d'Adrar.[1]

II-2 Spécification de la région d'Adrar :

Le Sahara Algérien, plus précisément la région de Touat, ultime passage avant la traversée du sud, offre une organisation sociopolitique originale qui a permis, depuis des siècles, d'installer et de maintenir des sociétés et des oasis en parfaite Harmonie Le Touat s'étend sur une zone d'affleurement de la plus grande nappe aquifère du Sahara, doté de fabuleuses réserves en eau, facile à exploiter Situé pratiquement sur les méridien 0, entre 26°5 et 29°5 de latitude nord, sur les marges ouest du plateau du Tadmait, la région de Touat, image de la wilaya d'Adrar, est un ensemble de petites oasis. Le prolongement de l'ouest Saoura, du Metarfa et Tsabit à Regagne en passant par Adrar le chef-lieu de, Zaouite-Kounta en parcourant 200 Km et au passage on laisse une centaine de ksour, petite agglomérations, des villages anciens souvent accompagnées de casbahs associée à une palmeraie, située en contrebas. [1]

II-3 Situation géographique :

La Wilaya d'ADRAR s'étend sur une superficie de 427.968 km², soit près d'un cinquième (1/5) du territoire national.

L'espace utile demeurant toutefois réduit, la wilaya d'ADRAR située à l'extrême sud ouest du pays, compte onze (11) daïra et vingt huit (28) communes. Sa population estimée à 336 046 habitants dont 76% de population rurale, soit 254 991 habitants, répartie à travers 294 Ksour (localités) éparpillés au niveau de quatre régions. [2]

- **Le Touat** : région d'Adrar A=205.650 k m² (centre)

-Le **Tidikelt** : région d'Aouléf $A=24.536 \text{ k m}^2$ (Sud-est).

-Le **Gourara** : région de Timimoune $A=65.203 \text{ k m}^2$ (nord).

-Le **Tanezrouft** : région de Bordj Badji-Mokhtar $A=132.579 \text{ k m}^2$ (Sud-Ouest).[3]

La Superficie Agricole Totale (SAT) est de 337 650 HR, la Superficie Agricole Utilisée (SAU) couvre une superficie de 31 657 HR dont 24 675 HR de Superficie Utilisée Irriguée (SAUI) repartie comme suit :

303 19 . *HR irriguée par système gravitaire

331 2 . *HR irriguée par système localisée

041 3 *HR irriguée sous pivots (irrigation par aspersion)

Le nombre d'exploitations agricoles est de 23 467, le reboisement forestier est de 30 has.

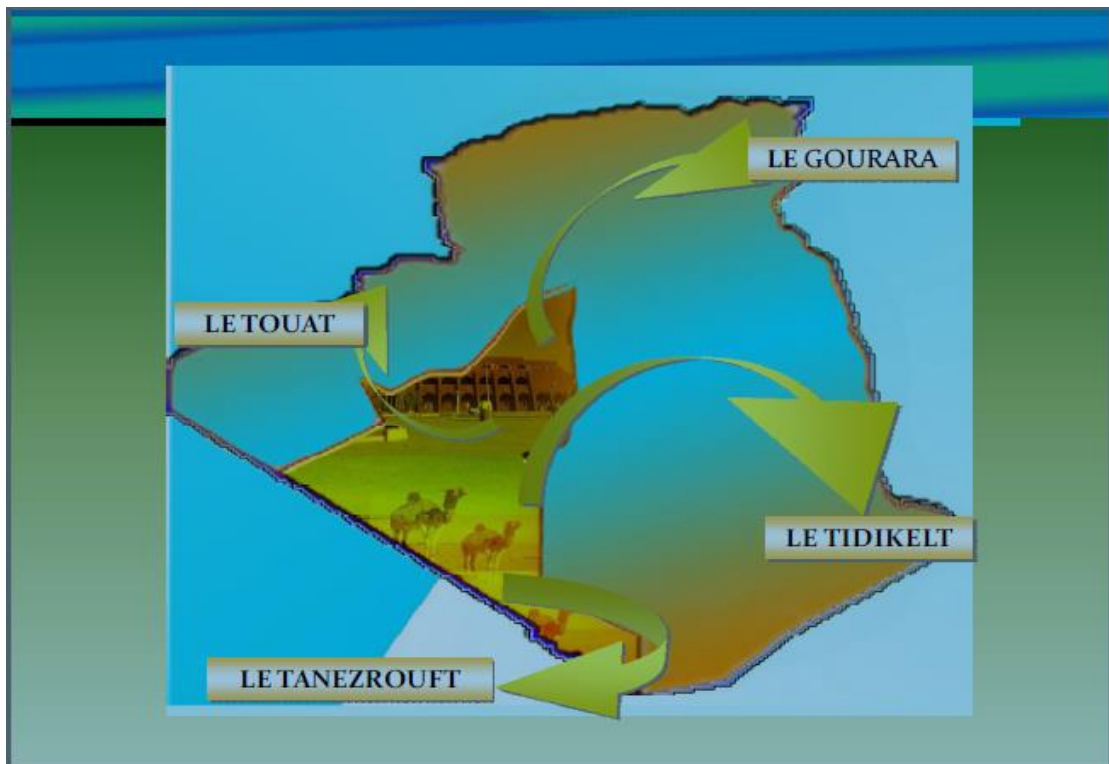
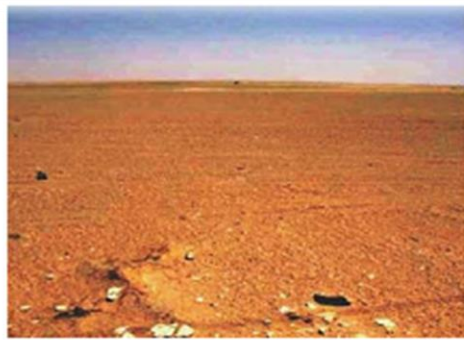


Figure II-1 : Carte de La région d'Adrar [3]

II-4 Situation et description :

Ce site se trouve à environ 73 km au nord de la ville d'Adrar à proximité d'un poste électrique de Son el gaz. Il se trouve à une altitude d'environ 260 m et ses coordonnées géographiques sont 28°27' 7.28" N 0°02' 59.08" transport-Le site présente des possibilités idéales pour le transport. En effet, il se trouve près de l'axe routier Adrar – Timimoune.Réseau électrique- un autre avantage est que ce site se trouve à proximité d'un poste THT-HT, et de ce fait l'extension nécessaire afin de raccorder le parc au poste est limitée, ce qui réduit les coûts de construction. Superficie et topographie-La superficie disponible est importante. La topographie est plate et la rugosité du terrain est faible. Mis à part le poste et les poteaux électriques aucun obstacle ne se trouve dans les alentours de ce site les photographies ci-après montrent la morphologie des terrains se trouvant près du poste électrique de Sonelgaz



Côté Nord



Côté Ouest



Côté Est



Côté Sud

Figure II- 2: Photographie du site éolien [4]

II-5 Estimation du potentiel des ressources éoliennes:

L'estimation du potentiel énergétique éolien disponible sur un site donné est sans doute l'étape la plus importante lorsqu'il s'agit d'envisager l'implantation d'un système d'exploitation de ce type d'énergie. Sa dépendance directe du vent nécessite une connaissance des différents aspects, tels que la variation horaire et mensuelle de la vitesse du vent ainsi que sa distribution en fréquence. Dans cette étude, le site concerné est celui d'Adrar.[5]

II-5-1 Evaluation des ressources éoliennes:

La connaissance des caractéristiques du régime de la vitesse du vent d'un site est importante pour l'exploitation des ressources éoliennes. Dans cette section, une analyse des données de la vitesse du vent en termes de moyenne mensuelle et de moyenne tri-horaire annuelle est présentée. La distribution des vitesses de vent, indispensable pour l'estimation du potentiel éolien, est également présentée et en dernier lieu la densité de puissance éolienne est estimée pour les différents sites choisie dans cette étude. Les données utilisées dans cette étude sont obtenues à partir des données tri-horaires des vitesses de vent mesurées à 10 m du sol, publiées par l'Office National de la Météorologie et collectées sur la période 1976-1988 [5].

II-5-2 Analyse des données de la vitesse moyenne du vent:

➤ moyenne du vent la (figure II-3) montre la variation de la moyenne mensuelle de la vitesse du vent pour le site d'Adrar .

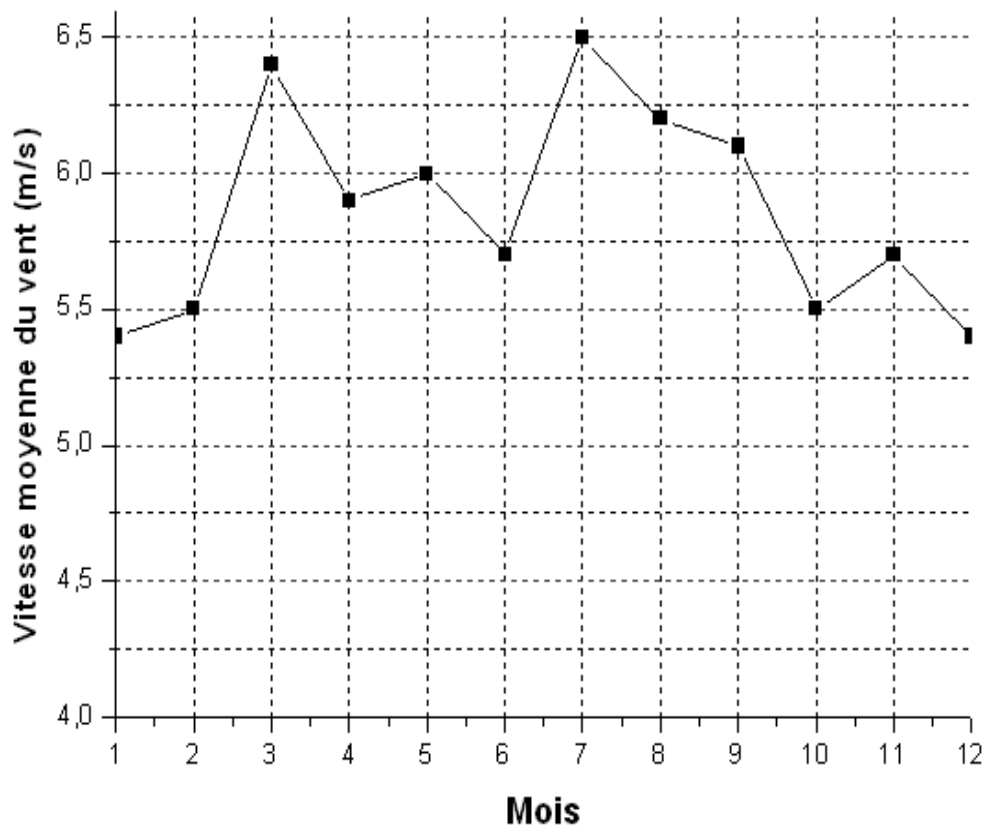
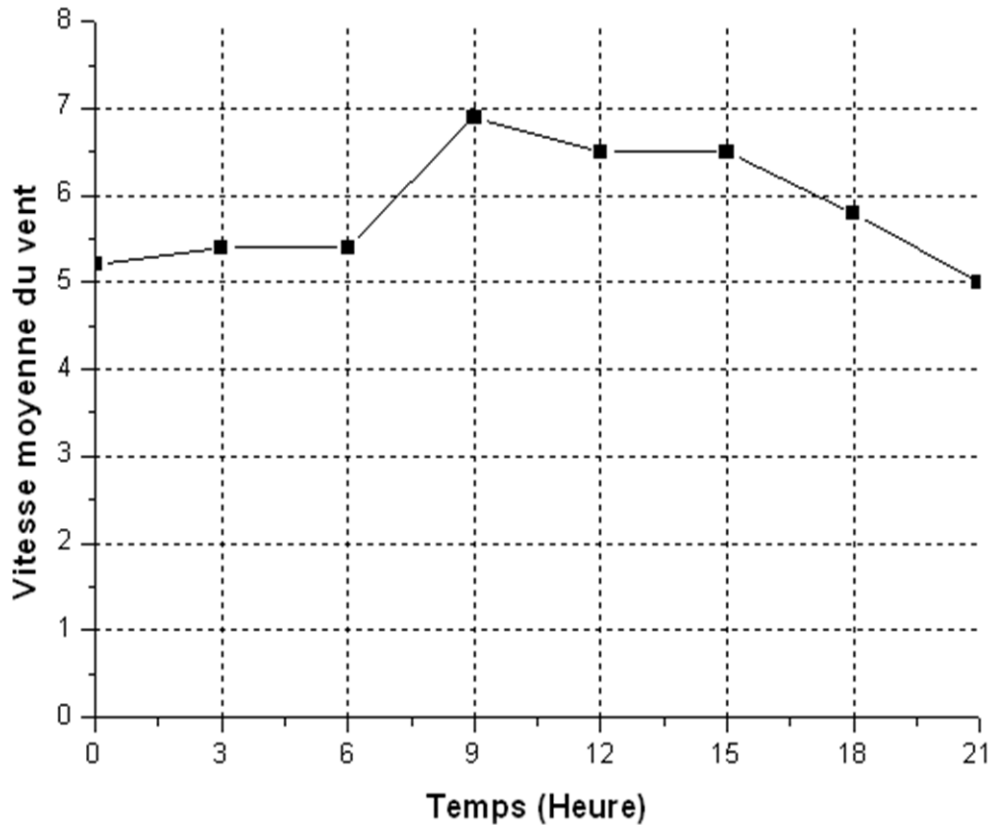


Figure II-3 : Evolution de la vitesse moyenne mensuelle du vent au niveau de la région d'ADRAR [6]

Cette figure montre que ce site présente un maximum de vitesse moyenne des vents pendant la période Juillet-Septembre et le mois de Mars. Quant au minimum, il se produit durant la période hivernale. Ainsi, les données montrent que le site d'Adrar est un site venté durant toute l'année, avec une vitesse moyenne annuelle autour de 6 m/s à 10m du sol.[2]

➤ L'évolution des moyennes annuelles de la vitesse du vent tri-horaire du site d'Adrar dans cette étude est représentée en (figure II-4).



**Figure II-4 : Evolution de la vitesse moyenne horaire vent pour le site d'Adrar
(à 10 m du sol) [6]**

Cette évolution de la vitesse montre, d'une part, une diminution de la vitesse moyenne durant la nuit et une augmentation durant la journée sont constatées, et d'autre part que le site d'Adrar est plus venté l'après-midi que la matinée. Ainsi, les données montrent que le site d'Adrar présente un potentiel éolien important du fait que le vent souffle à une vitesse relativement élevée pendant longtemps.

✚ En effet, le vent souffle à une vitesse supérieure à 5 m/s durant toute la journée et supérieure à 6 m/s pendant presque 10 heures (plus de 40% du temps) et cela seulement à 10 m du sol[6].

Les résultats obtenus pour les vitesses moyennes annuelles sont représentés sur la (figure II-5). Ainsi, à 30 mètres d'altitude, la vitesse du vent annuelle serait de 7 m/s à Adrar .[7]

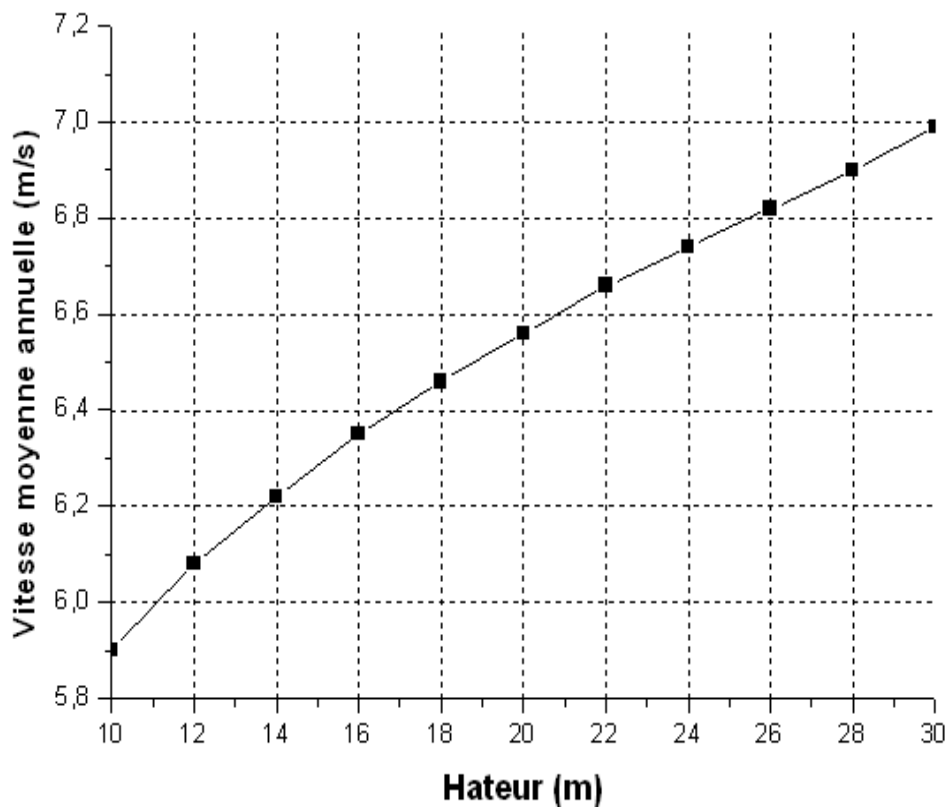


Figure II-5 : Vitesses moyennes annuelles du vent à différentes altitudes pour le site d'ADRAR[6].

II-5-3 Distribution de la vitesse du vent

La connaissance de la distribution de la vitesse du vent sur un site donné permet l'estimation de l'énergie éolienne disponible et récupérable par les éoliennes. A cet effet, la distribution des vitesses du vent peut être représentée de deux manières:

a) Représentation sous forme du tableau :

Le tableau II-1 présente la distribution des fréquences des vitesses moyennes mesurées en termes de pourcentage.

Intervalle de vitesse m/s	Fréquences des vitesses du vent (%)
0-1	7
1-2	1
2-3	4
3-4	9
4-5	11
5-6	16
6-7	16
7-8	11
8-9	8
9-11	10
11-13	4
13-15	2
15-17	1
>17	0

Tableau II-1 : Distribution fréquentielle de la vitesse de vents à 10 m sur le site d'Adrar [8]

La distribution fréquentielle de la vitesse du vent sur le site d'Adrar montre que, seulement 12% des vitesses du vent enregistrées sont inférieures à 3 m/s, vitesse de démarrage de la plupart des éoliennes, et que ces vitesses n'excèdent que très rarement 13 m, vitesse pour laquelle ce type d'éoliennes produit sa puissance nominale. Ce qui veut dire que les petites éoliennes installées sur ce site, à une hauteur de 10 m, peuvent produire de l'énergie pendant 88% de temps mais ne fonctionnent que rarement à leur puissance nominale. Cependant pour les grandes éoliennes qui nécessitent pour leur installation une hauteur beaucoup plus supérieure à 10 m, les vitesses seront plus grandes et ces éoliennes fonctionnent beaucoup mieux dans de larges intervalles de production d'énergie.

b) Représentation mathématique (weibell)

La distribution de fréquence de Weibull est un modèle reconnu de façon générale par la communauté scientifique puisqu'il a démontré de bons résultats. Quant à la représentation de la distribution de fréquence de la vitesse du vent, elle est décrite par

l'équation suivante [9]:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (\text{II-1})$$

Où $f(v)$ est la fonction de densité de probabilité de Weibull, c et k sont les paramètres de Weibull appelés respectivement le paramètre d'échelle et le paramètre de forme et v est la vitesse du vent. Les paramètres de Weibull peuvent être calculés par les deux expressions suivantes:

$$K = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad C = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (\text{II-2})$$

Avec \bar{v} et σ la vitesse moyenne du vent et la variance de la vitesse du vent définies par:

$$\bar{v} = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} v_i \quad \text{et} \quad \sigma^2 = \frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} (v_i - \bar{v})^2 \quad (\text{II-3})$$

N_d est le nombre de données .

Hammouche [2] publie l'Atlas vent de l'Algérie contenant les résultats statistiques de plusieurs stations météorologiques où la distribution de Weibull représente une bonne approximation de la distribution de la vitesse du vent. En effet, les paramètres de la distribution de Weibull sont déterminés pour les différentes stations.

Le figure (II-6) présente l'histogramme des fréquences de vitesse du vent et la distribution de Weibull pour le site d'Adrar.

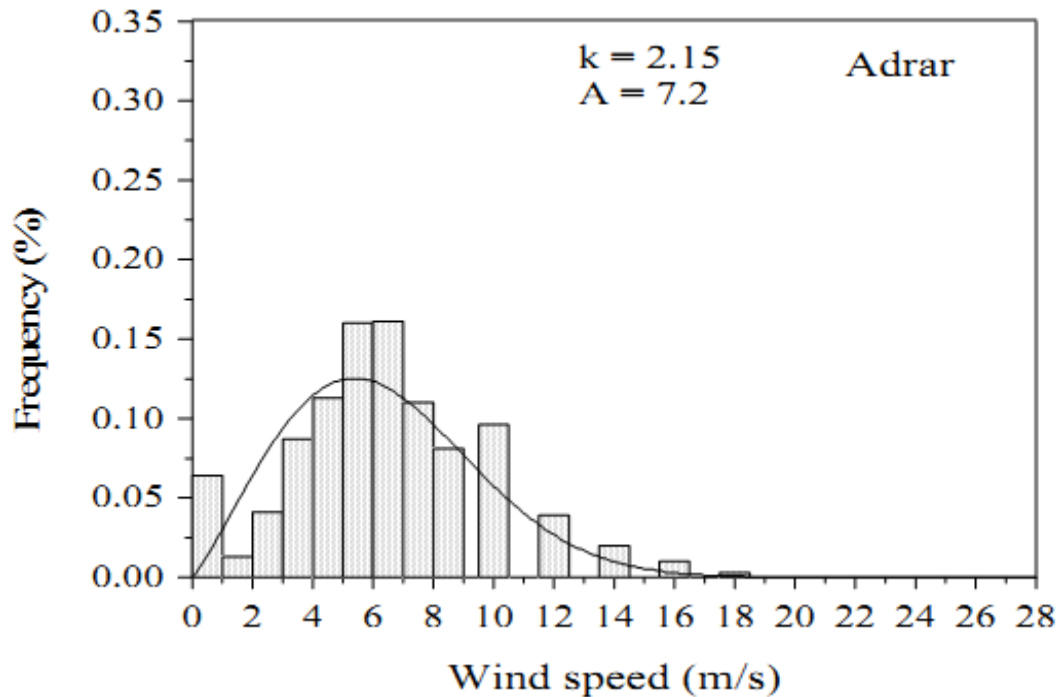


Figure II- 6 : Histogramme et distribution de Weibull des vitesses du vent

II-5-4 Extrapolation verticale des vitesses de vent:

La vitesse du vent varie en fonction de la hauteur et comme la hauteur des mesures de la vitesse du vent (hauteur donnée généralement 10 m) est différente de la hauteur du moyeu de l'éolienne, il est nécessaire d'utiliser un modèle d'extrapolation de ces mesures à la hauteur voulue pour l'estimation de la production d'une éolienne (hauteur du moyeu). Dans cette étude, la loi du profil de vitesse en puissance est présentée pour l'extrapolation verticale des vitesses de vent. Son équation est donnée par l'expression suivante équation[10] .

$$V(h_m) = v(h_{mes}) \left(\frac{h_m}{h_{mes}} \right)^\alpha \tag{II-4}$$

Ou (h_m hauteur du moyeu de l'éolienne), h_{mes} est la hauteur des mesures (généralement 10 m) et α est un facteur empirique exprimant les influences de la rugosité de la surface et de la stabilité atmosphérique. Ce paramètre dépend de plusieurs paramètres à savoir l'altitude, la température, la nature du sol, etc. Il

augmente avec l'augmentation de la rugosité et de la stabilité thermique de la couche superficielle. La valeur de ce coefficient varie dans l'intervalle de $0,05 - 0,5 \cdot V(h_{mes})$ et $V(h_m)$ sont respectivement la vitesse du vent à la hauteur des mesures et à la hauteur h_m

II-5-5 Densité de puissance éolienne:

La densité de puissance éolienne dépend de la distribution des fréquences de la vitesse du vent et elle est proportionnelle à la moyenne du cube de la vitesse du vent, \bar{v}^3 . son expression est donnée par l'équation suivante:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 \quad (\text{II-5})$$

où ρ est la densité de l'air supposée .

Basée sur la fréquence d'occurrences des vitesses appartenant aux différents intervalles, la densité de puissance moyenne disponible peut être exprimée par l'équation suivante:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^j (v_i^3 \cdot f_i) \quad (\text{II-6})$$

où V_i est la vitesse médiane du vent du $i^{\text{ème}}$ intervalle de vitesse, f_i est la fréquence d'occurrences des vitesses appartenant au $i^{\text{ème}}$ intervalle de vitesse (%). j est le nombre d'intervalles de vitesses. En termes des paramètres de Weibull, elle est exprimée par:

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (\text{II-7})$$

où Γ est la fonction gamma. Quant à la puissance éolienne récupérable par l'éolienne, elle est inférieure à la puissance disponible, son maximum théorique est autour de 59% de la puissance éolienne disponible .

En utilisant équation (II- 6), la densité de puissance éolienne moyenne est déterminée d'après les données relatives à la distribution de fréquence de la vitesse du vent de même, en utilisant les paramètres de Weibull, la densité de puissance est déterminée à partir d'équation (II-7).

Les valeurs de la densité de puissance éolienne moyenne pour le site d'Adrar calculée à partir des paramètres de Weibull et des données des fréquences de vitesse du vent sont obtenues égales respectivement à 280 W/m^2 et 283 W/m^2 . Ces résultats montrent que l'estimation de la densité de la puissance moyenne à partir des paramètres de Weibull donne des valeurs très proches de celles calculées à partir des données des fréquences de vitesse et par conséquent on peut dire que la fonction Weibull représente bien la distribution des vitesses du vent

II-6 Modélisation de l'éolienne:

Comme l'énergie produite par une éolienne dépend de sa courbe caractéristique puissance-vitesse, la modélisation est orientée vers cette caractéristique. Les modèles de puissance des éoliennes qui ont été développés dans la littérature rendent plus ou moins compte de la réalité selon la machine considérée .

Dans la littérature, de nombreux modèles sont présentés pour la simulation de la puissance fournie par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent pour tout type d'éolienne le choix d'un modèle approprié pour la simulation de la puissance de sortie de l'éolienne s'avère important .

Tous les modèles considèrent que la puissance produite par une éolienne est nulle dans les intervalles de vitesse du vent $V < V_d$ et $V > V_c$ et elle est maintenue constante et nominale pour l'intervalle $V_n < V < V_c$. V_d , V_n et V_c sont respectivement la vitesse de démarrage, la vitesse correspondante à la puissance nominale et la vitesse de coupure de la machine pour l'intervalle de vitesses du vent $V_d < V < V_n$, la puissance fournie par l'éolienne est fonction de la vitesse du vent et c'est dans cet intervalle que ces modèles diffèrent .

L'étude menée dans des travaux précédents montre qu'il n'existe aucun modèle mathématique qui soit adapté à tous les types d'éoliennes [10].

Cependant le modèle quadratique est celui qui présente, en général, la plus faible erreur quadratique et donc qui semble le plus adapté à la plupart des éoliennes testées. Ce modèle permettant de déterminer la puissance produite par l'éolienne P_{ge} , est décrit par l'équation suivante [11].

$$P_{ge}(v) = \left\{ \begin{array}{ll} P_{n,ge} \cdot \frac{v^2 - v_d^2}{v_n^2 - v_d^2} & v_d < v < v_n \\ P_{n,ge} & v_d \leq v < v_c \\ 0 & v \leq v_d \text{ et } v \geq v_c \end{array} \right\} \quad (II-8)$$

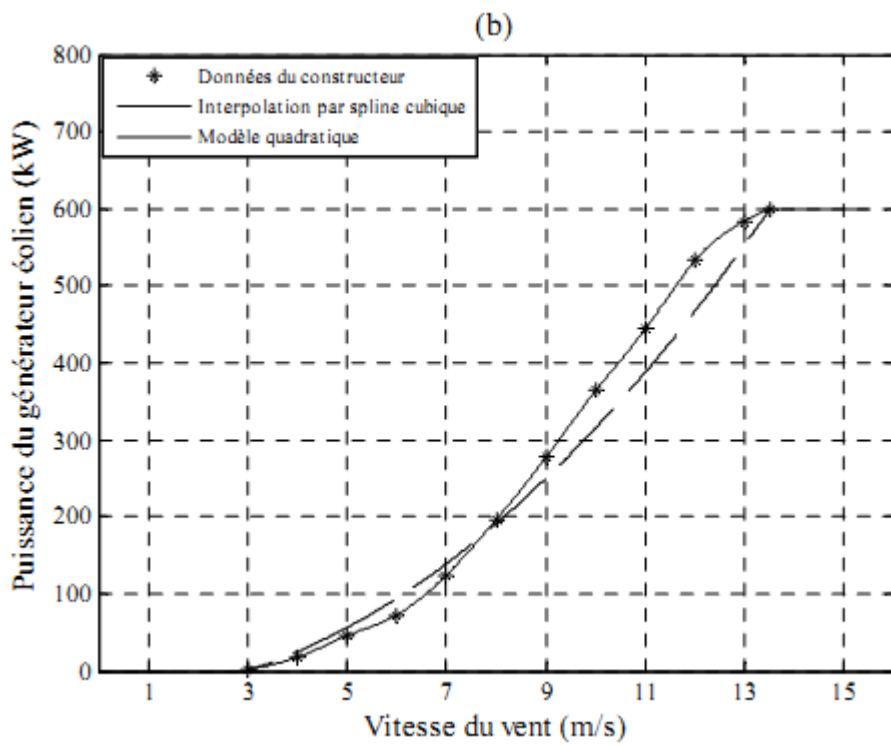
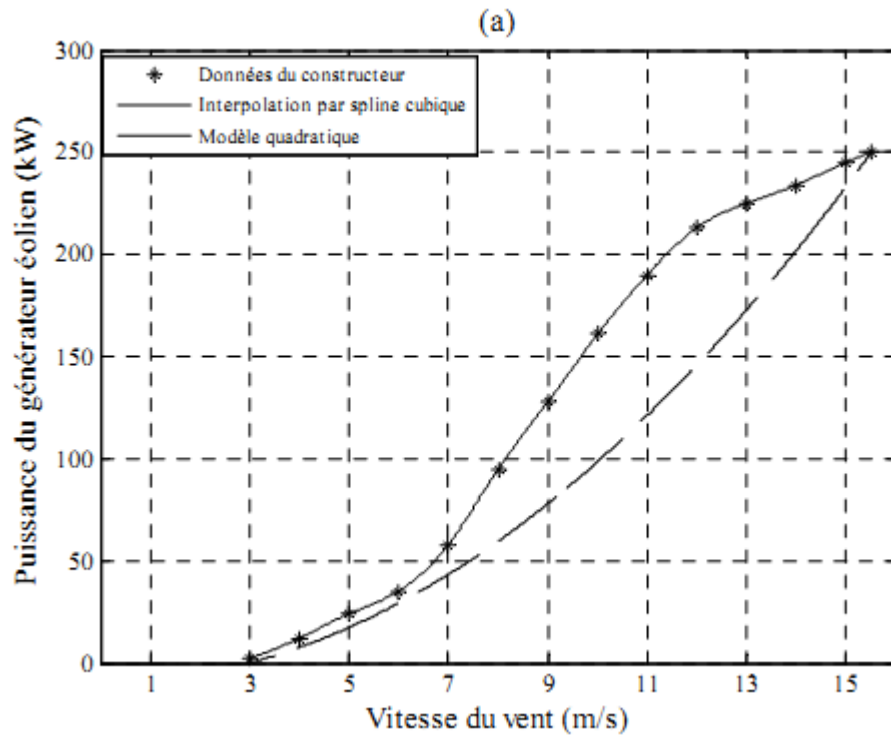
où $P_{n,ge}$ est la puissance nominale de l'éolienne, v est la vitesse du vent à la hauteur du moyeu.

Ce modèle utilisé pour l'estimation de la puissance de sortie de l'éolienne est appliqué aux données des quatre éoliennes (N29/250, N43/600, N54/1000 et N60/1300) fournies par les constructeur les données caractéristiques techniques des éoliennes sont présentées dans le(tableau II- 2). La vitesse de démarrage de toutes les éoliennes est comprise entre 3 et 4m/s, quant à la vitesse de décrochage, elle est égale à 25 m/s.

Type de l'éolienne	Nordex N29/250	Nordex N43/600	Nordex N54/1000	Nordex N60/1300
Puissance nominale(KW)	250	600	1000	1300
Vitesse démarrge(m/s)	3-4	3-4	3-4	3,5
Vitesse nominale(m/s)	15,5	13,5	14	15
Diamètre rotor(m)	29,7	43	54	60
Hauteur du moyeu(m)	30.40.50	40.50.60	50.60.70	50.60.70

Tableau II- 2: Données techniques des éoliennes.[12]

La figure (II-7) montre les caractéristiques puissances-vitesses de ces quatre éoliennes, à partir des données des constructeurs ainsi que les résultats de simulation de ces caractéristiques issus du modèle présenté dans cette étude.



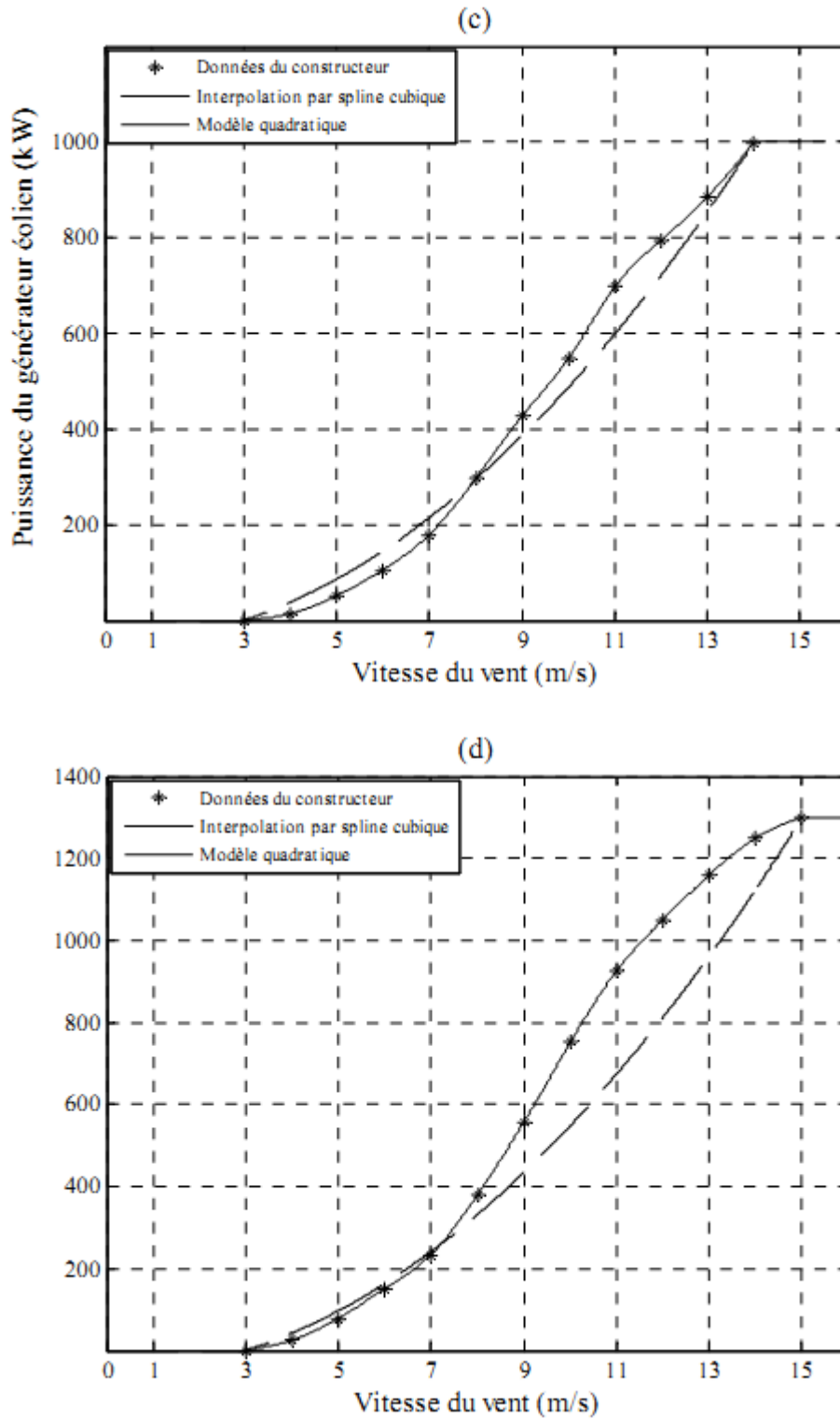


Figure II-7: Courbes de puissances des éoliennes [12]

a) Nordex N29/250

b) Nordex N43/600,

c) Nordex N54/1000

d) Nordex N60 :1300

Ces résultats montrent qu'à l'exception de l'éolienne N29/250, le modèle quadratique est bien adapté par rapport au trois autres éoliennes pour l'estimation de leur puissance de sortie. de plus, on constate que ce modèle quadratique sous-estime la puissance du fait que l'erreur moyenne relative est puissance du fait que l'erreur moyenne relative est inférieure à zéro ($ERM < 0$). Ce constat est basé sur les valeurs des coefficients statistiques à savoir l'erreur relative moyenne et l'erreur moyenne quadratique relative .

II-7 Estimation de l'énergie éolienne produite:

L'énergie produite par les différentes éoliennes est estimée en utilisant la courbe de puissance de l'éolienne et les données horaires de la vitesse du vent du site d'Adrar. Dans ce travail, la puissance de sortie de l'éolienne est estimée par l'interpolation des valeurs des données fournies par le constructeur par la méthode splines cubiques qui permet d'avoir des bons résultats en utilisant des polynômes de degrés inférieurs[13]. L'énergie produite par les différentes éoliennes est estimée pour plusieurs hauteurs qui présentent les hauteurs du moyeu des éoliennes commerciales présentées dans cette étude. Les résultats sont présentés dans le tableau (II-3):

Puissance de l'éolienne (W)	Production d'énergie annuelle à différentes Hauteurs (MWh)			
	40 m	50 m	60 m	70 m
250	804	850	888	920
600	1835	1951	2047	2129
1000	2794	2982	3138	3271
1300	3701	9344	4147	4320

Tableau II-3: production d'énergie annuelles des éoliennes pour différentes hauteurs du moyeu (site d'Adrar)[10].

L'un des paramètres de performance des éoliennes que doivent connaître le concepteur et l'utilisateur est le facteur de capacité de l'éolienne. Il correspond à l'énergie électrique annuelle produite par une éolienne E_{ap} divisée par sa production théorique nominale (maximale) annuelle E_{am} . Il est donné par l'équation suivante:

$$f_c = \frac{E_{ap}}{E_{an}}$$

(II-9)

Les valeurs de l'énergie annuelle produite par les différentes éoliennes sont utilisées pour la détermination du facteur de capacité de l'éolienne .

Les valeurs du facteur de capacité déterminé pour les différentes éoliennes présentes dans cette étude et pour différentes hauteurs sont comparées et présentées en (figure II-8).

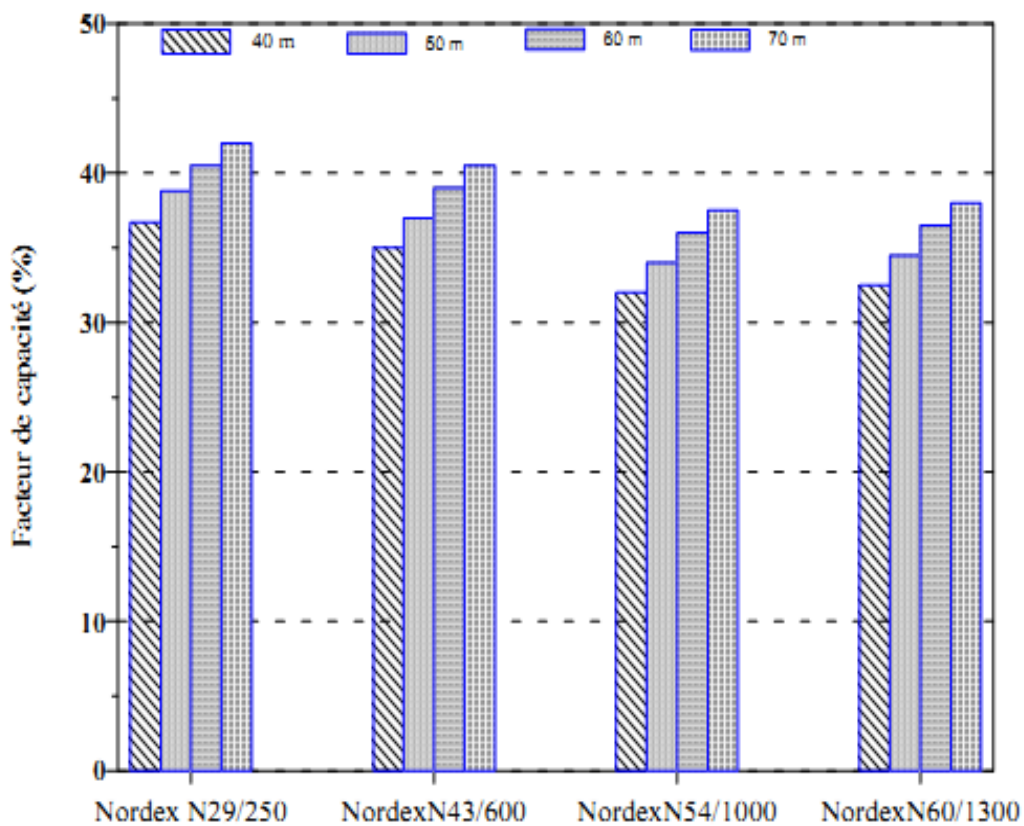


Figure II-8: Comparaison des facteurs de capacité obtenus pour différentes éoliennes et différentes hauteurs.[12]

Ces résultats montrent que le facteur de capacité augmente avec la diminution de la taille de l'éolienne. La valeur maximale du facteur de capacité, estimée à 42%, est obtenue pour une hauteur de 70 m pour l'éolienne Nordex N29/250 .

Les valeurs du facteur de capacité pour ces différentes éoliennes varient du 32% à 42% .

II-7-1 Production d'énergie d'une ferme éolienne :

Dans cette étude, la production d'énergie mensuelle a été estimée pour une ferme éolienne de 20MW composée de 20 éoliennes de puissance nominale de 1000 kW chacune avec une hauteur de 70 m les résultats sont présentés dans la(figure II- 9).

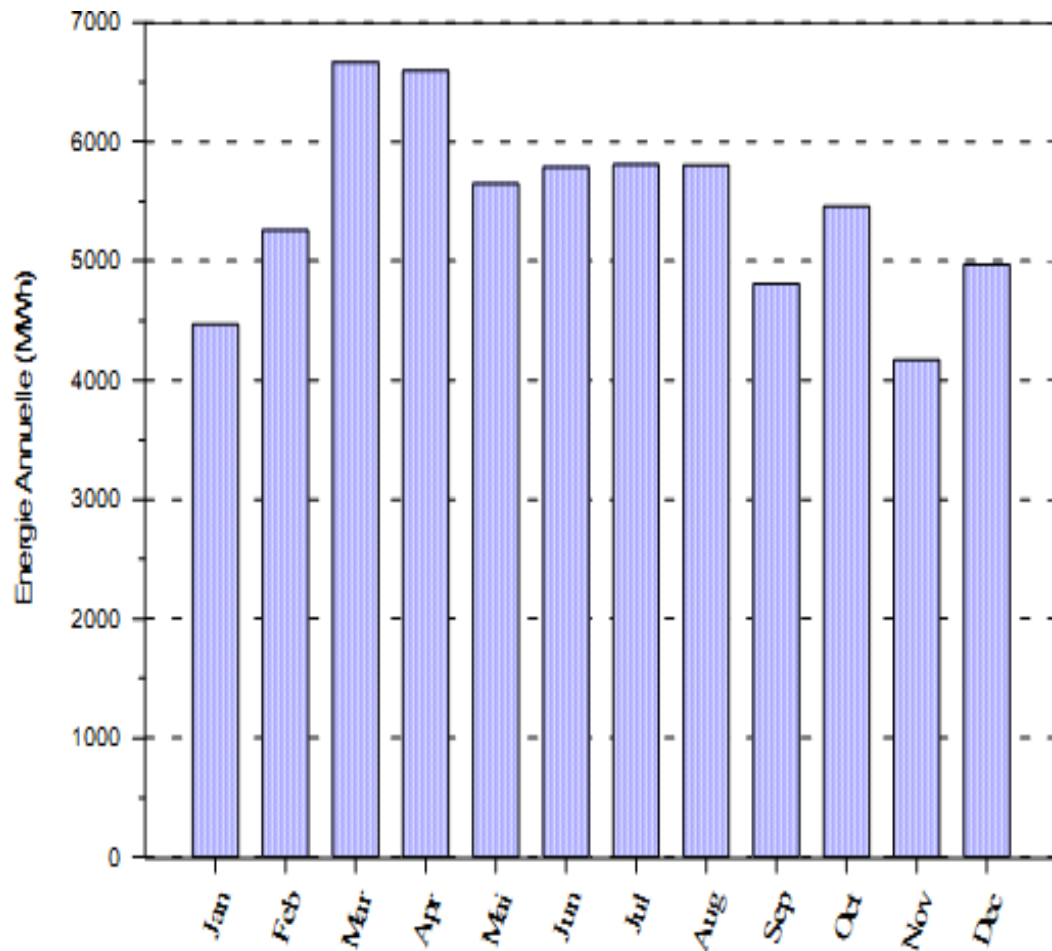


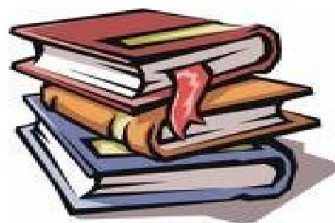
Figure II-9 Production d'énergie d'une ferme éolienne de 20 MW (à une hauteur de 70 m).[12]

Ces résultats montrent que la ferme éolienne proposée permet, d'une part, de produire une importante énergie estimée à plus de 65 GWh d'énergie correspond à environ 0,21% de la consommation électrique nationale (30,7 TWh en 2007) et d'autre part d'injecter cette énergie dans le réseau et de réduire de 65 000 tonnes environ de CO₂. [12]

II-8 Conclusion:

Ce chapitre présente une étude relative d'une part à l'estimation du potentiel des ressources énergétiques éolienne sur le site d'Adrar et d'autre part l'estimation de la production annuelle d'énergie d'une ferme éolienne .

Les résultats présentés montrent que le site d'Adrar dispose d'un potentiel énergétique éolien important et qui est plus favorable à l'exploitation de ce type d'énergie pour la production d'électricité, la production d'énergie est influencée par la hauteur du moyeu de l'éolienne. En effet, les résultats montrent qu'en passant d'une hauteur de 40 m à 60m, l'énergie produite par l'éolienne est augmentée de 11 %.



BIBLIOGRAPHIES

Chapitre II :

[1]Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 161 – 172
Estimation de la production éolienne d'électricité dans la région d'Adrar-Saïd Diaf.

[2]Annuaire statistique de l'année 2008, direction de la planification et de l'aménagement du territoire, WILAYA D'ADRAR, mai 2009

[3]R.Hamouche, « atlas vent de l'Algérie », publication interne de l'ONM ,office National de M étéorologie ,Alger,1990

[4]Fatiha Sebaa-Ben Miloud et R. Aissaoui"Etude du potentiel éolien d'AdrarSélection de sites pour la ferme éolienne de 10 MW"Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza (2010) 295 – 300
CREDEG, Sonelgaz

[5]R. Hammouche, 'Atlas Vent de l'Algérie', Office National de la Météorologie
Alger, 1991.

[6] Atlas vent de l'algérie, office national de la météorologie, dar-el-beida, Alger -1990
(pour une période de 11 ans).

[7]Pompage de l'Eau à l'Aide d'un Aérogénérateur Utilisation de L'Energie Eolienne pour le Pompage de l'Eau dans la Région d'Adrar -Centre de Développement des Energies Renouvelables Université des Sciences et Techniques de Blida .

[8]R. Hammouche, 'Atlas Vent de l'Algérie', Office National de la Météorologie
Alger, 1991.

[9]S. Diaf. Estimation de la production éolienne d'électricité dans la régions d'Adrar. Le 1^{er}Séminaire sur l'énergie éolien, SMEE'2010 ,Tipaza, 11 et 12 Avril 2010.

Bibliographie Chapitre II

[10]S. Diaf. Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé .Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Polytechnique El Harrach ,2009.

[11]H. Yang, L; Lu, W. Zhou. A nouvel optimization sizing model for hybrid solar wind power generation system.SolarEnergy, Vol.81 No 1, pp. 76-84, 2007.

[12]S. DIAF-D. DIAF,Evaluation du potentiel éolien et estimation de la production d'une ferme éolienne dans la région d'Adrar

[13]TJ.Akai.Applied numerical methods forengineers. 2nded. New York: John Wileyand Sons, Inc.; 1994.

[12]S. DIAF-D. DIAF,Evaluation du potentiel éolien et estimation de la production d'une ferme éolienne dans la région d'Adrar.

Chapitre III

Etude aérodynamique d'une petite éolienne

Bibliographie chapitre III

III-1 Introduction

La conception d'un aérogénérateur repose essentiellement sur la modélisation aérodynamique puisque cette machine utilise des pales caractérisées par une géométrie spéciale. Le dimensionnement de cette forme géométrique a un grand impact sur son rendement énergétique et par conséquent sur sa rentabilité économique.

Pour les petites éoliennes, où le coût du kilowatt reste encore élevé et le site d'implantation est généralement imposé, la modélisation aérodynamique prend une importance particulière. Cette modélisation a pour objectif de déterminer les paramètres géométriques optimaux de la pale (permettant de capter une puissance maximale), de calculer les efforts aérodynamiques ainsi que la puissance extraite. Pour réaliser cette modélisation, deux théories aérodynamiques sont utilisées en admettant plusieurs simplifications

III -2 Les enjeux de la modélisation aérodynamique instationnaire des éoliennes

L'éolienne est, par définition, un dispositif mécanique utilisant la force motrice du vent. Cette force peut être utilisée mécaniquement (dans le cas d'une éolienne de pompage), ou produire de l'électricité (dans le cas d'un aérogénérateur). La limite de Betz prouve qu'une partie seulement de la puissance cinétique du vent

peut être transformée en puissance mécanique via le rotor éolien. Par ailleurs, la plupart des codes actuels de calcul des efforts aérodynamiques reposent sur des simplifications susceptibles de nuire à la précision des résultats. Afin de proposer des éoliennes fiables et performantes, et de les dimensionner correctement, les constructeurs doivent donc disposer d'outils capables de calculer rapidement les efforts en service. Les enjeux actuels de la modélisation aérodynamique du rotor éolien peuvent être classifiés .

III-3 Aérodynamique du rotor éolien

L'estimation du champ de vitesses et des angles d'incidence par rapport aux profils des pales est un élément fondamental de prédiction de la charge dynamique sur le rotor ainsi que de la puissance produite par l'éolienne [1]. En effet, les paramètres régissant les forces aérodynamiques (portance, trainée) sur chaque section transversale de la pale sont : la vitesse relative, l'angle d'incidence, les propriétés physiques du fluide en écoulement et la géométrie

Bibliographie chapitre III

de la pale. Le sillage induit une vitesse sur chaque section de pale. Cette vitesse induite est à l'origine d'une évolution de la charge aérodynamique supportée par les pales, car elle engendre une modification de la valeur de l'angle d'incidence sur chaque section transversale de la pale

III-4 Méthodes de modélisation aérodynamique :

D'une éolienne Habituellement, les modèles d'écoulement autour du rotor éolien, supposent un fluide parfait et incompressible [2]. Parmi les méthodes les plus utilisées, on distingue :

III-4-1 Théorie de Froude-Rankine

Dans la théorie de Froude-Rankine [3], le rotor est considéré tel un appareil modifiant l'énergie cinétique du fluide qui le traverse.

Cette théorie suppose un écoulement monodimensionnel et un fluide parfait et incompressible à travers le rotor. La surface balayée par les pales du rotor est remplacée par un disque perméable facteur d'une discontinuité de pression.

Dans le cas d'une éolienne, ce disque extrait l'énergie cinétique du vent et provoque un ralentissement de l'air. Selon l'équation de continuité, le tube de courant enveloppant le disque augmentera son diamètre de l'amont à l'aval en traversant le rotor.

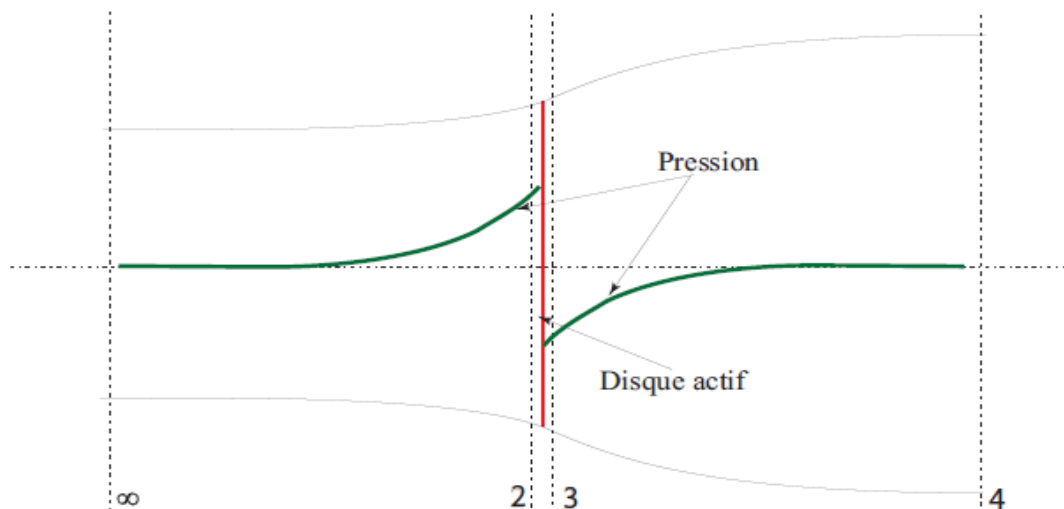


Figure III-1 : Remplacement de la surface balayée par les pales du rotor par un disque perméable [4]

Bibliographie chapitre III

Afin d'exprimer la puissance du rotor P en fonction du coefficient de vitesse axiale induite, on utilise la théorie de quantité de mouvement et l'équation de Bernoulli.

Grâce à cette méthode, il est possible de formuler la puissance du rotor en fonction du coefficient de vitesse axiale induite. Il est de même possible de démontrer que la puissance maximum extraite par le rotor n'excède pas $\frac{16}{27}$ de la puissance disponible (loi de Betz), pour une vitesse induite égale à un tiers de la vitesse à l'infini amont [4]. Cette méthode ne tenant pas compte de la présence des pales est souvent, pour cette raison, simultanément utilisée avec la théorie de l'élément de pale.

III-4-2 Théorie de l'élément de pale

Cette théorie repose sur le découpage de la pale en plusieurs tranches à l'aide de surfaces cylindriques et sur une étude de l'écoulement menée tranche par tranche (figure III-2). On suppose que l'écoulement dans un anneau est indépendant des autres on peut évaluer les caractéristiques intégrales du rotor. Pour obtenir les forces élémentaires, tranche de la pale est présentée comme une aile cylindrique soumise au vent relatif créé par la vitesse du vent à l'infini et par la rotation. Les forces aérodynamiques sont calculées à partir des coefficients de traînée et de portance du profil dépendants de l'angle d'incidence [5]. Les coefficients aérodynamiques sont obtenus à partir des essais et prennent en compte les effets de viscosité. L'intégration des forces aérodynamiques le long de la pale permet d'obtenir la force axiale, le couple et la puissance du rotor. La théorie de l'élément de pale donne des résultats satisfaisants à condition que les vitesses induites soient faibles. Or ce n'est pas le cas des éoliennes, qui fonctionnent souvent à une vitesse induite relativement grande, voisine d'un tiers de la vitesse à l'infini, afin d'approcher le point maximum d'énergie récupérable.

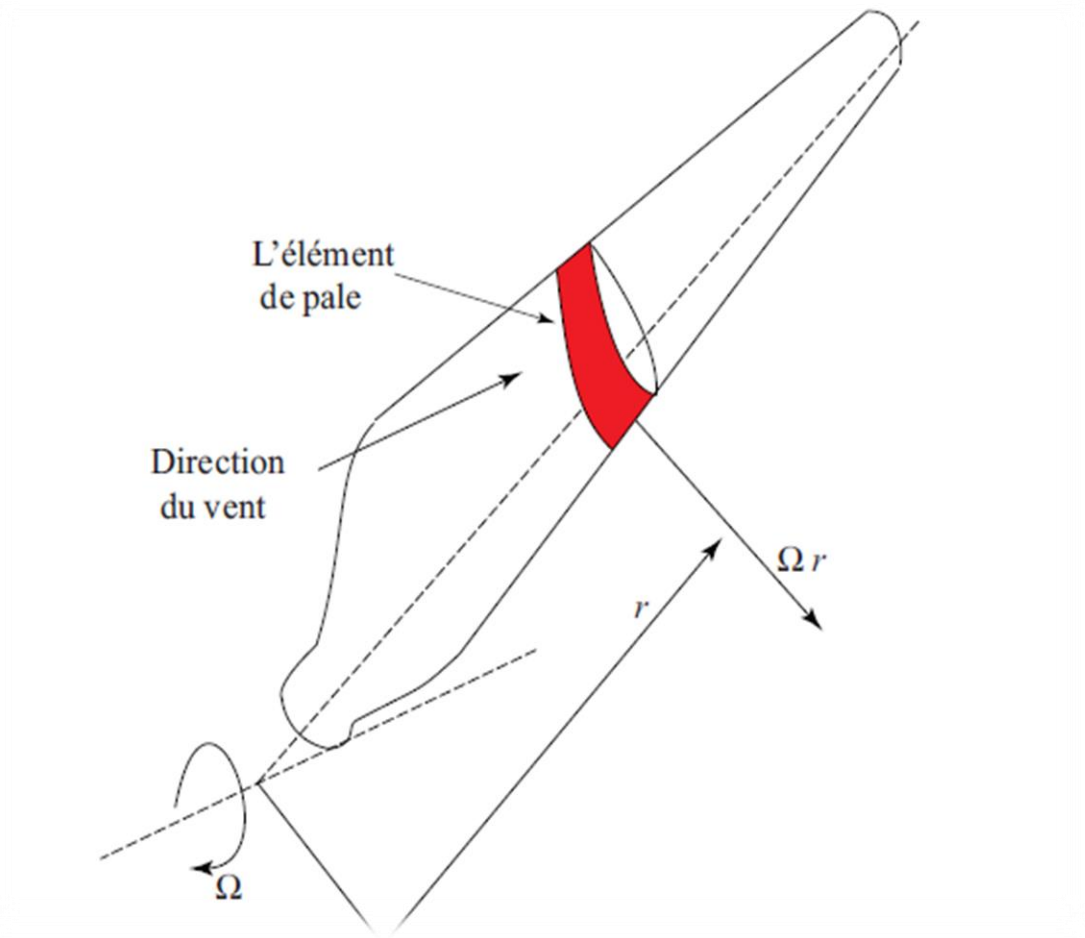


Figure III-2: Efforts subis par un élément de pale d'un rotor éolien soumis à un vent.

[5]

Cette méthode est donc souvent associée à des approches permettant de calculer la vitesse induite, telles la méthode de Glauert [6] ou la loi Biot-Savart.

III-4-3 Théorie de l'élément de pale-quantité de mouvement :

Cette approche est basée sur la théorie de l'élément de pale, mais la vitesse relative au profil est corrigée par les vitesses induites. Ici, la vitesse induite axiale est calculée pour chaque anneau élémentaire en appliquant le théorème de quantité de mouvement dans la direction axiale (figure III-3). La vitesse induite tangentielle est calculée à l'aide du théorème de quantité de mouvement angulaire. On tient ainsi compte du champ de vitesses perturbé par le rotor. Contrairement à la théorie monodimensionnelle de Froude-Rankine, les vitesses induites varient le long de la pale [7]. Par contre, elles sont moyennées dans la

Bibliographie chapitre III

direction azimutale. Cette théorie est actuellement améliorée à l'aide de différentes corrections prenant en compte le nombre fini de pales [8].

La prise en compte des effets tridimensionnels nécessite le recours aux polaires 2D corrigés ou aux polaires des profils tournants. Il existe également des corrections pour le fonctionnement de l'éolienne en dérapage (cas non axisymétriques), aux résultats satisfaisants et à faibles angles de désalignement. En raison de son calcul rapide et fiable, cette théorie est fréquemment utilisée par les fabricants d'éoliennes pour la conception et les études préliminaires et cela, en vue d'obtenir des résultats initiaux propices à lancer d'autres méthodes .

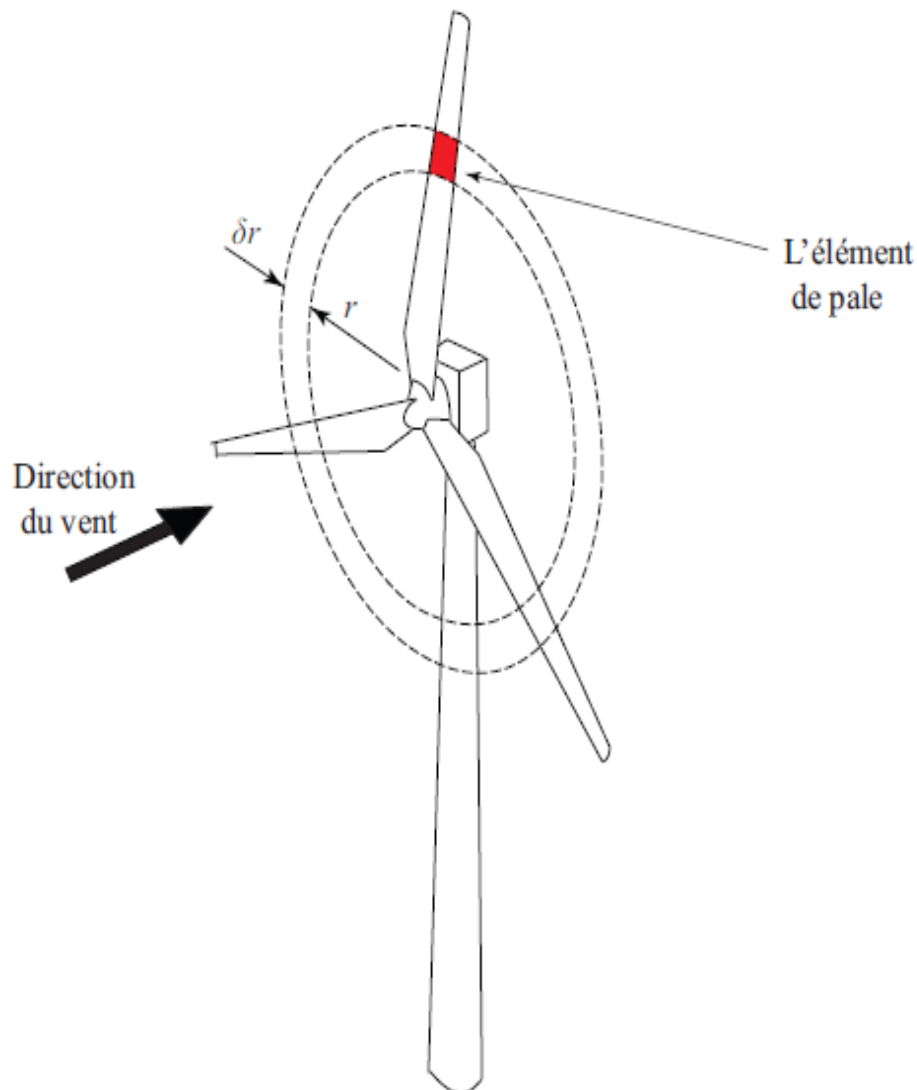


Figure III-3: Un élément de pale et un anneau balayé par cet élément

Bibliographie chapitre III

III-4-4 Méthodes "Dynamic Inflow" :

La théorie de l'élément de pale-quantité de mouvement donne de bons résultats dans les cas simples. Néanmoins, les résultats obtenus à l'aide de cette théorie ne sont pas satisfaisants pour les écoulements complexes, en cas de fonctionnement de l'éolienne en dérapage ou durant les rafales de vent [9]. Des méthodes spécifiques ont donc été développées pour aborder les cas instationnaires et non-symétriques. Ces méthodes prennent en compte l'irrégularité de la vitesse induite dans le plan du rotor et la variation temporelle du vent en amont et présentent la vitesse induite comme une série de polynômes orthogonaux [10].

Afin d'évaluer les effets instationnaires, la notion de masse apparente est introduite

Dans l'équation de quantité de mouvement. Ce terme permet en considération l'inertie du fluide associé au rotor. Une modélisation du décalage temporel entre le changement de la vitesse à l'infini et la puissance du rotor est ainsi possible. Ce modèle conduit à un système d'équations différentielles ordinaires quant à la relation entre les vitesses induites, la charge aérodynamique des pales et la vitesse en amont.

L'utilisation la plus répandue de ce modèle dans le domaine de l'éolienne est basée sur la méthode de Pitt et Peters . Malheureusement, les méthodes " dynamic inflow " recourent à plusieurs constantes empiriques [11]. En conséquence, les résultats obtenus ne sont donc fiables que si on en connaît les constantes temporelles liées au fonctionnement du rotor.

III-4-5 Méthodes basées sur la résolution des équations de Navier-Stokes (CFD) :

Avec l'augmentation de la puissance des ordinateurs, ces dernières années ont vu un recours croissant aux équations de Navier-Stokes, la résolution de ces équations constituant désormais la méthode de référence dans tous les domaines de la mécanique des fluides . Les avantages de cette méthode sont d'autant plus connus dans les cas d'écoulements très complexes [12].

Dans le cas de l'écoulement autour d'une éolienne (figure III-4), plusieurs travaux confirment la performance de cette méthode. Les résultats sont bons pour des vitesses de vent faibles et modérées [13] mais malheureusement moins fiables dans le cas de grandes vitesses, la différence avec les essais dévient alors non négligeable.

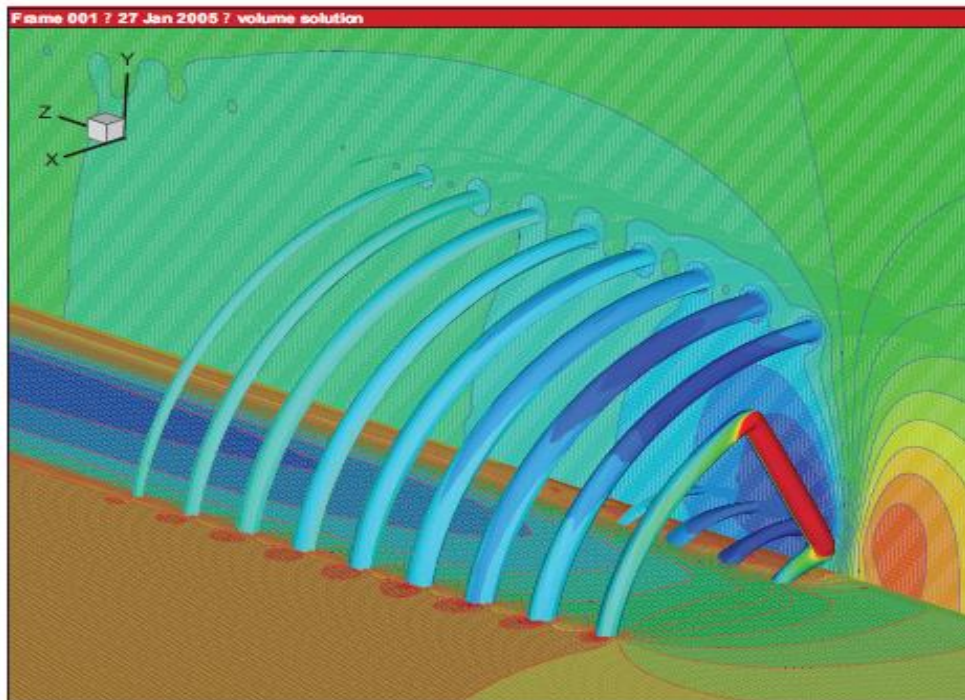


Figure III-4: Un élément de pale et un anneau balayé par cet élément [14]

Malgré de bons résultats dans la plupart des cas, les méthodes basées sur la résolution des équations de Navier-Stokes sont difficiles à associer à un code de calcul mécanique. En effet, pour calculer la puissance d'une éolienne sous l'effet d'une rafale de vent, les normes exigent une durée de simulation de 10 secondes.

Pour satisfaire aux conditions de convergence, le pas de temps de calcul doit être de l'ordre de 1.10^4 ce qui exige un temps du calcul prohibitif .

Actuellement, Les théories du disque actif et de la ligne active [15] sont les théories les plus utilisées, avec les équations de Navier-Stokes, dans l'étude du sillage visqueux à l'aval des éoliennes. La progression actuelle dans ce domaine permet d'illustrer la géométrie réelle d'une éolienne par un modèle hybride beaucoup plus simple et facile à réaliser.

III-4-6 Méthodes tourbillonnaires :

Les méthodes tourbillonnaires sont des méthodes potentielles basées sur le remplacement de l'écoulement réel au travers du rotor par un écoulement de fluide parfait au travers d'un

Bibliographie chapitre III

système tourbillonnaire équivalent . Ce système comporte des tourbillons attachés aux pales et des nappes de tourbillons libres détachées des pales. Les tourbillons attachés qui remplacent les pales sont rotatifs comme ces dernières et exercent des forces équivalentes sur le fluide. L'apparition de la nappe des tourbillons libres vient du théorème de Helmholtz selon lequel les lignes tourbillonnaires doivent être soit fermées, soit prendre naissance ou disparaître aux frontières du domaine de l'écoulement. Par exemple, lors du remplacement d'une aile par une ligne tourbillonnaire, la ligne tourbillonnaire ne peut pas se terminer aux extrémités de l'aile. Selon le théorème de Helmholtz, deux tourbillons marginaux apparaissent aux extrémités et sont émis pour se connecter entre eux à l'infini . Il est à noter qu'au travers d'une nappe tourbillonnaire libre, il se crée uniquement une discontinuité de la vitesse tangentielle, et non de la pression. Ainsi, les tourbillons libres ne subissent aucune force, et selon le théorème de Kutta Joukowski, le vecteur de la vitesse et le vecteur du tourbillon libre sont parallèles [16]. Suivant la représentation des pales du rotor, il existe deux groupes de méthodes tourbillonnaires :

III-4-6-a) Le premier groupe remplace la pale par une ligne portante :

L'avantage de la méthode de la ligne portante repose sur l'utilisation des caractéristiques des profils, donc sur la prise en compte des effets de viscosité et de compressibilité. L'inconvénient réside dans l'écoulement aux extrémités de la pale : il est tridimensionnel et l'application des caractéristiques aérodynamiques de profil ne peut donc pas être justifiée. La méthode de la ligne portante est largement utilisée pour les rotors d'éoliennes et d'hélicoptères où l'allongement de la pale est important .

III-4-6-b) Le second groupe de méthodes remplace la pale par une surface portante :

Largement utilisée dans le cas des hélices marines où les effets marginaux sont importants, les profils sont peu chargés et le fluide est incompressible. Chaque pale est remplacée par une surface de discontinuité de pression. Cette distribution de pression varie le long de la corde. La représentation de la pale et des conditions initiales au développement du sillage est ainsi améliorée par rapport aux méthodes de ligne portante [17].

Bibliographie chapitre III

III-5 Puissance du vent en fonction de sa vitesse :

vitesse (km/h)	Puissance (W/m ²)
0	0
3,6	1
7,2	5
10,8	17
14,4	39
18	77
21,6	132
25,2	210
28,8	314
32,4	447
36	613
39,6	815
43,2	1058
46,8	1346
50,4	1681
54	2067
57,6	2509
61,2	3009
64,8	3572
68,4	4201
72	4900
75,6	5672
79,2	6522
82,8	7452

Tableau III-1: La puissance du vent en fonction de la vitesse.

Bibliographie chapitre III

Un aérogénérateur permet d'extraire l'énergie cinétique contenue dans le vent et de la convertir en énergie mécanique ou électrique. Les centrales éoliennes de production d'électricité sont en pleine expansion. La puissance théorique de l'énergie éolienne est définie par :

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

ρ : la masse volumique de l'air au niveau de la mer (1,25 kg/m³ aux conditions T=20°C et P=1atm),

A: la section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor (m²)

V: vitesse du vent (m/s)

$$P_{effr} = C_e \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (\text{III-2})$$

P_{eff} : puissance effective de l'énergie éolienne.

C_e : Coefficient de rendement de la puissance[18].

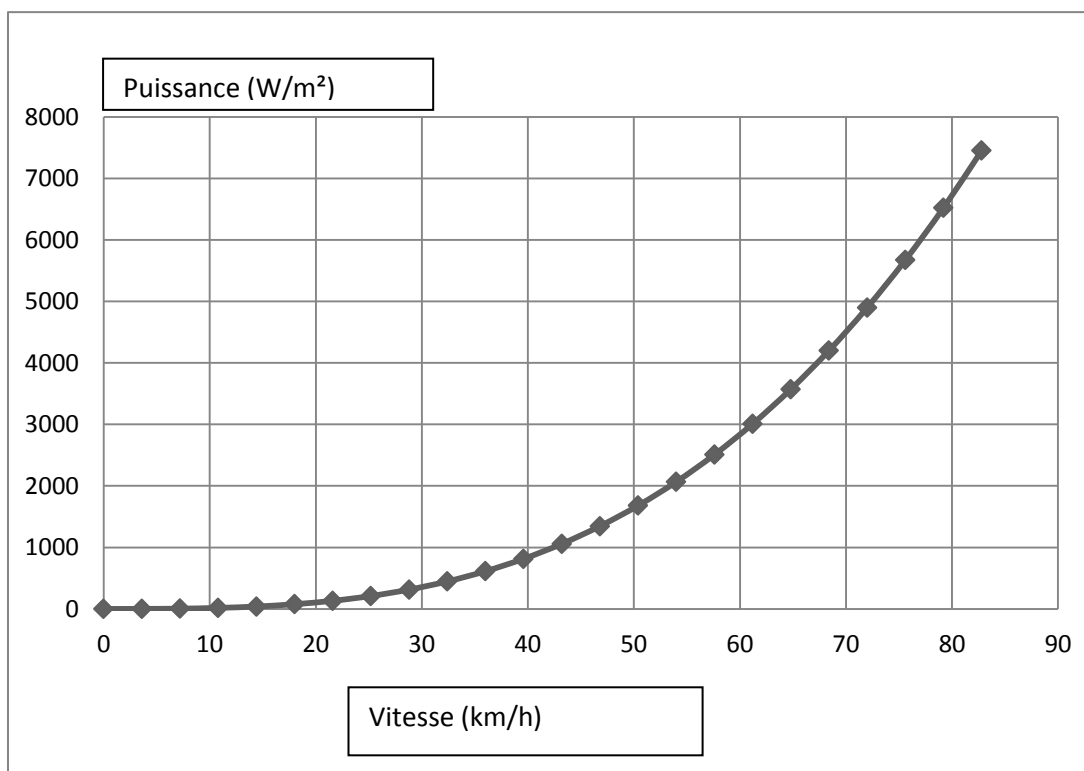


Figure III-5 : Puissance du vent en fonction de la vitesse

Bibliographie chapitre III

D'après le courbe on remarque que la puissance du vent augment de 0 à 7452 W/m² quand la vitesse augment de 0 à 82,8 km/h.

III-6 Limite de Betz en fonction de la vitesse du vent :

vitesse du vent (km/h)	limite de betz (W/m ²)
0	0
3,6	0,625
7,2	3,125
10,8	10,625
14,4	24,375
18	48,125
21,6	82,5
25,2	131,25
28,8	196,25
32,4	279,375
36	383,125
39,6	509,375
43,2	661,25
46,8	841,25
50,4	1050,625
54	1291,875
57,6	1568,125
61,2	1880,625
64,8	2232,5
68,4	2625,625
72	3062,5
75,6	3545
82,8	4657,5

Tableau III-2: Estimation la limite de betz du en fonction de sa vitesse du vent.

Bibliographie chapitre III

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à $\frac{16}{27}$, soit environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique.

Dans le cas d'une hélice de diamètre D, la limite de Betz est égale à :

$$P = 0,37 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \varrho^3 \quad (\text{III-3})$$

$$P = 0,29 \cdot D^2 \cdot \varrho^3 \quad (\text{III-4})$$

La puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle :

- au carré des dimensions du rotor
- au cube de la vitesse du vent

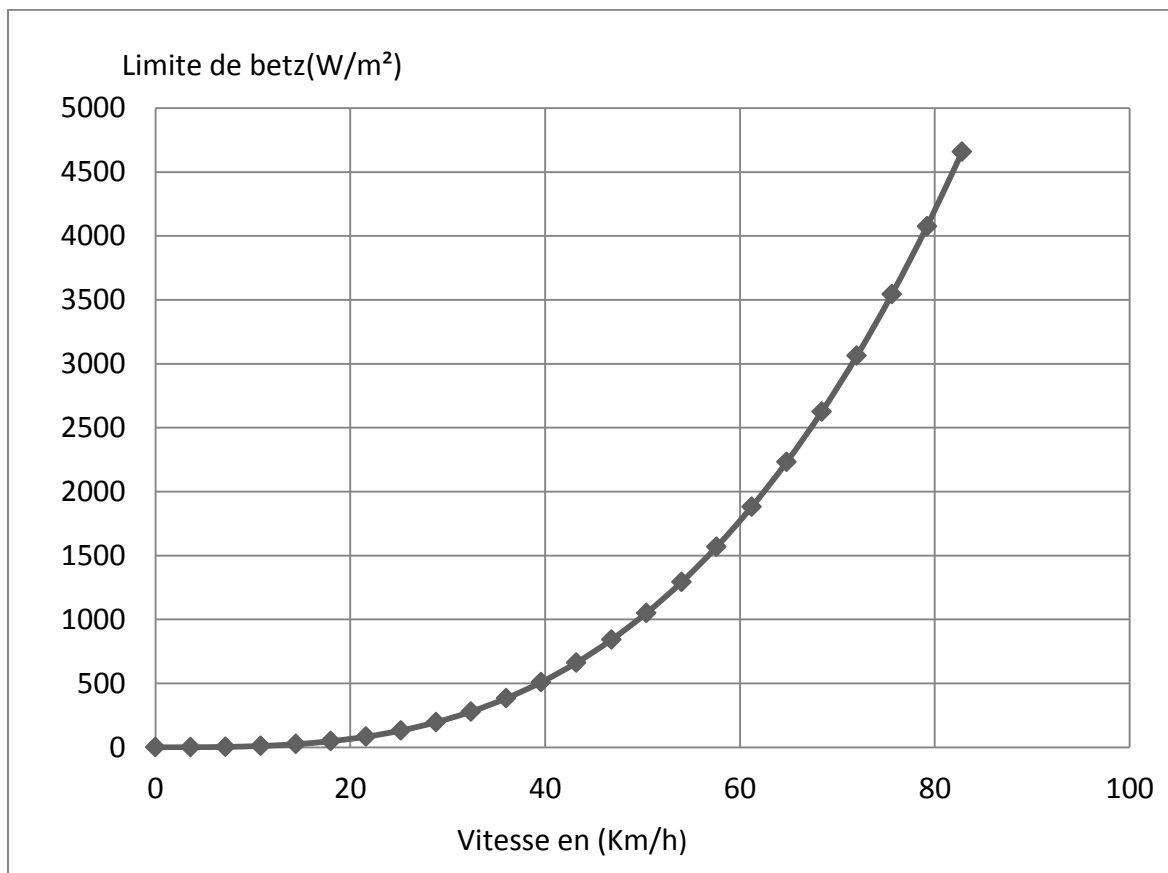


Figure III-6- la limite de Betz en fonction de la vitesse du vent .

Bibliographie chapitre III

D'après le courbe on remarque que la limite de Betz augment de 0 à 4657,5 W/m² quand la vitesse du vent de l'éolienne augment de 0 à 82,8 km/h .

III-7 Diamètre de l'éolien en fonction de la puissance souhaitée et de la vitesse du vent :

La longueur des pales est déterminée par la puissance du vent que l'on désire récupérer. La puissance récupérable P captée par le rotor est proportionnelle à la surface S que traverse la masse d'air. Cette surface est égale à la surface balayée par les pales de l'éolienne. Dans le cas classique, les pales de l'éolienne balayent une surface circulaire en forme de disque. La surface balayée est donc fonction du rayon du disque, donc de la longueur des pales.

$$P_{\text{captée par le rotor}} = \eta \cdot \frac{16}{27} \cdot P_{\text{vent}} = \eta \cdot \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad [\text{w}] \quad (\text{III-5})$$

où encore :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad [\text{w}] \quad (\text{III-6})$$

η : coefficient d'efficacité de perte ou de perte de puissance

D'où on peut trouver la longueur L des pales

$$\text{avec: } S = \pi \cdot L^2 \quad [\text{m}^2] \quad (\text{III-7})$$

D'où on trouve que :

$$L = \frac{\sqrt{(2 \cdot P_{\text{vent}})}}{\sqrt{(\pi \cdot \rho \cdot V^2)}} \quad [\text{m}] \quad (\text{III-8})$$

La vitesse de rotation : Comme on l'a vu précédemment, le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désiré. Aussi , la détermination de ce diamètre fixe la fréquence de rotation maximum de l'hélice afin de respecter des contraintes en bout de pales dues aux forces « centrifuge » [19].

on a :

Puissance Souhaité en Watts : 10000

Vitesse du vent en km/h : 35

Bibliographie chapitre III

Diamètre (m)	Vitesse de rotation des pales(TR/mn)
6,34280817	263,470248
6,72902954	220,753806
7,20373151	180,431057
7,76156377	143,539909
8,51719253	109,00444
9,41528909	78,8854631

Tableau III-3: Vitesse de rotation des pales de l'éolienne en fonction du diamètre

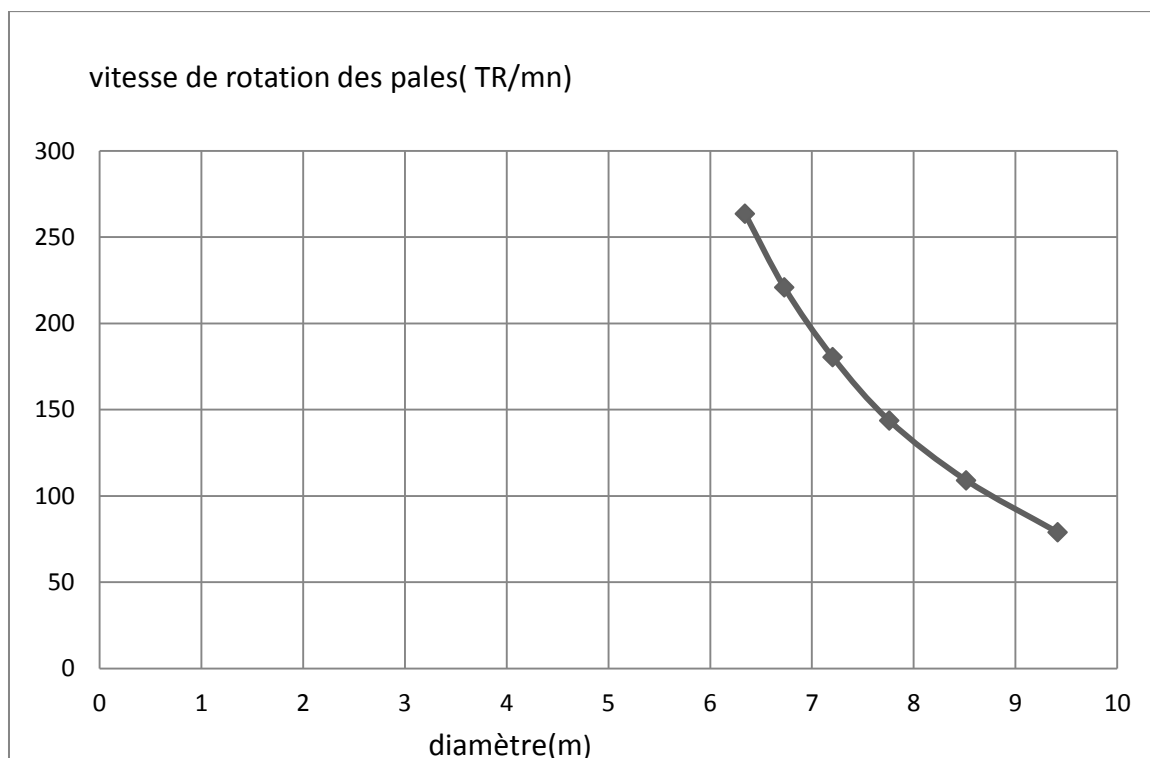


Figure III-7 : Vitesse de rotation des pales de l'éolienne en fonction de La diamètre

On observe que le vitesse de rotation des pales diminuer de 263,470248 à 78,8854631 avec l'augmentation de diamètre de 6,34280817 à 9,41528909 m

Bibliographie chapitre III

III-8 Rendement de l'éolienne en fonction de diamètre :

Diamètre (m)	Rendement %
2,8	6,59715
3	7,068375
6	14,13675
9	21,205125
12	28,2735
15	35,341875
20	47,341875

Tableau III-4:Rendement de l'éolienne en fonction de diamètre de l'éolienne

En remarque que le diamètre 2.8m donne 6,59715 de rendement .par contre le diamètre 30 m donne 70 ,6837 de rendement, alors l'augmentation du diamètre est favorable au rendement.

Bibliographie chapitre III

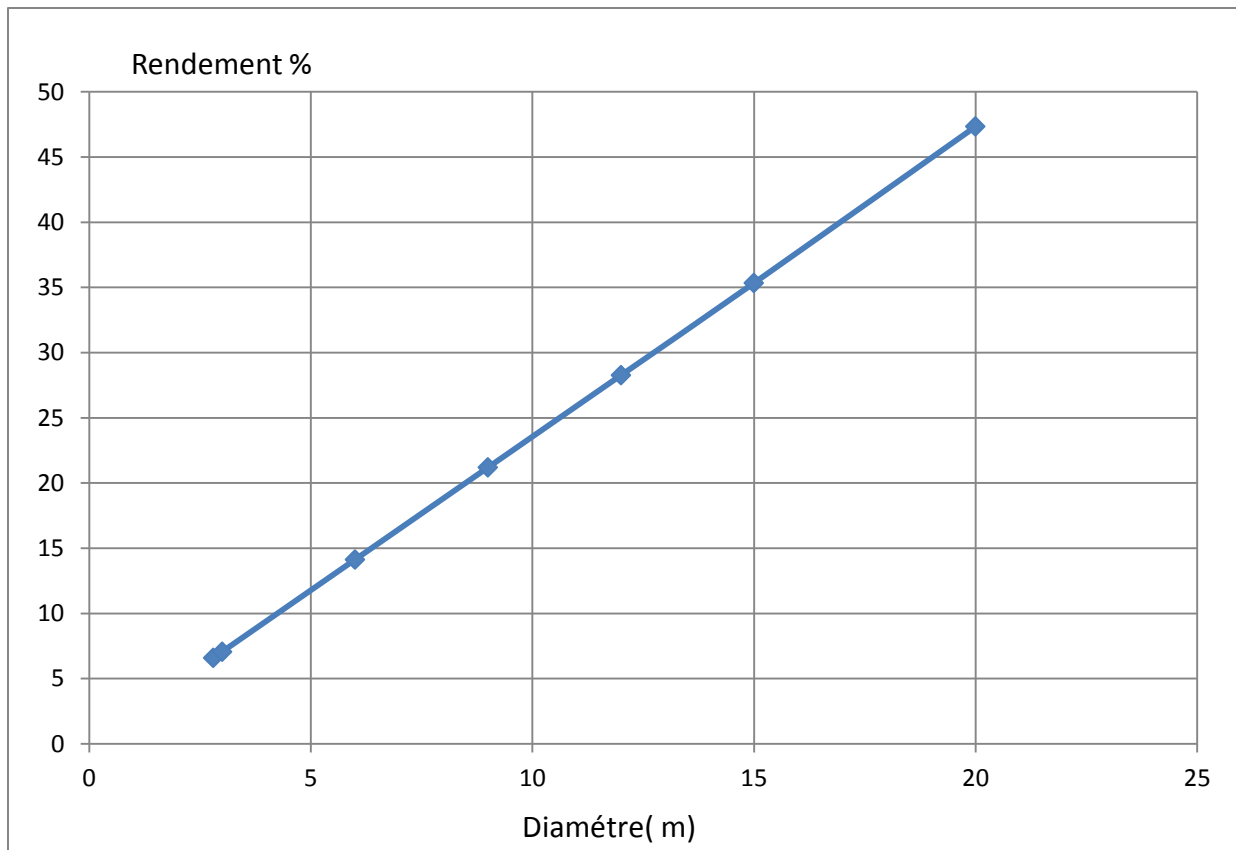


Figure III-8 : Rendement de l'éolienne en fonction de diamètre

III-9 Rendement de l'éolienne en fonction de vitesse de vent :

vitesse de vent (s)	Rendement
10	6.59715
12	5.497625
14	4.71225
16	4.12321875
18	3.6650833
20	3.298575

Tableau III-5: Rendement de l'éolienne en fonction de vitesse de vent

Bibliographie chapitre III

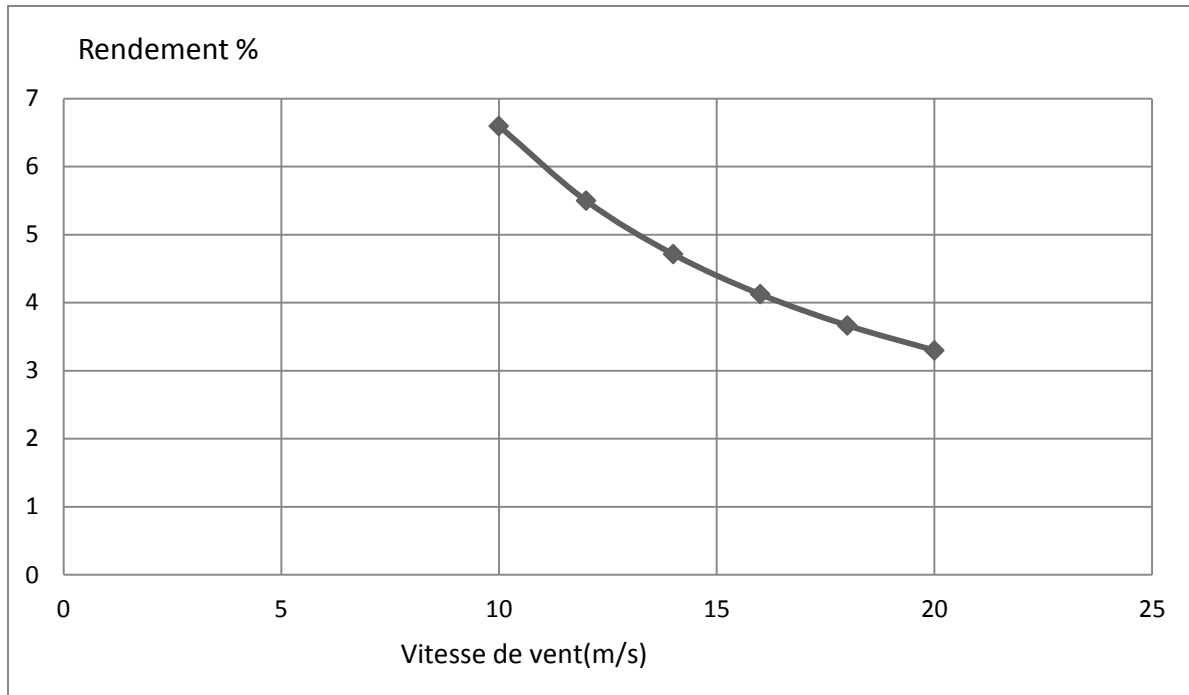


Figure III-9 : Rendement de l'éolienne en fonction de vitesse de vent

On distingue clairement la vitesse minimale de 10 m/s donne la plus grand rendement 6,59715 % .ce dernier vue diminuer avec l'augmentation de vitesse de vent jusqu'a la vitesse maximale de 20 m/s ou le rendement est de 3,298575 %.

III-10 Vitesse de rotation de l'hélice et de sa puissance mécanique :

On à comme données :

Diamètre de l'éolienne en (m)	1,3
rayon début de la surface active en (m)	0,15
Vitesse du vent (km/h)	38
Besoins de vitesse de génératrice	900
Nombre de pale	3
Rendement du multiplicateur en %	100
Rendement énergétique du générateur en %	40
Tension nominale du générateur (Volts)	12
Coefficient de performance = CP	0,37
Rayon de l'éolienne	0,65

Bibliographie chapitre III

Surface inutilisé	0,0707
vitesse du vent m/s	10,556
Circonférence	4,084
surface de réception	1,2566

vitesse de vent Km/h	Puissance mécanique du rotor
38	456,8226
40	637,786954
45	908,099003
50	1245,678
55	1657,99695
60	2152,53097
70	3418,13946
80	5102,29564
100	9965,42116

Tableau III-6 : Puissance mécanique du rotor en fonction de la vitesse de rotation du vent

Bibliographie chapitre III

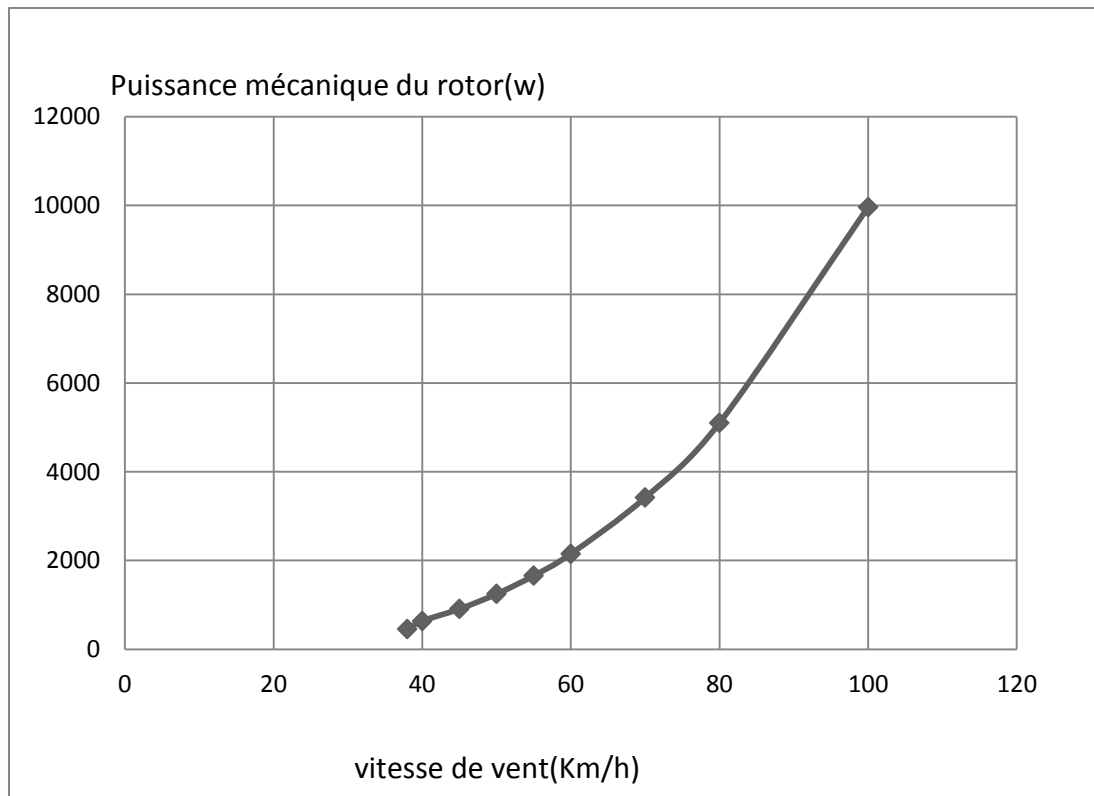


Figure III-10 : Puissance mécanique du rotor en fonction de la vitesse de rotation du vent

III-11 Vitesse de rotation du rotor et sa puissance mécanique:

Données :

Diamètre de l'éolienne en mètres	1.33	Rayon de l'éolienne	0.665
Coefficient de puissance = C_p	0.25	Vitesse de vents m/s	0.069444444
surface de réception	1.192919354	circonférence	4.178195

Bibliographie chapitre III

Vitesse de rotation rotor(m/s)	Puissance mécanique rotor(w)
8,052206	280,0252
12,7866	326,6961
19,08671	373,367
27,17619	420,0378
37,27873	466,7087
49,61799	513,3796
64,41765	560,0505
81,90137	606,7213
102,2928	653,3922
125,8157	700,0631
152,6937	746,7339
183,1504	793,4048
217,4096	840,0757
255,6948	886,7465
298,2298	933,4174
345,2383	980,0883
396,9439	1026,759
453,5703	1073,43
515,3412	1120,101
582,4802	1166,772
655,211	1213,443
733,7572	1260,114
818,3427	1306,784
909,1909	1353,455

Tableau III-7 : Vitesse de rotation en fonction de la puissance mécanique rotor

Bibliographie chapitre III

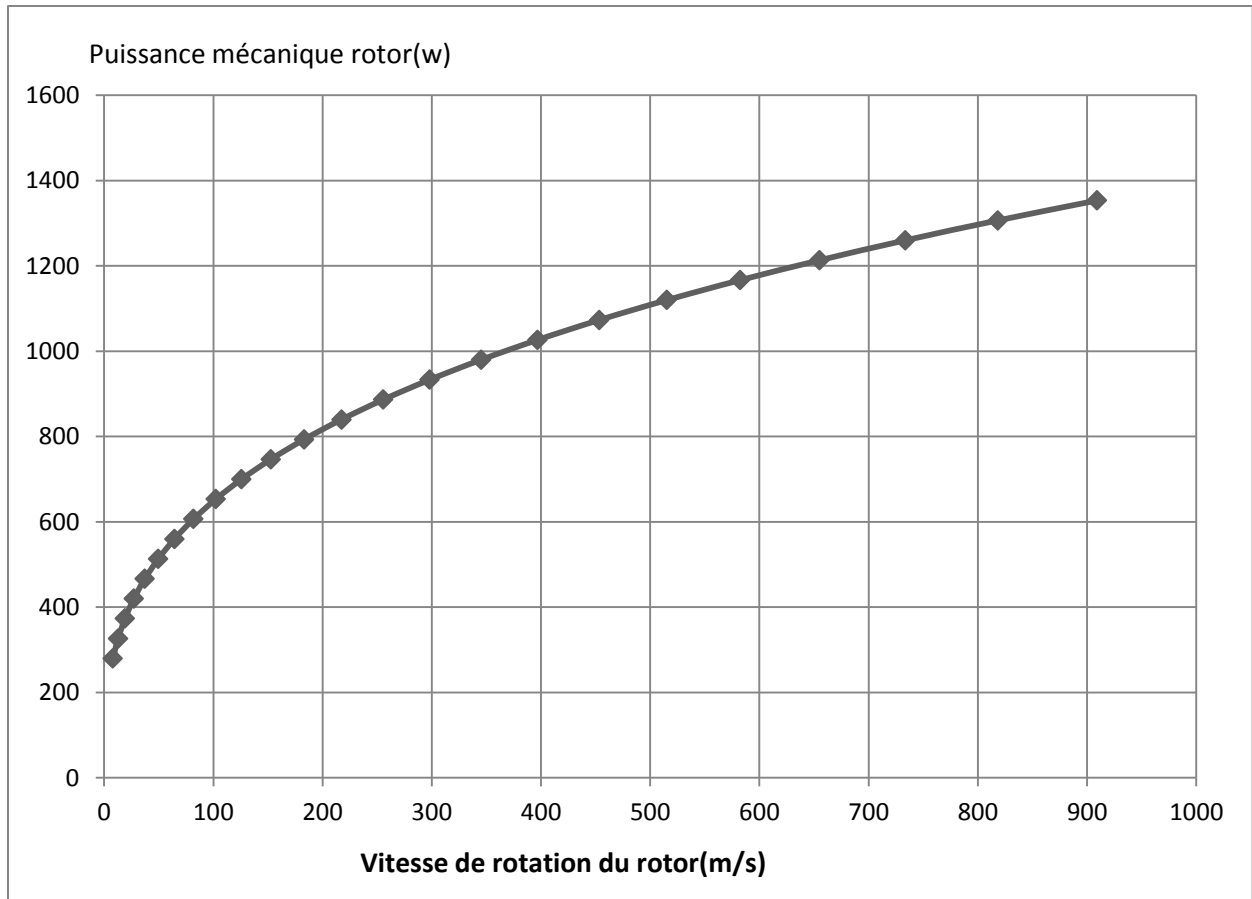


Figure III-11 : Puissance mécanique du rotor en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

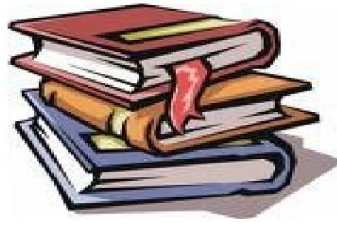
Comme il montre dans le figure (III-11) on remarque que le puissance mécanique rotor augment de 280,0252 (w) jusqu'à 1353,455 (w) quant le vitesse de rotation rotor augment de 8,052206 (m/s) jusqu'à 909,1909(m/s)

Bibliographie chapitre III

III-13 conclusion :

Une brève description des enjeux de la modélisation aérodynamique instationnaire des éoliennes a été présentée dans ce chapitre, ainsi que les sources d'instationnarité qui doivent être prises en compte dans le calcul. Les différentes méthodes de modélisation des chargements dynamiques des éoliennes ont de même été exposées ainsi que leurs limites. Un intérêt particulier est porté sur la méthode de sillage libre : cette dernière présente en effet de grands avantages aux niveaux du coût, de la sûreté de fonctionnement et de la fiabilité. La mise en œuvre de cette méthode sera l'objectif principal de ce travail. Le chapitre suivant mettra en œuvre la méthode de sillage libre permettant la modélisation de l'écoulement tridimensionnel à travers un rotor éolien. Il développera dans un premier temps le modèle aérodynamique représentatif de la pale, puis la méthode utilisée pour résoudre l'équation de l'évolution du sillage afin d'aboutir à l'organigramme du code de calcul développé. [21]

Bibliographie chapitre III



BIBLIOGRAPHIES

Chapitre III

- [1] AC Hansen et CP Butterfield : Aerodynamics of horizontal-axis wind turbines. Annual Review of Fluid Mechanics, 25(1):115–149, 1993.
- [2] A. Crespo, J. Hernandez et S. Frandsen : Survey of modelling methods for wind turbine wakes and wind farms. Wind energy, 2(1):1–24, 1999.
- [3] T. Burton et al. : Wind Energy Handbook. John Wiley and Sons, 2001.
- [4] D. Le Gourières : Énergie éolienne : Théorie, conception et calcul pratique des installations. Eyrolles, 1982.
- [5] T. Burton et al. : Wind Energy Handbook. John Wiley and Sons, 2001.
- [6] H. Glauert : Airplane propellers. Aerodynamic theory, IV:169–360, 1963.
- [7] DJ Sharpe : A general momentum theory applied to an energy-extracting actuator disc. Wind Energy, 7(3):177–188, 2004.
- [8] JN Sørensen et R. Mikkelsen : On the validity of the blade element momentum method. In Proceedings of the EWEC, Copenhagen, 2001.
- [9] W. Sheng, R.A.M.D. Galbraith et FN Coton : A modified dynamic stall model for low Mach numbers. Journal of Solar Energy Engineering, 130:031013, 2008.
- [10] PJ Carpenter et B. Fridovich : Effect of a rapid blade-pitch increase on the thrust and induced-velocity response of a full-scale helicopter rotor. NACA TN, 3044, 1953.
- [11] J.G. Leishman : Challenges in modelling the unsteady aerodynamics of wind turbines. Wind Energy, 5(2-3):85–132, 2002.

Bibliographie chapitre III

- [12] E.P.N. Duque, M.D. Burklund et W. Johnson : Navier-Stokes and Comprehensive Analysis Performance Predictions of the NREL Phase VI Experiment. *Journal of Solar Energy Engineering*, 125:457, 2003.
- [13] JN Sørensen et R. Mikkelsen : On the validity of the blade element momentum method. In *Proceedings of the EWEC, Copenhagen*, 2001.
- [14] S. Ivanell, J. Sørensen et D. Henningson : Numerical computations of wind turbine wakes. *Wind Energy*, pages 259–263, 2007.
- [15] 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 à l'école nationale supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [16] I.L. Ryhming : *Dynamique des fluides*. Pr. Polytechn. et Univ. Romandes, 1985.
- [17] J. Bhagwat et J. Leishman : Free-Vortex Filament Methods for the Analysis of Helicopter Rotor Wakes. *Journal of aircraft*, 39(5), September–October 2002.
- [18] T. Burton et al. : *Wind Energy Handbook*. John Wiley and Sons, 2001.
- [19] H. Glauert : Airplane propellers. *Aerodynamic theory*, IV:169–360, 1963
- [20] http://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude énergétique et aérodynamique d'une petite éolienne sur la région d'Adrar.

Dans la première partie, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

Et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Dans la deuxième et dernière partie de ce travail nous avons présenté la carte des vents de l'Algérie et les vitesses moyennes des vents de chaque région du pays, comment choisir un site éolien. nous avons consacré à l'étude de site isolé et traitement des données d'Adrar, nous a été indispensable d'argumenter le choix porté sur le site d'Adrar et traitement des données avec les résultats.

Nous avons donc délimité la région qui remplit un maximum des conditions favorables pour l'implantation d'une ferme éolienne D'où l'intérêt porté à la région d'Adrar dans notre étude.

Les résultats ont montré bien que le site d'Adrar présente que cette région est un site de plus ventées en Algérie balayé par des vents locaux durant toute l'année dont la vitesse moyenne qui dépasse le 6 m/s avec une puissance nominale de 2500 kW est environ 16.3 MW pendant une année, ce qui pourra faire l'objet d'un site éolien rentable.

Ainsi, les perspectives futures sont dans un premier temps la localisation précise de probables lieux d'implantation susceptibles de donner l'énergie optimale de la ressource éolienne en cette région, c.à.d. l'optimisation du choix de site dans cette région.

Ceci constituera une évaluation régionale du potentiel éolien, permettant de localiser les zones les plus ventées afin d'évaluer et optimiser le rendement des futurs parcs.

[اكتب عنوان المستند]

Pour réaliser cette évaluation régionale, il est nécessaire de disposer d'informations statistiques sur le vent local, afin d'en connaître les caractéristiques de leurs vitesses et de leurs directions pour passer ensuite à l'expérimentation.

