

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

UNIVERSITE AHMED DRAIA 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 diplôme de

MASTER en PHYSIQUE ENERGETIQUE

Thème

Modélisation et simulation de la pale d'une petite éolienne
appliquée au site d'Adrar

Soutenu le : 24 / 05 / 2017

Présenté par :

-BOREKBA Fatima

-BELAZGHEM Nour el houda

Promoteur :	Mr B. OMARI	Maitre assistant A	Univ. Adrar
Président :	Mr M. GUENFOUD	Maitre assistant A	Univ. Adrar
Examineur :	Mr T. BOUSSOUKAIA	Maitre de conférences B	Univ. Adrar

2016/2017

REMERCIEMENT:

On tient à remercier en tout premier lieu **DIEU** le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Après, nous remercions Monsieur **OMARI Boumediene**, Maitre assistant à l'université d'Adrar, qui nous a encadrés et suivi l'élaboration de ce travail. Il a été toujours disponible pour répondre à nos questions. Tous nos respects et nos profondes reconnaissances.

Notre remerciements vont de même aux autres membres de jury, Mr T. Boussoukaia, Maitre de Conférences et Mr M. Guenfoud, Maitre assistant à l'université d'Adrar, qui nous ont fait l'honneur de participer au jury afin d'évaluer et enrichir ce travail.

Notre gratitude aussi au département des Sciences de la Matière de l'université d'Arar et à tous nos enseignants tous cycles confondus. *On ne saurait oublier* de remercier nos camarades.

Enfin, une pensée affectueuse est adressée aux membres de nos familles en particulier nos mères, nos pères, nos sœurs et frères, pour leur soutien sans limite durant toutes nos années d'études.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

- ✓ *A ma chère mère, qui n'a jamais cessé de prier pour moi, que dieu la protège,*
- ✓ *A mes chers frères et sœurs,*
- ✓ *A ma chère petite fille « Rihabe »,*
- ✓ *A mon mari « Abdelaziz »,*
- ✓ *A ma cher amie, ma binôme, Nour el houda,*
- ✓ *A tous mes professeurs :*

Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect,

- ✓ *A tous mes amis, avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur,*
- ✓ *A mes camarades de promo du Département des sciences de la matière,*
- ✓ *A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

Fatima

DEDICACE

Je dédie ce travail à:

- Mon **PERE** qui ne cesse pas de m'encourager.
- Ma **MERE** pour Sa Tendresse profonde.
- Mon **MARI** "Moulay Abdellah" qui ne m'a laissé pas dans les moments difficiles.
- Mes chers Frères "Abdelkarime, Mouhamed".
- A Ma grande famille "Belazghem, Rahmani, Sambili".
- A mes amies et ma binôme Fatima de promo du Département des sciences de la matière "Physique Énergétique Renouvelables".
- Je ne saurais oublier de remercier tout les professeurs.

*« A tout ceux qui ont sacrifié leur temps pour la
science et à tous ceux qui utilisent la science pour
le bien et la prospérité de l'humanité ».*

Nour el houda



La liste des figures

Figure I-1: Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions	3
Figure I-2: Répartition d'énergie primaire dans le monde	4
Figure I-3: Estimation de la production mondiale d'électricité basée sur les EnR	4
Figure I-4: Photographie de deux moulins à vent.....	6
Figure I-5: Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde en GW	6
Figure I-6 : Parcs en Europe en 2003 en MW	7
Figure I-7: Evolution de la puissance moyenne unitaire des machines et baisse des coûts du kWh (conditions: amortissement sur 20 ans, taux d'intérêt: 5%/an).....	8
Figure I-8: Principaux composants d'une éolienne.	10
Figure I-9: variation de masse de la nacelle en fonction de diamètre du rotor.....	11
Figure I-10: variation de la masse d'une pale en fonction de diamètre du rotor.	12
Figure I-11: technologie éolienne à axe vertical.....	13
Figure I-12: Schéma de principe du rotor de Savonius	13
Figure I-13: Schéma du rotor de Darrieus	14
Figure I-14: technologie éolienne à axe horizontale.....	15
Figure I-15: Types d'éoliennes à axe horizontal.	16
Figure I-16-: Variations des vitesses moyennes du vent sur 1 an.	17
Figure I-17: les régions ventées en Algérie	18
Figure I-18: Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés	18
Figure I-19: Courbe de densité de probabilité à Hassi Rmal donnée par Wasp	19
Figure I-20: Régulation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent	19
Figure I-21: Puissances selon les tailles des éoliennes	20
Figure I-22: Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie	21
Figure I-23: Comparaison entre les vitesses cubiques des Sites Ventés	22
Figure I-24: Caractéristique de l'éolienne	22
Figure I-25: schéma illustre la portée de la pale pour une éolienne à axe horizontal	23
Figure I-26: schéma illustre la portée de la pale pour une éolienne à axe vertical	24
Figure I-27: Variation de portée en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne	24
Figure I-28: Photographie de « AOC 15/50 50 HZ »	26
Figure I-29: Photographie de « FUHRLANDER - FL30 »	27
Figure I-30: Photographie de « GUAL - STATOEOLIEN GSE 4»	28
Figure I-31: Photographie de « WINDSIDE - WS-4 »	29

Figure I-32: Photographie d'un éolienne Turby .	29
Figure I-33: Photographie d'un éolienne WARP.....	30
Figure I-34: Photographie d'un éolienne multirotor	30
Figure I-35: Photographie de « AOC 15/50 50 HZ ».....	31
Figure II-1: Description d'une pale d'éolienne	
.....	34
Figure II-2 : Triangle des vitesses et vent relatif .	35
Figure II-3: Système d'orientation des pales .	36
Figure II-4: Flux d'air sur un profil de pale "stall" .	36
Figure II-5: Coefficient de puissance	37
Figure II-6: Tube de courant autour d'une éolienne .	38
Figure II-7: Limite de Betz pour différentes turbines .	41
Figure II-8: Eude statistique des données du vent pour les sites de Tiaret, Adrar et InSalah [30].	42
Figure II-9: les courbes de détermination de C_p et λ	45
Figure III-1 :Variation journalière de la vitesse du vent (Janvier 2013).....	48
Figure III-2: Variation journalièr de la vitesse du vent (Février 2013).....	49
Figure III-3: Variation journalière de la vitesse du vent (Mars 2013).....	49
Figure III-4: Variation journalière de la vitesse du vent (Avril 2013).....	50
Figure III-5: Variation journalière de la vitesse du vent (Mai 2013).....	50
Figure III-6: Variation journalière de la vitesse du vent (Juin 2013).....	51
Figure III-7: Variation journalière de la vitesse du vent (Juillet 2013).....	51
Figure III-8: Variation journalière de la vitesse du vent (Aout 2013).....	52
Figure III-9: Variation journalière de la vitesse du vent (September 2013)	52
Figure III-10: Variation journalière de la vitesse du vent (October 2013).....	53
Figure III-11: Variation journalière de la vitesse du vent (November 2013).....	53
Figure III-12: Variation journalière de la vitesse du vent (Décember 2013).....	54
Figure IV-1 : Variation de puissance en fonction de la vitesse du vent pour un diamètre de l'éolienne 1.35m.....	55

Figure VI-2 Variation de rotation rotor en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.35m.....	56
Figure VI-3 Variation de puissance en fonction de la vitesse du vent pour un diamètre de l'éolienne 1.40m.....	56
Figure VI-4 Variation de rotation rotor en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.40m.....	57
Figure VI-5 Variation de puissance en fonction de la vitesse du vent pour un diamètre de l'éolienne 1.45m.....	57
Figure VI-6 Variation de rotation rotor en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.45m.....	58
Figure VI-7 Variation de puissance en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.50m.....	58
Figure VI-8 Variation de rotation rotor en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.50m.....	59
Figure IV-9 La largeur de couple d'une pale d'éolienne pour une longueur 105 cm.....	59
Figure VI-10 la largeur de couple d'une pale d'éolienne pour une longueur 110 cm.....	60
Figure VI-11 la largeur de couple d'une pale d'éolienne pour un longueur 115cm	60
Figure VI-12 Diamètre de l'arbre principale théorique en fonction puissance de l'éolienne pour une vitesse de rotation 300 Tr/mn.....	61
Figure VI-13 Rendement de la limite de Betz en fonction de vent nominal (pour différentes diamètre de l'éolienne)	61
Figure VI-14 Courbe de puissance mécanique et électrique en fonction du diamètre de l'éolienne.....	62
Figure VI-15: Courbe de pression de pale en fonction de rayon totale du disque.....	62

La liste des tableaux

Table (1-1) : Les éléments de coût recueillis auprès des constructeurs	9
Table (II-1) les valeurs de rugosité a en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement.....	43
Table (II-2) : les vitesses de vent moyen en fonction de la hauteur	44

Nomenclatures

EnR: Energie Renouvelable.

CDER: Centre de Développement de l'Energie Renouvelable.

GW: Giga Watt.

MW: Méga Watt.

TWh: Téra Watt heure.

KW: Kilo Watt.

KWh: Kilo Watt heure.

KWh/an: Kilo Watt heure par ans.

tr/mn: tour par minute.

N: un ensemble de valeurs mesurées de la vitesse du vent.

E: Energie produite.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

V:Vitesse du vent.

V_d : La vitesse de démarrage.

V_N : vitesse nominale.

V_M : La vitesse maximale admissible par l'éolienne

P: La Puissance active.

P_n : La Puissance nominale.

P_m : La Puissance mécanique.

: Vent de combinaison ou vent relatif. V_r

. Le rayon du cercle r:

R: Rayon de pale.

Cp: Coefficient de puissance.

$P_{turbine}$: Puissance produit par la turbine.

ρ : masse volumique de l'air.

Ω : La vitesse de rotation de l'éolienne.

λ : Rapport de vitesse.

V_{vent} : La vitesse du vent.

V_1 : La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.

V_2 : La vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne.

ΔE_C : La variation d'énergie cinétique du vent.

F: La fonction de répartition du vent..

F(v): La fonction de répartition.

$f(V)$: La densité de probabilité.

K: paramètre de forme caractérise la répartition du vent.

C: paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent.

n_m : Rendement de mécanique.

n_g : Rendement de glissement.

P_{ele} : Puissance électrique produit par l'éolienne.

F: Le coefficient de frottement du rotor de la génératrice.

C m: Le couple d'entraînement de la génératrice électrique.

Ω_m : La vitesse du rotor de la génératrice.

h_{nes} : La hauteur nécessaire de la tour.

V_{nes} : La vitesse du vent nécessaire de la tour.

Sommaire

I. Introduction générale	1
--------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction	3
I.2 Production d'Énergie Électrique à Partir des EnR	4
I.3 Principes et Éléments Constitutifs d'une Éolienne	5
I.3.1 Définition de L'énergie Éolienne	5
I.3.2 Historique de L'éolien	5
I.3.3 Données Chiffrées sur l'éolien	6
I.3.4 Constitution d'une Éolienne « Classique »	10
I.3.5 Modes d'installation et Différents Types d'éoliennes	12
I.4 Caractérisation du Vent	17
I.4.1 Répartition instantanée de la vitesse du vent	17
I.4.2 Répartition régionale de la vitesse du vent	17
I.4.3 L'histogramme des vitesses de vent	18
I.5 Production Optimale d'énergie	19
I.5.1 La surface balayée par le rotor	20
I.5.2 La densité de l'air et la vitesse du vent	21
I.6 Intérêt de la Vitesse Variable	22
I.7 Analyse De Sécurité	23
I.7.1 Cas des Éoliennes a Axe Horizontal	23
I.7.2 Cas des Éoliennes à Axe Vertical	23
I.8 Quelques Turbines Utilisées dans la Génération d'Énergie Éolienne	25
I.8.1 La Turbine « AOC 15/50 50 HZ »	25
I.8.2 La Turbine « FUHLANDER - FL30 »	26
I.8.3 La Turbine « GUAL - STATOEOLIEN GSE 4 »	27
I.8.4 La Turbine « WINDSIDE - WS-4 »	28

I.9 Recherches et Développements en Cours	29
I.9.1 Éolienne Turby	29
I.9.2 Le système WARP	30
I.9.3 Le Système des éoliens multi rotors	30
I.9.4 Le Système KiteGen	31
I.10 Quelques Chiffres Prévisionnels	31
I.11 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	31
I.11.1 Avantages	32
I.11.2 Inconvénients	32
I.12 Conclusion	32
 Chapitre II : Modélisation de la pale éolienne	
II.1 Introduction	32
II.2 Description d'une aile ou d'une pale d'éolienne	34
II.3 Triangle des vitesses sur une pale d'éolienne	34
II.4 Systèmes de régulation de vitesse d'une éolienne	36
II.4.1 Système à décrochage aérodynamique " Pitch "	36
II.4.2 Système à décrochage aérodynamique "Stall"	36
II.4.3 Système à décrochage aérodynamique "Active Stall"	37
II.5 Notions théoriques sur l'aérogénérateur	37
II.5.1 Coefficient de Puissance C_p	37
II.5.2 Couple produit par l'éolienne	38
II.5.3 Vitesse spécifique de l'éolienne	38
II.5.4 Limite de Betz	38

II.6 Distribution de Weibull	42
II.7 Influence de la hauteur.....	43
II.8 Exemples de dimensionnements.....	44
II.8.1 Longueur d'une pale et vitesse synchrone de la génératrice.....	44
II.8.2 Dimensions de l'aéromoteur.....	44
II.8.3 Dimensions de la génératrice.....	45
II.9 Relation entre la vitesse du vent nécessaire et la hauteur de la tour.....	46
 Chapitre III : Gisement éolien sur site d'Adrar	
III.1 Introduction.....	48
III.2 Vitesse du vent mensuelle dans le site d'Adrar	48
III.2.1 Pour l'année 2013.....	48
III.3 Conclusion.....	54
 Chapitre IV: Simulation d'une pale éolienne	
IV-1 Introduction	<u>55</u>
IV-2 Discussion des résultats	63
IV-3 Conclusion	64
Conclusion générale	65

Introduction générale

Introduction générale

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Dorénavant, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins [1]. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie.

Le potentiel de l'énergie renouvelable en Algérie est le plus important en Afrique du Nord [2].

Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, est d'amener la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 40% de l'électricité totale produite [2]. On cite ici l'installation de la centrale hybride de 150Mw à Hassi R'Mel, avec 25Mw, solaire thermique à concentrateurs.

Il est techniquement et économiquement capable de faire des efforts importants pour réduire les atteintes de l'activité humaine sur le climat et l'environnement. Une des possibilités est d'accroître le taux de production d'électricité à partir de ressources de type non-fossiles et renouvelables, et surtout l'énergie éolienne.

Tout comme l'énergie qui se trouve dans les combustibles fossiles, les énergies renouvelables (sauf les énergies marémotrice et géothermique) sont dérivées de l'énergie solaire. En effet, le soleil envoie chaque heure quelque 174.423.000.000.000 kilowattheures d'énergie à notre planète. La terre reçoit, en d'autres termes, une puissance équivalente à $1,74 \times 10^{17}$ W [3].

Environ un à deux pour cent de l'énergie émise par le soleil est converti en énergie éolienne. C'est entre 50 et 100 fois plus que l'énergie transformée en biomasse par l'ensemble des végétaux de la terre.

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisée. Son utilisation dans le passé était très répandue dans la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau, le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc....)

Vers les années 1950 de nombreux prototypes aérogénérateurs (machine qui transforme l'énergie cinétique du vent en électricité) ont été construits dans le monde ; mais ces installations ont été délaissées du fait de l'extension des réseaux interconnectés et des baisses de coûts de l'électricité conventionnelle.

Ces prototypes n'ont pas pu déboucher sur des applications commerciales à cause du coût élevé de l'électricité éolienne et la compétitivité, sans cesse croissante, des combustibles fossiles.

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement 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 oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 40 ans un essor remarquable notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent.

Notre travail consiste à étudier et optimiser les différentes composantes des éoliennes, notamment ces conceptions aérodynamiques d'où on va essayer de faire des simulations sur le profil des pales éoliennes et de suivre son influence sur leurs rendements énergétiques.

Notre manuscrit sera réparti en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre on va présenter des généralités sur les systèmes éoliens.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du système étudié.

Dans le troisième on va présenter les principaux paramètres énergétiques intervenant dans notre étude notamment le gisement éolien sur site d'Adrar.

Dans le dernier chapitre on présente les résultats de nos simulations sur le système étudié.

[1]: MOHAMMAD JAHANGIR KHAN «Dynamic Modeling, Simulation and Control of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System for Stand-Alone » Applications Seminar Faculty of Engineering & Applied Science Electrical Engineering.

[2]:<http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>. Historique des éoliennes.

[3]: <http://www.windpower.org/fr/stat/units.htm>.

Chapitre I

Généralités sur les

systèmes éoliens

I.1 Introduction:

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. La filière d'énergie renouvelable est partagée en trois grandes familles : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique,...) en sachant qu'à l'origine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. En effet, la consommation mondiale d'énergie (Figure I-1) ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétiques.

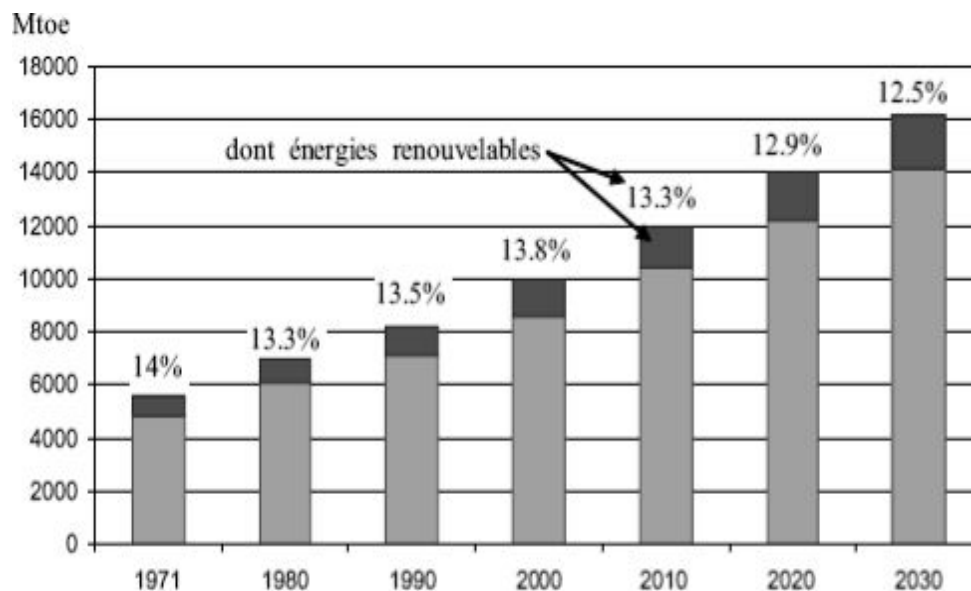


Figure I-1: Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions [1].

Plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir de matières fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou fissiles pour l'énergie nucléaire. (Figure I-2) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Ces *EnR*, pratiquement inépuisables et propres, sont intéressantes dans le contexte économique actuel où l'on ne chiffre qu'une partie des coûts en occultant certains « coûts collatéraux » (démantèlement de centrales, pollution,...).

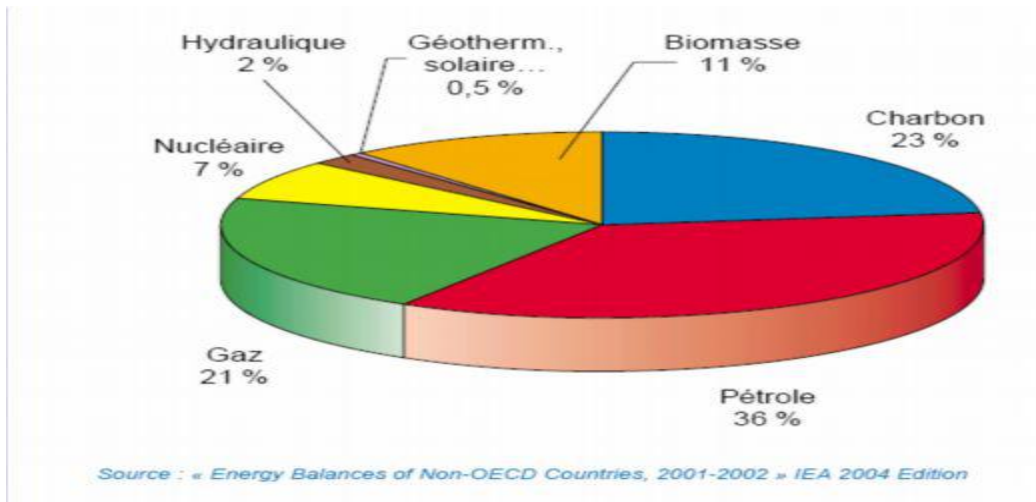


Figure I-2: Répartition d'énergie primaire dans le monde [2].

I.2 Production d'énergie électrique à partir des EnR:

La majorité des sources traditionnelles sont extraites des gisements puis acheminées vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être très éloignées, ce qui influera sur les coûts. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation.

C'est cette propriété qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable pour la production d'énergie électrique. La (Figure I-3) donne une idée sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que des prévisions jusqu'à l'horizon 2030 [1].

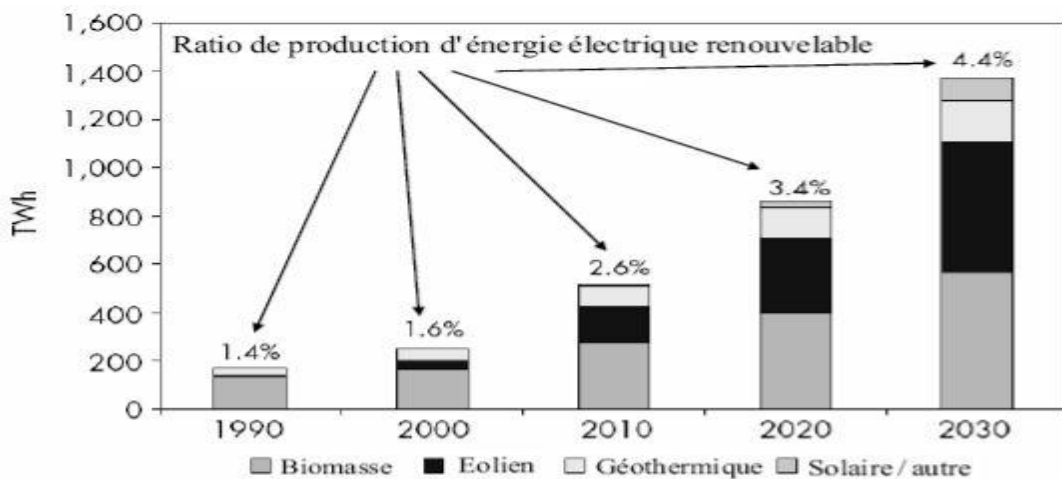


Figure I-3: Estimation de la production mondiale d'électricité basée sur les EnR [1].

I.3 Principes et éléments constitutifs d'une éolienne

I.3.1 Définition de l'énergie éolienne:

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées. Le système de conversion éolien est également siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion [3].

I.3.2 Historique de l'éolien:

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moudre du grain (Figure I-4). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à « **Poul La Cour** » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes [3].



Figure I-4: Photographie de deux moulins à vent [3].

I.3.3 Données chiffrées sur l'éolien:

I.3.3.1 Compétition de l'éolien:

Le potentiel des filières énergétiques renouvelables est sous-exploité. La (Figure I-5) montre que les améliorations technologiques ont favorisé l'installation de l'énergie éolienne qui évolue de manière exponentielle, L'Europe est le leader sur le marché mondial de l'éolien Cette production assure la consommation électrique d'environ 10 millions de personnes.

Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive :

- ✓ les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance ;
- ✓ l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes ;
- ✓ le financement des Etats pour l'implantation de nouvelles éoliennes.

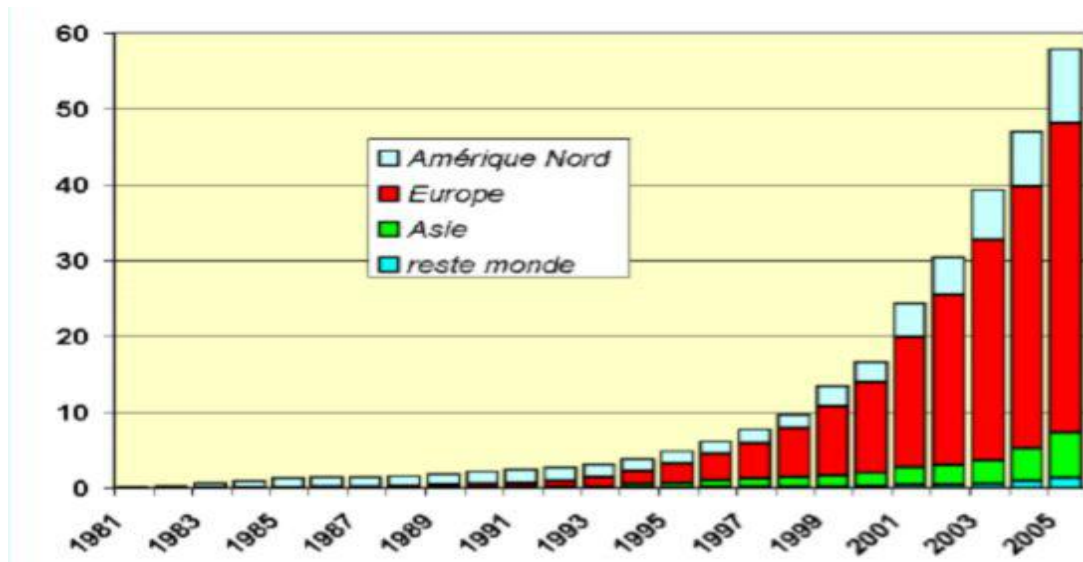


Figure I-5: Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde en GW [3].

La raison de cette évolution est le protocole de *Kyoto* qui engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord a participé à l'émergence de politiques nationales de développement de l'éolien et d'autres énergies également car les

éoliennes n'émettent pas de dioxyde de carbone. La répartition de l'énergie éolienne en Europe est donnée dans La (Figure I-6) : l'Allemagne est le leader sur le marché européen malgré un ralentissement de ses installations en 2003 ; l'Espagne, en deuxième position, continue d'installer intensivement des parcs éoliens ; le Danemark est en troisième position avec le développement de l'offshore et renouvelle les éoliennes de plus de 10 ans.

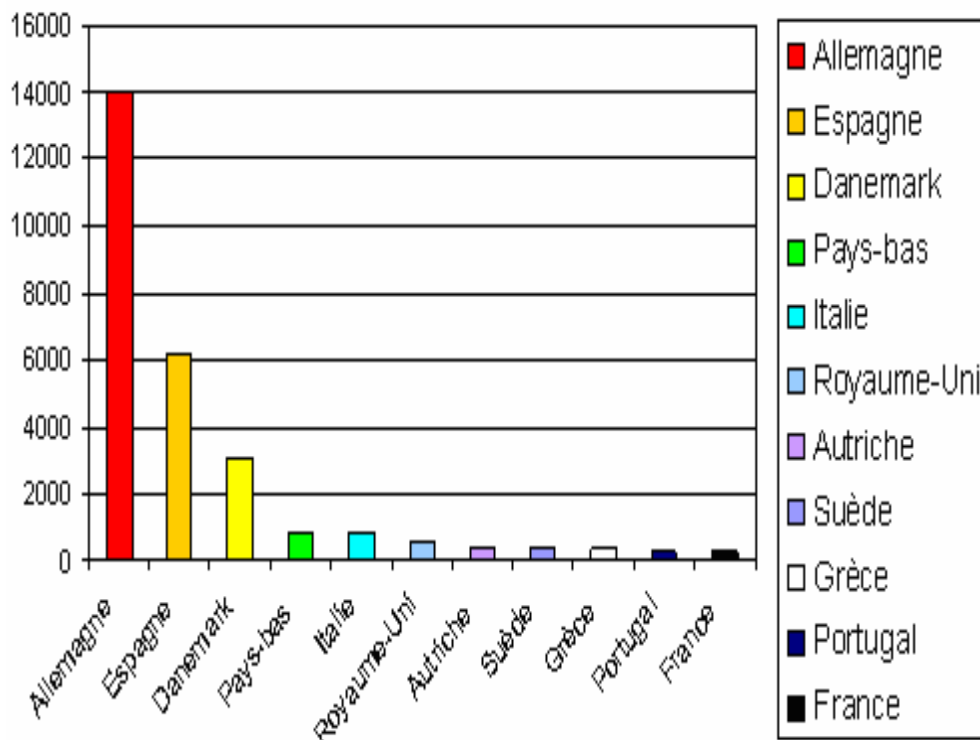
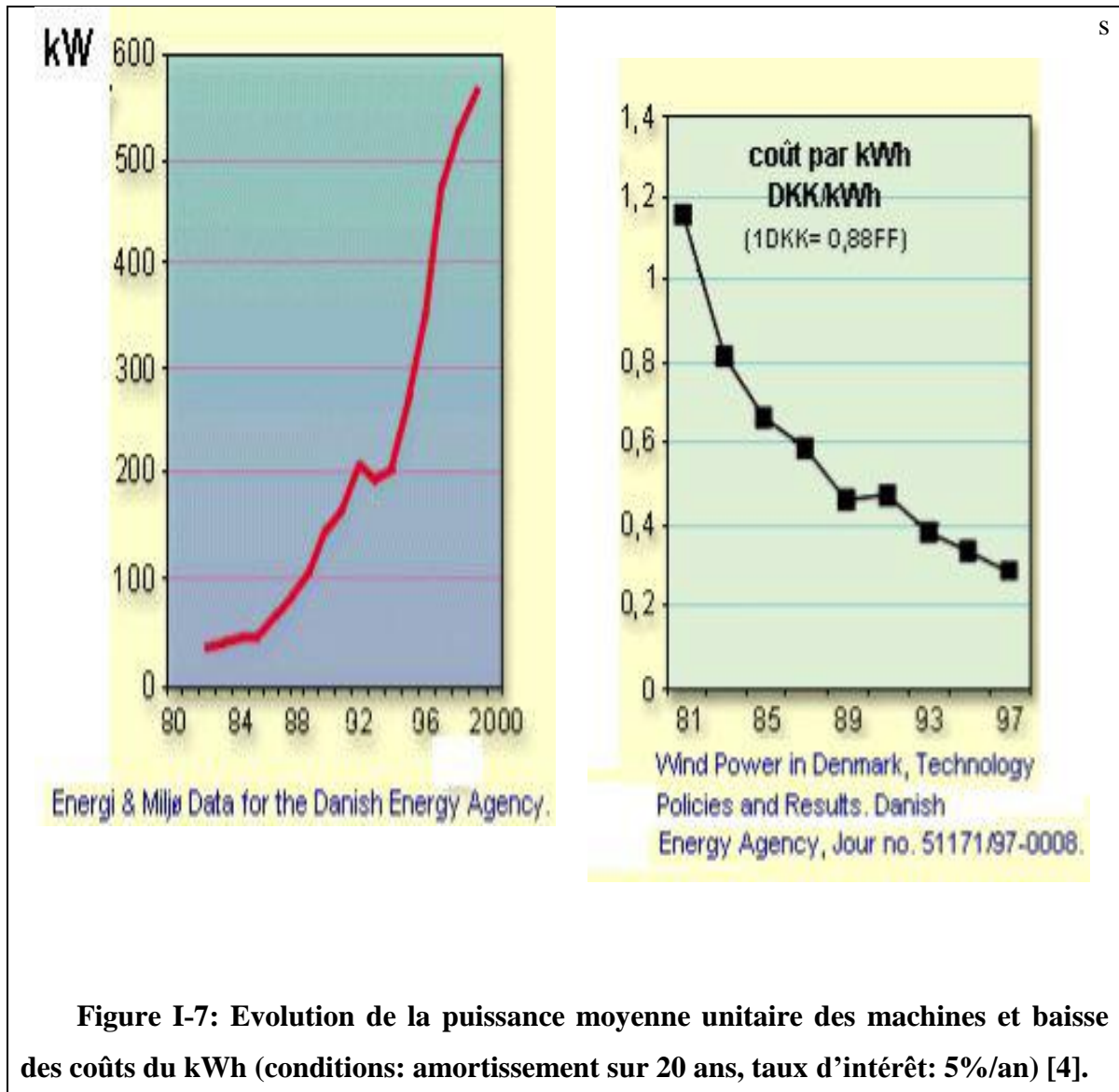


Figure I-4 : Parcs en Europe en 2003 en MW [3].

I.3.3.2 Evolution des coûts de production :

On estime que le coût d'installation d'un kW est d'environ 1000 euros. Les progrès technologiques et la production accrue d'éoliennes ces dernières années permettent de diminuer ce chiffre régulièrement (Figure I-7). Le prix de revient du kWh dépend du coût de l'installation de l'éolienne ainsi que de la quantité d'électricité produite par an. Ce prix varie en fonction du site et diminue avec les avancées technologiques. L'accroissement de la puissance moyenne des éoliennes et du volume des ventes (18 MW cumulés en 1981 et 10 GW en 1998) a conduit à une forte baisse du coût de production du kWh éolien et à des retours d'investissement de plus en plus courts. Selon les tarifs de rachat, le temps de retour est compris entre 4 ans (Allemagne) et 10 ans (Canada), en France, il varie entre 6 et 7 ans [4].



Le coût global d'investissement dans une ou plusieurs éoliennes intègre :

- les études et le dimensionnement de l'installation ;
- l'obtention des autorisations nécessaires pour construire et raccorder au réseau électrique.
- l'achat du générateur et de sa tour.
- l'achat des équipements permettant de relier en toute sécurité l'éolienne et le réseau électrique.

Les éléments de coût recueillis auprès des constructeurs sont fournis dans le tableau suivant:

Société	Type	Prix (Euro)	Composants
AOC	AOC 15/50 50Hz	70110	Turbine, Mât (24m)
Auroville Energy Products	AWS 1500	5572	Turbine, Mât (18, 21 ou 23m), Batterie, Inverter
	AEP 5000	18161	Turbine, Mât, Batterie, Inverter
	AEP 10 000	30122	Turbine, Mât, Batterie, Inverter
Bergey Windpower Company	XL1	2657	Turbine, Mât (20m)
	BWC 1500	4428	Turbine
Eoltec	Sirocco 5,5-6	12000	Turbine
	Windrunner E10-25	30000	Turbine
Fortis Windenergy	Espada 800	4126	Turbine, Mât (12-24m), controller
	Passaat 1400	4747	Turbine, Mât (12-24m), controller
	Montana 5000	12840	Turbine, Mât (18m), controller
	Alize 10 000	47900	Turbine, Mât (18-36m), controller
Furhländer	FL 30	76000	Turbine, Mât (18-27m)
	FL 100	165000	Turbine, Mât (35m)
	FL 250	269000	Turbine, Mât (41,5-50m)
Gual	Statoeolien GSE 4	16000	Tout compris
Kestrel Wind Turbines	Kestrel 600	1711	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 800	2170	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 2000	4400	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 600	1711	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 800	2170	Turbine, Mât (9m)
	Kestrel 2000	4400	Turbine, Mât (9m)
Provenenergy	WT600	4555,2	Turbine, Mât (12m)
	WT2500	9767,4	Turbine, Mât (11m)
	WT6000	16738,9	Turbine, Mât (15m)
	WT15000	33434	Turbine, Mât (15m)

Table (I-1) : Les éléments de coût recueillis auprès des constructeurs [5].

I.3.4 Constitution d'une éolienne « classique »:

Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux [3]:

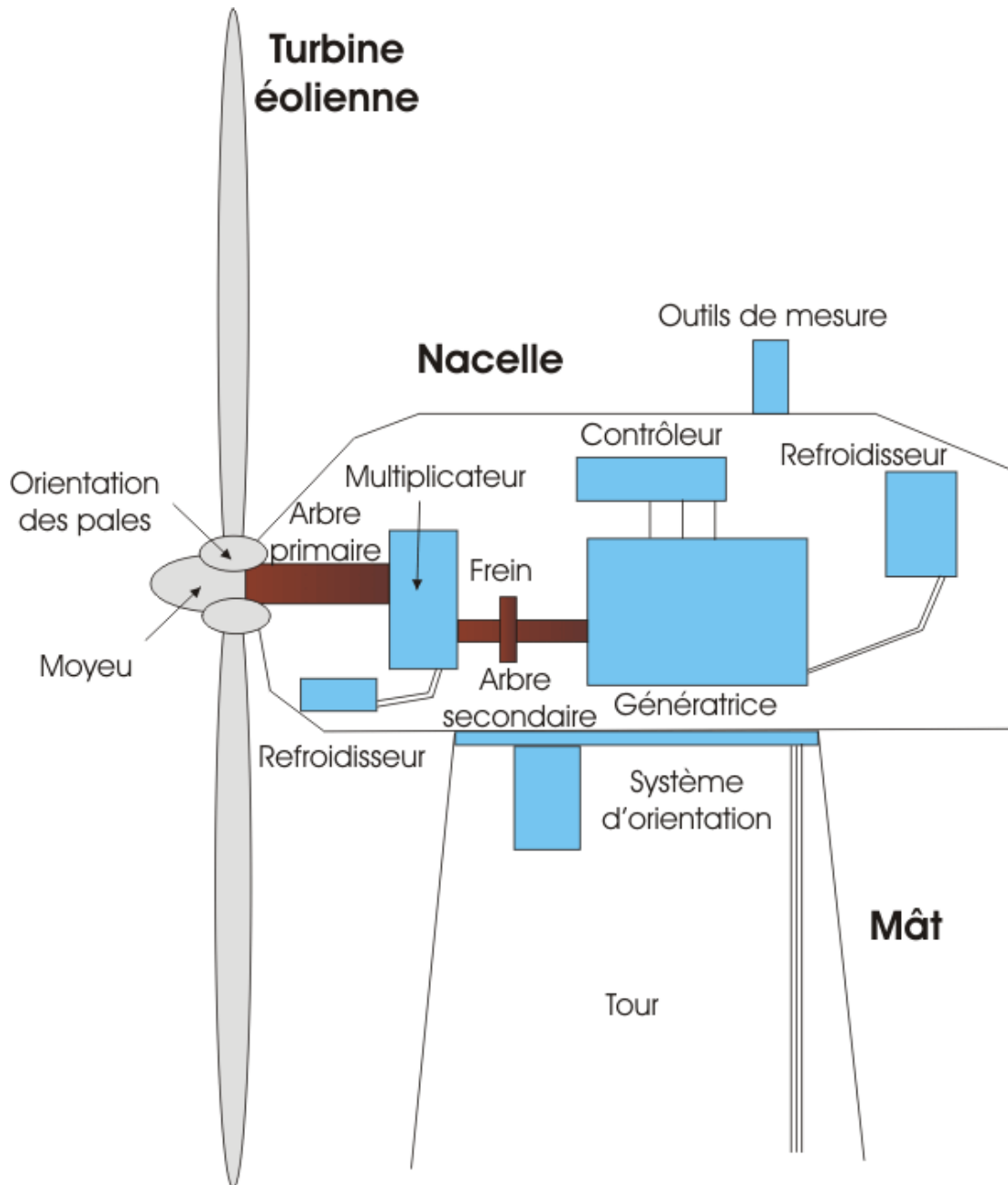


Figure I-8: Principaux composants d'une éolienne [3].

- **Le mât**: généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.
- **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le

frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent), la variation de la masse d'une nacelle en fonction de diamètre du rotor évolue de manière exponentielle selon la (Figure I-9).

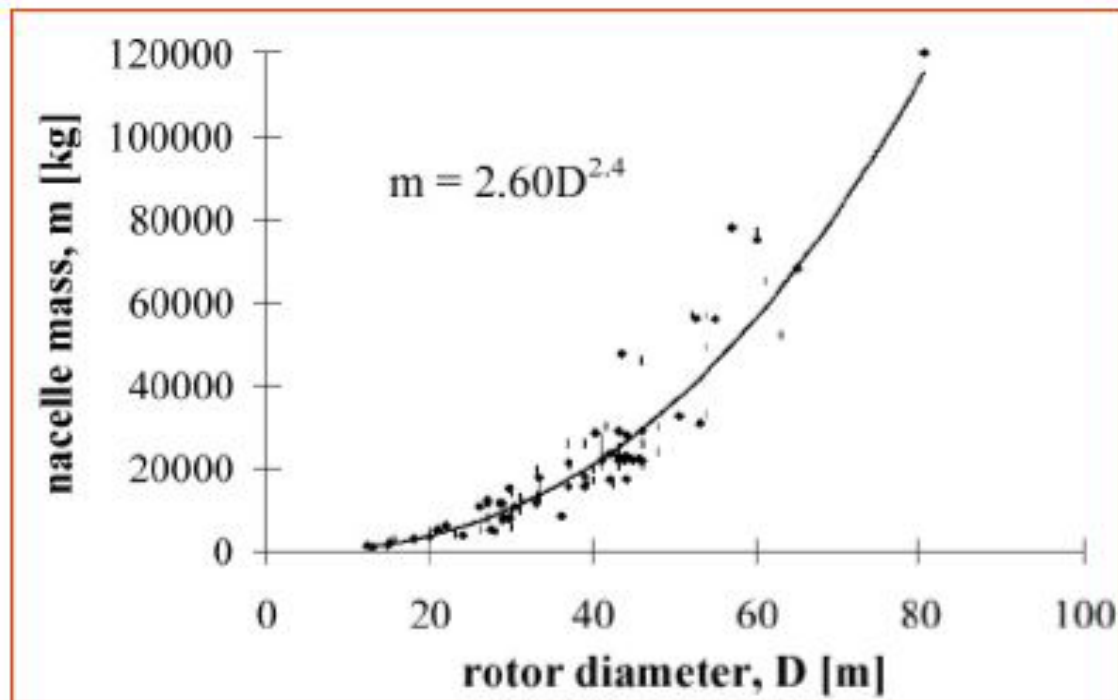


Figure I-9: variation de masse de la nacelle en fonction de diamètre du rotor [6].

- **Le rotor**, formé par les **pales** assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale). Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées ; actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique. L'augmentation du diamètre du rotor va accroître la masse des pales comme indiqué (Figure I-10) [3].

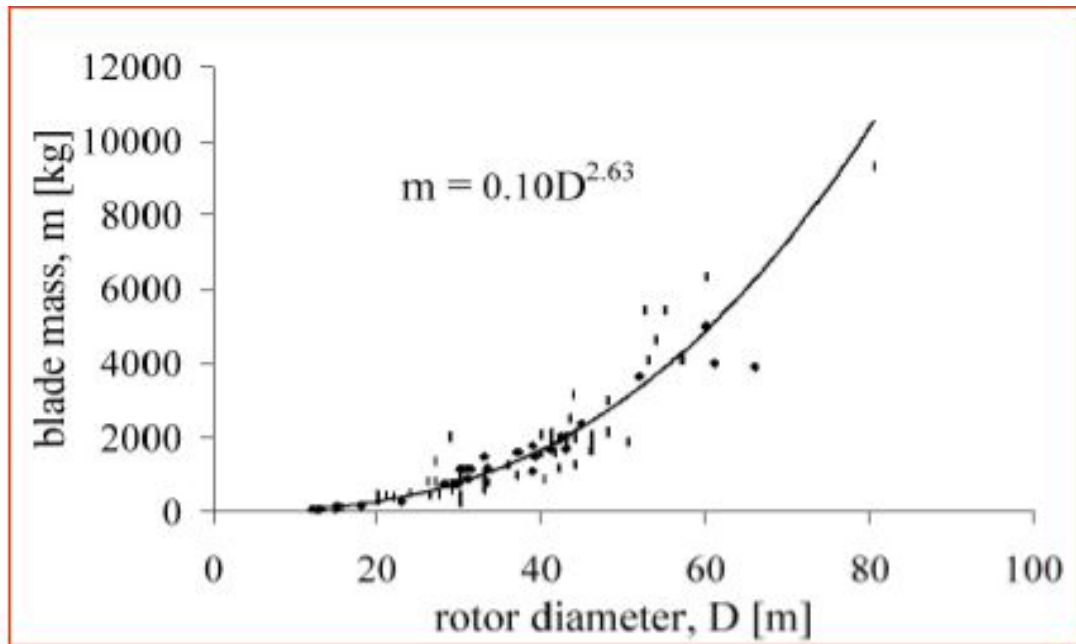


Figure I-10: variation de la masse d'une pale en fonction de diamètre du rotor [6].

I.3.5 Modes d'installation et différents types d'éoliennes:

Généralement il y a deux types d'installations des éoliennes : l'éolienne qui n'est pas raccordée au réseau dite « individuelle » est installée en site isolé ; le deuxième mode concerne les éoliennes regroupées sous forme de fermes éoliennes installées sur la terre ou de plus en plus en mer avec les fermes éoliennes « offshore » où la présence du vent est plus régulière. Avec les fermes « offshore » on réduit les nuisances sonores et on améliore l'esthétique. Du point de vue structure, on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont :

I.3.5.1 Eoliennes à axe vertical:

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

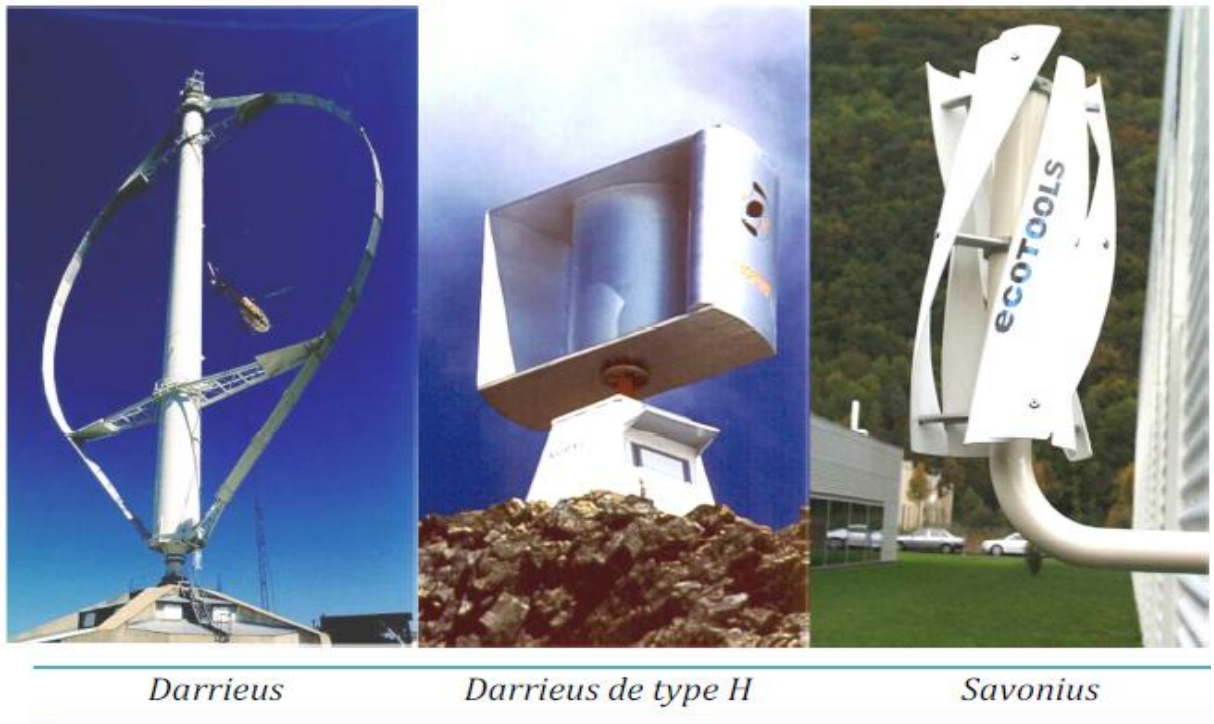


Figure I-11: technologie éolienne à axe vertical [7].

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

- **Le rotor de Savonius:** dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Figure I-12) [3]. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

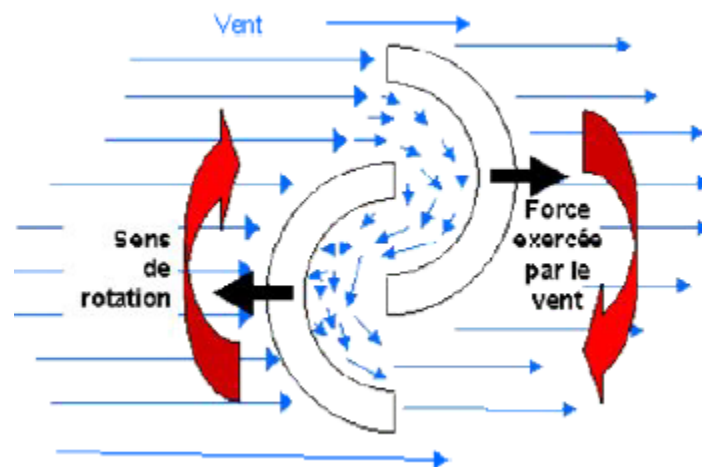


Figure I-12: Schéma de principe du rotor de Savonius [3].

- **Le rotor de Darrieus:** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil, placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (Figure I-13).



Figure I-13: Schéma du rotor de Darrieus [1].

I.3.5.1.1 Avantages :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

I.3.5.1.2 Inconvénients :

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I.3.5.2 Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement (Figure I-14). Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que

l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.

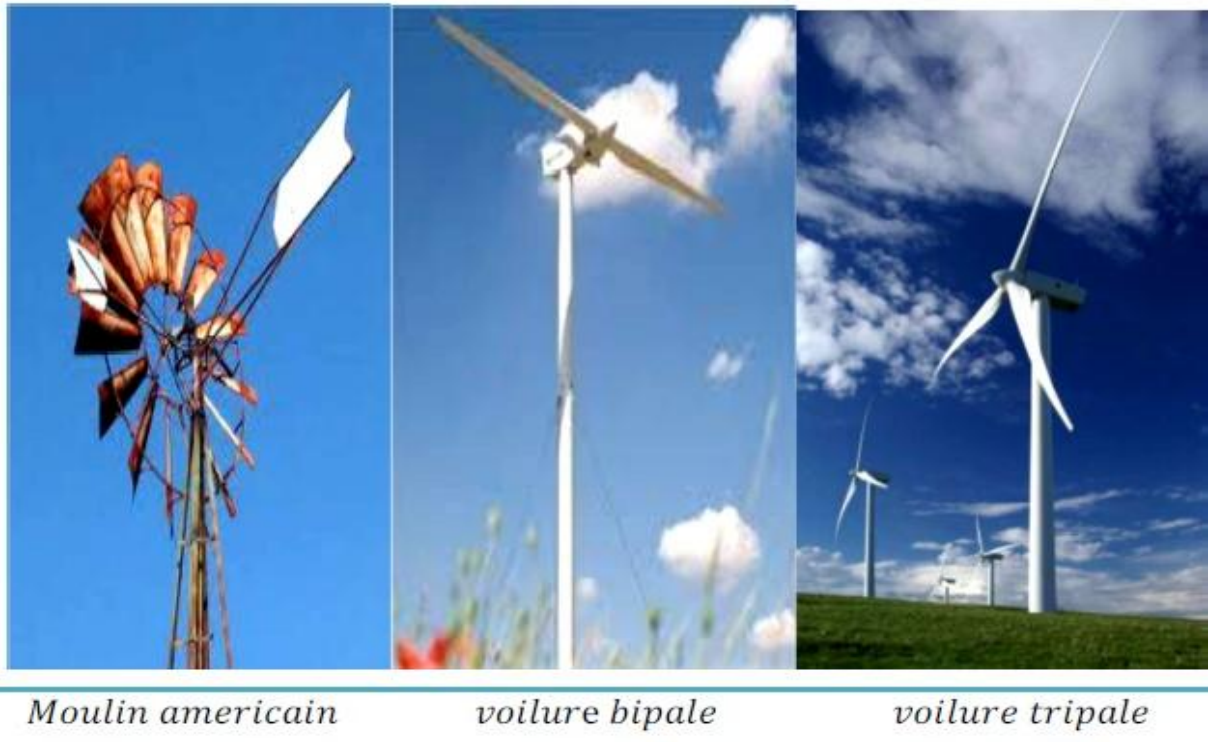
*Moulin américain**voilure bipale**voilure tripale*

Figure I-14: technologie éolienne à axe horizontale [7].

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (Figure I-15):

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

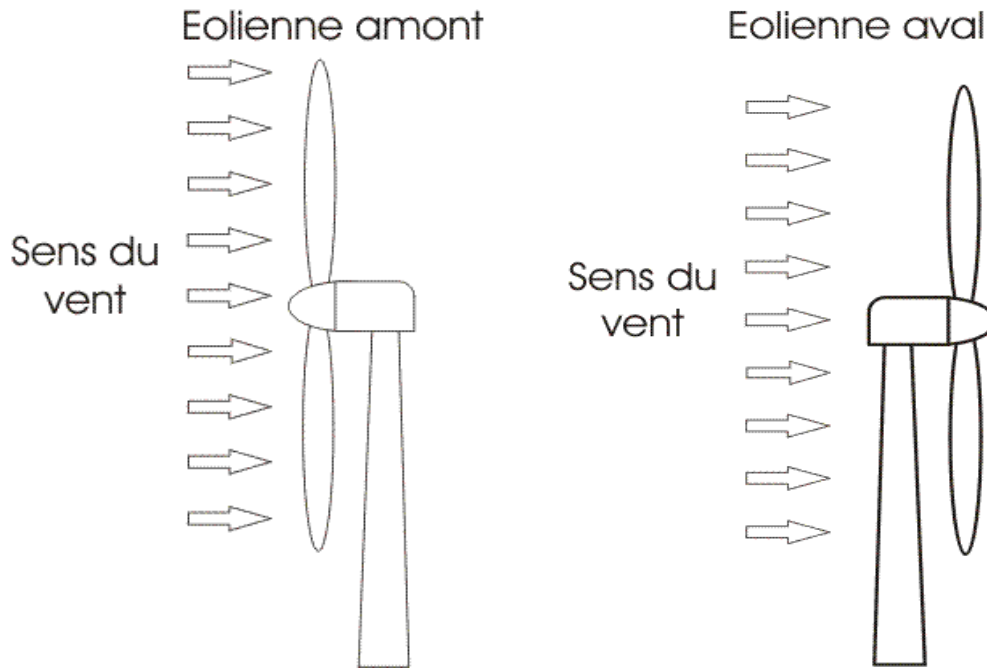


Figure I-15: Types d'éoliennes à axe horizontal [3].

I.3.5.2.1 Avantages:

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

I.3.5.2.2 Inconvénients:

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.

Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [7].

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch) [7].

I.4 Caractérisation du vent :

I.4.1 Répartition instantanée de la vitesse du vent :

Le vent souffle là où l'air présente des différences de température et de pression et se dirige toujours des hautes pressions vers les basses pressions. Si la terre ne tournait pas, l'air se déplacerait directement (en ligne droite) des centres de haute pression (anticyclone) vers les centres de basse pression (cyclone) mais à cause de cette rotation du globe, l'air est forcé de suivre une trajectoire courbe, légèrement infléchie vers la basse pression (force de Coriolis) [9]. Le choix géographique d'un site éolien est important dans un projet de production d'énergie éolienne. Pour déterminer l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien il faudrait déterminer les caractéristiques du vent dans ce site. Pour connaître les propriétés d'un site, nous devons faire des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps. Les figures ci-dessous montrent les variations des vitesses moyennes sur un site pour une période donnée.

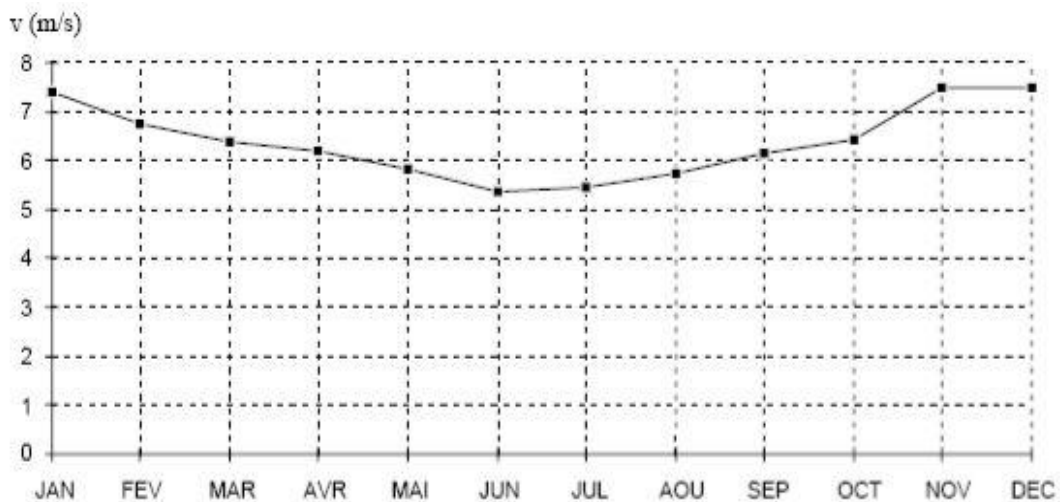


Figure I-16:- Variations des vitesses moyennes du vent sur 1 an [8].

I.4.2 Répartition régionale de la vitesse du vent :

Pour implanter une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire ; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La (Figure I-17) montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'« Energie Eolienne » du CDER.

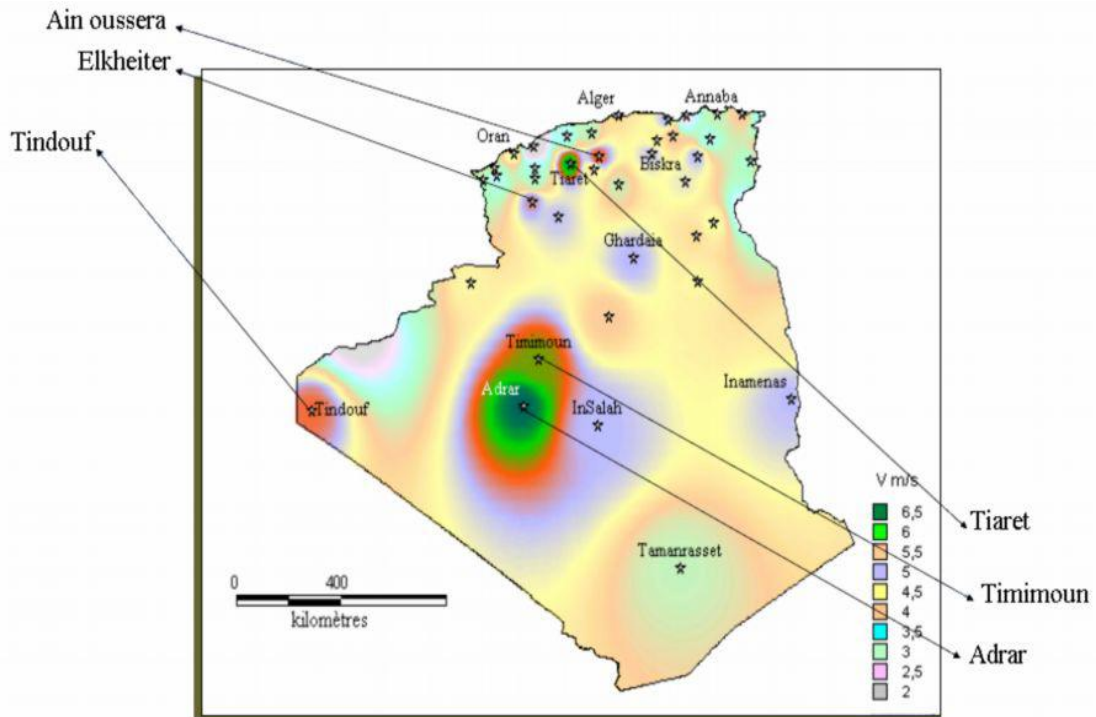


Figure I-17: les régions ventées en Algérie [10].

D’après les données du CDER, la (Figure I-18) indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie. Le site d'Adrar présente le meilleur gisement éolien de l'Algérie.

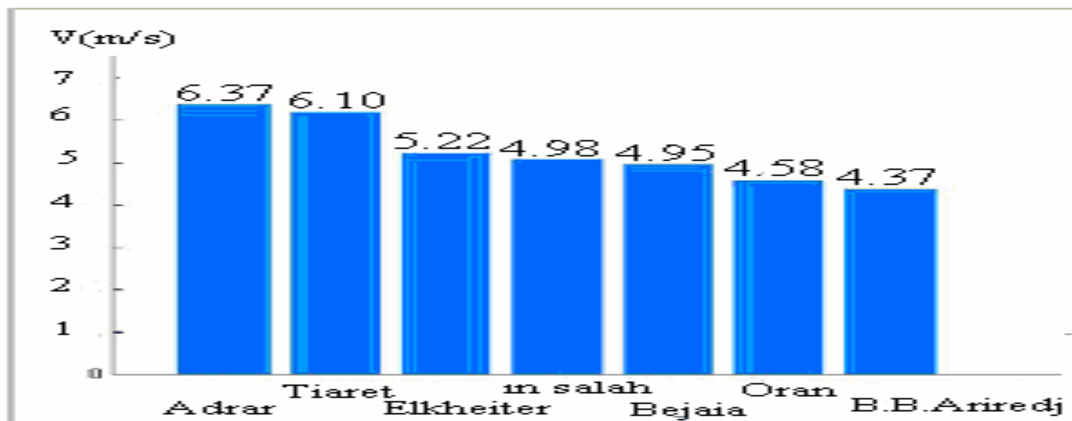


Figure I-18: Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés [10].

I.4.3 L’histogramme des vitesses de vent:

L’histogramme des vitesses des vents ou courbe de durée en vitesse du site est un outil important dans la caractérisation d’un site éolien. La courbe de durée en vitesse représente le temps durant lequel le vent se situe dans chaque fourchette ou palier de valeurs de vitesse. Par exemple, en disposant d’un ensemble N de valeurs mesurées de la vitesse du vent on détermine l’histogramme de la vitesse du vent (la courbe de distribution des vitesses du vent

(Figure I-19) ; l'exemple de calcul est basé sur les données météorologiques de la station de Hassi Rmal [12].

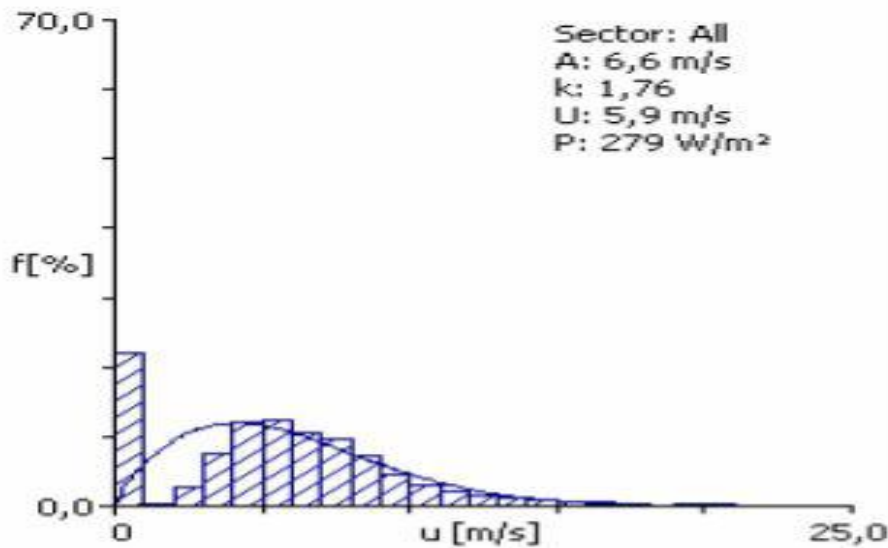


Figure I-19: Courbe de densité de probabilité à Hassi Rmal donnée par Wasp [4]

I.5 Production optimale d'énergie :

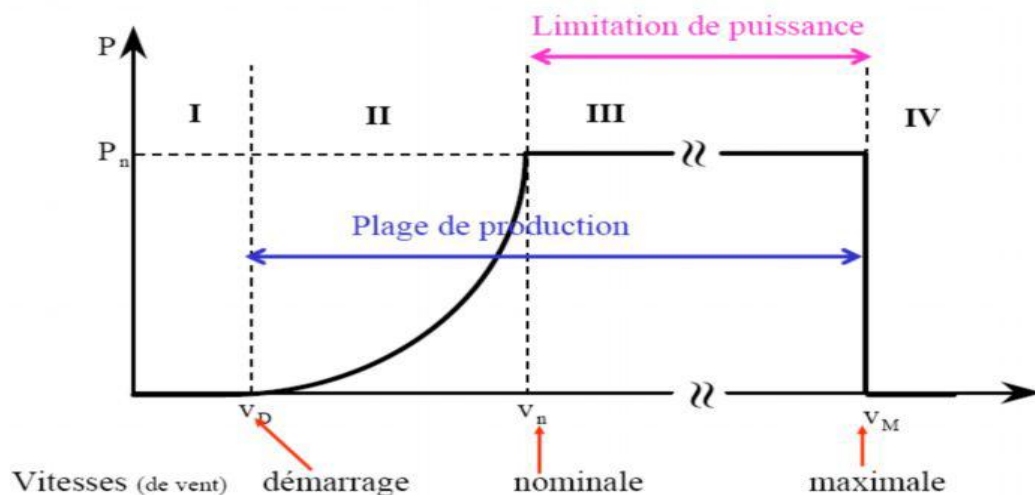


Figure I-20: Régulation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [8].

Pour garantir un captage maximal de l'énergie incidente, il faut adapter en régularité la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent et l'angle d'incidence des pales. Sur la caractéristique d'exploitation d'une éolienne de la (Figure I-20). Il existe quatre zones principales qui sont :

- la **zone 1**: où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage V_d de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas.
- la **zone 2**: dans laquelle la vitesse du vent est comprise dans le domaine $[V_d, V_N]$ correspond à la conversion d'énergie éolienne. La zone où il est possible d'optimiser.

- **la zone 3:** où la puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale P_n .

En effet, au-delà de la « vitesse nominale » V_N du vent, le surcoût de dimensionnement (puissance du générateur, résistance mécanique des structures) ne serait pas amorti par le gain de production.

- **la zone 4:** lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_M . Dans ce cas, la turbine est arrêtée par le système d'arrêt d'urgence [11].

Il y a trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor :

I.5.1 La surface balayée par le rotor :

Dépend directement de l'éolienne et de sa taille. Etant donné que la surface balayée par le rotor s'accroît avec le carré du diamètre du rotor, un doublement de celui-ci entraînera une récolte de $2^2 = 2 \times 2 =$ quatre fois plus d'énergie. La (Figure I-21) donne une idée sur la variation de la puissance unitaire en fonction du diamètre du rotor balayé ainsi que d'une prévision en 2010.

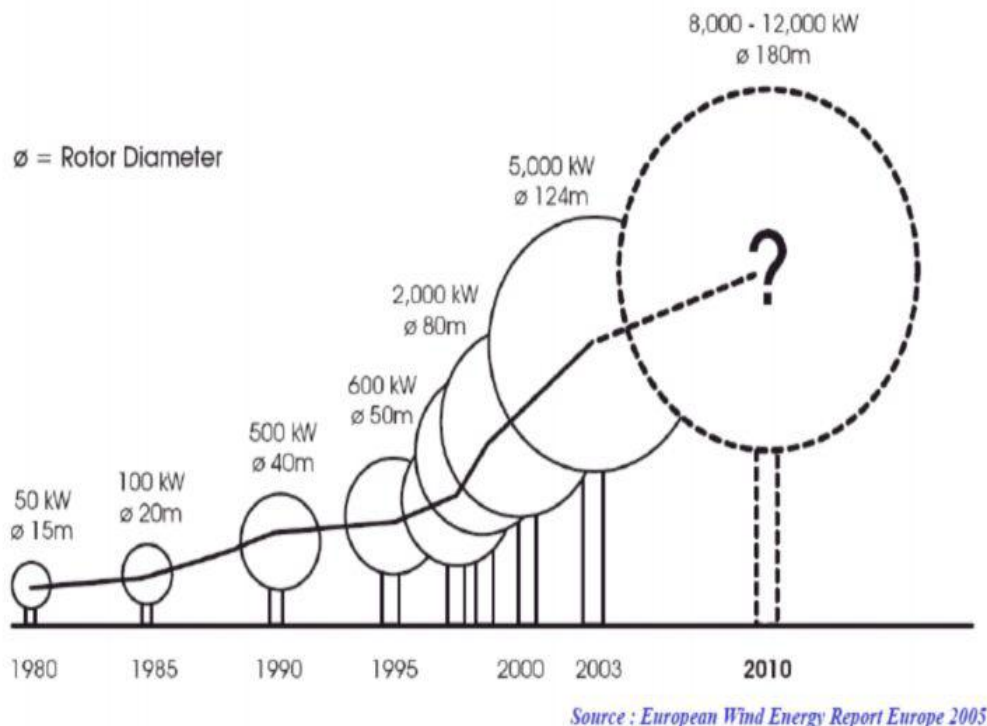


Figure I-21: Puissances selon les tailles des éoliennes [8].

I.5.2 La densité de l'air et la vitesse du vent:

La capacité de production d'une éolienne se caractérise par sa courbe de puissance. Celle-ci fournit sa capacité de production (puissance en Watt) en fonction de sa vitesse de vent moyenne au niveau du moyeu (Figure I-22).

Cette courbe de puissance dépend de la température moyenne annuelle du site, de l'altitude du site : la condition standard dans lesquelles elle est fournie avec une température moyenne de 15°C et une altitude de 0 m au-dessus de la mer. Dès lors l'énergie produite est l'intégration sur le temps de la courbe de puissance de l'éolienne. Cela s'exprime en fonction de la courbe de puissance P d'une éolienne et de la distribution V de vitesse par :

$$E = \int P(V(t)) \cdot dt \text{ en KWh/an}$$

L'atlas de la puissance énergétique récupérable à 50 m en Algérie est donné dans la figure ci-dessous.

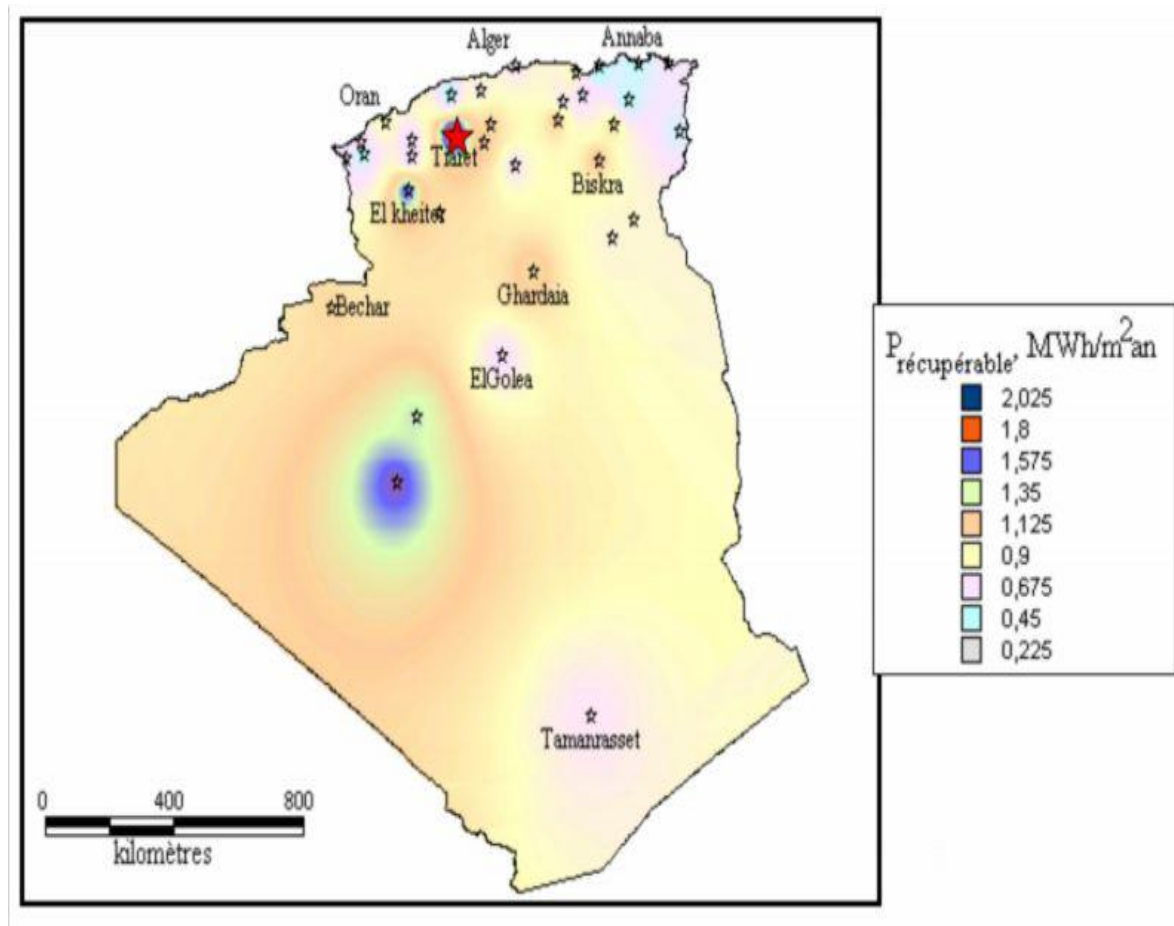


Figure I-22: Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie [10].

Une comparaison entre les sites ventés en Algérie est donnée dans la (Figure I-23).

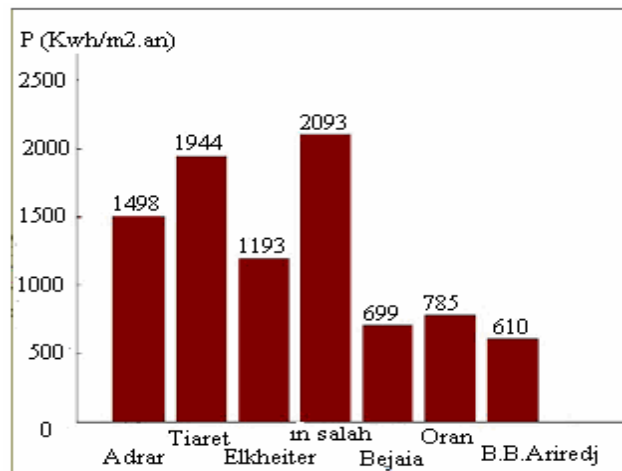


Figure I-23: Comparaison entre les vitesses cubiques des Sites Ventés [10]

I.6 Intérêt de la vitesse variable:

En vitesse variable, on règle le système éolien de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le « **Maximum Power Point Tracking** » (MPPT). La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne $P(W)$. Alors on peut réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance. La (Figure I-24) montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage de vitesse dans une plage de 1 à 2 est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques

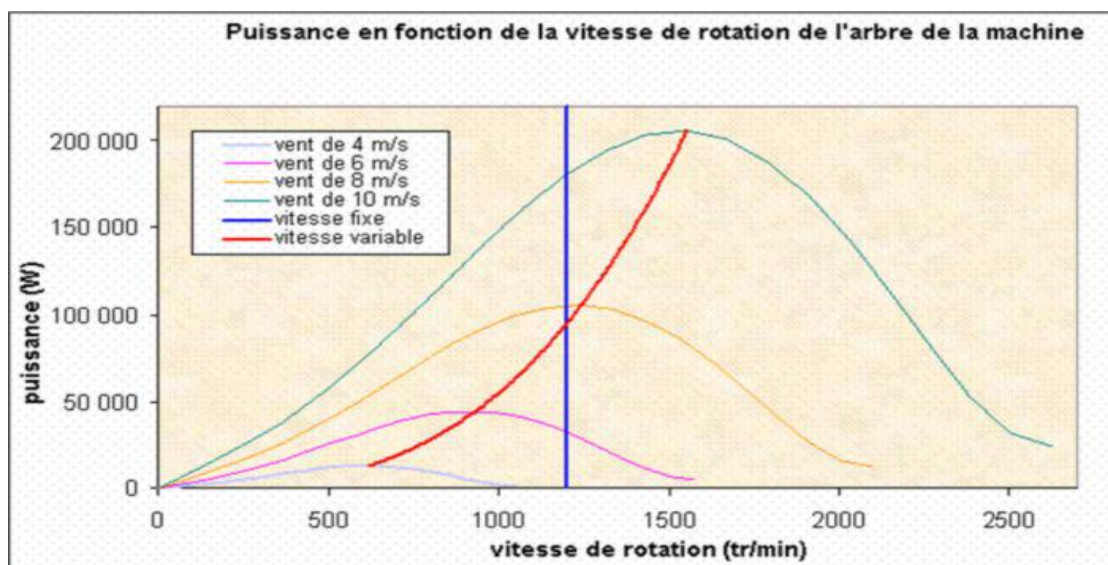


Figure I-24: Caractéristique de l'éolienne [3]

En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent. Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique.

I.7 Analyse de sécurité :

I.7.1 Cas des éoliennes à axe horizontal :

Cette étude est consistée à estimer l'impact d'un accident sur la sécurité des personnes, Le principal risque d'accident pouvant avoir un impact au-delà de la simple emprise au sol de l'éolienne est celui de l'éjection d'une pale ou d'un morceau de pale (Figure 1-25). Toutes les analyses menées ne tiennent pas compte des effets de portance aérodynamique sur les pales, mais uniquement des effets gravitationnels.

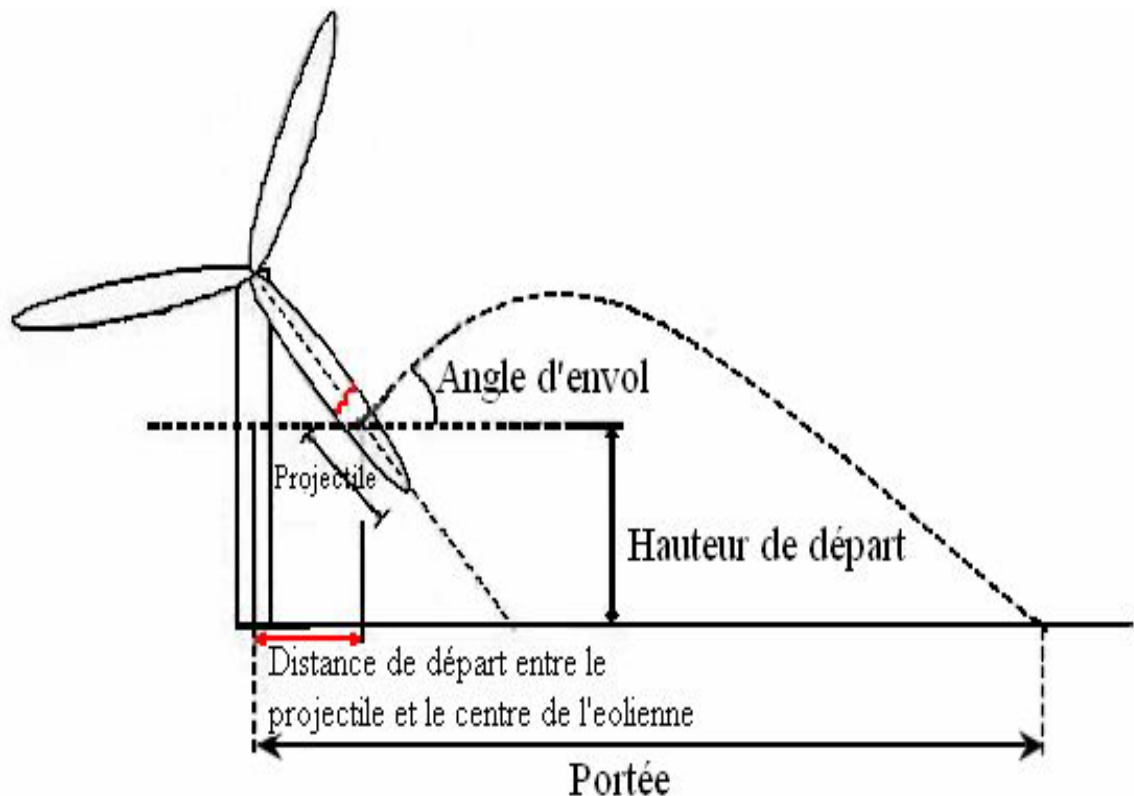


Figure I-25: schéma illustre la portée de la pale pour une éolienne à axe horizontal

[5].

I.7.2 Cas des éoliennes à axe vertical :

L'analyse a été menée pour une pale d'éolienne qui se décroche. La (Figure I-26) illustre la portée de la pale

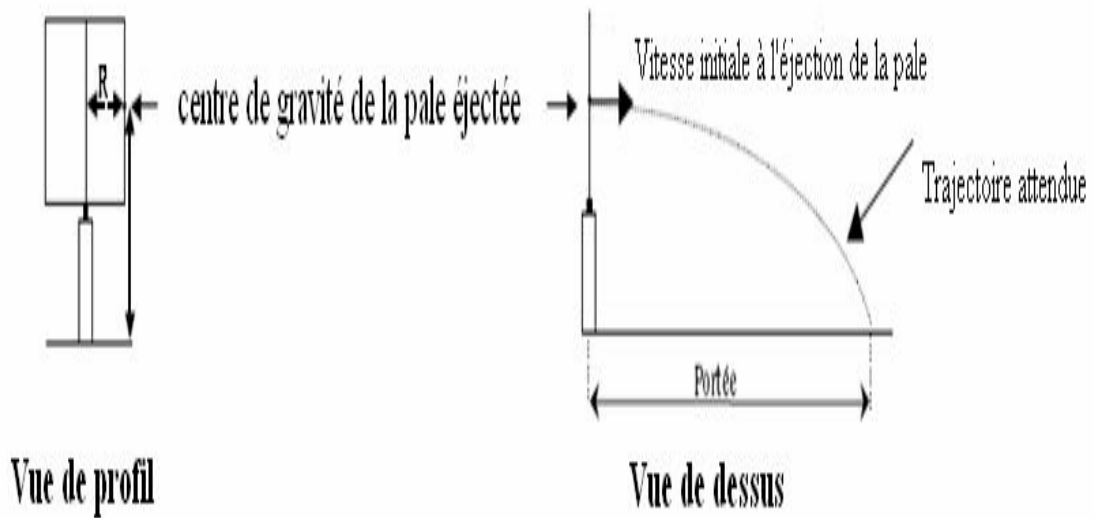


Figure I-26: schéma illustre la portée de la pale pour une éolienne à axe vertical [5].

La valeur de portée obtenue en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne, pour différentes valeurs de position du centre de gravité de la pale éjectée (R , H) est donnée par la (Figure I-27).

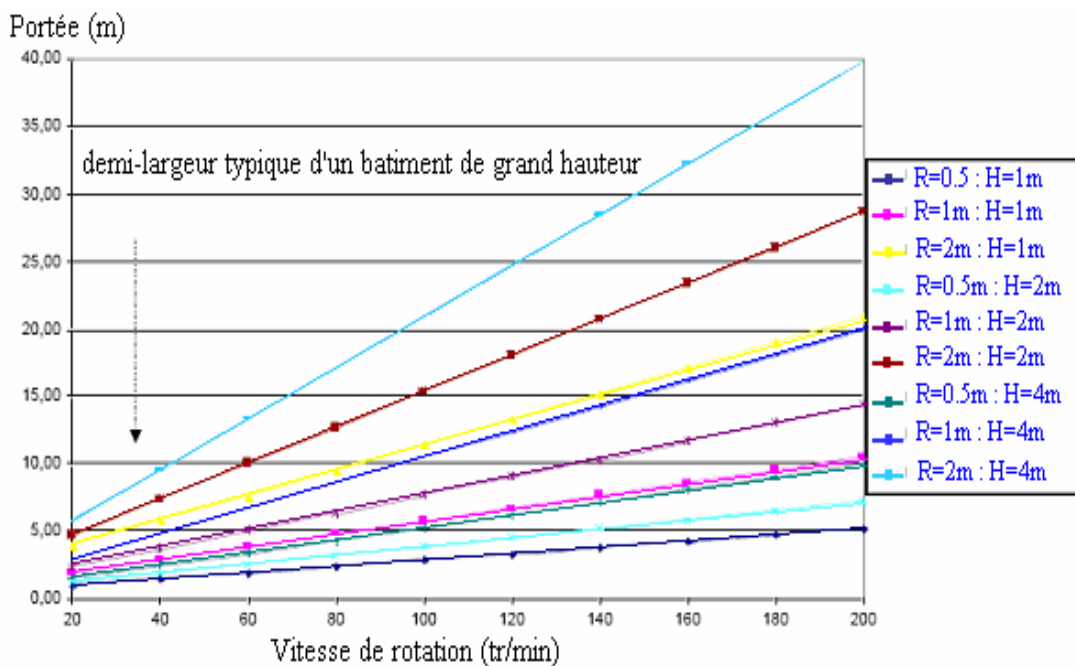


Figure I-27: Variation de portée en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne [5].

Le graphique précédent montre que dans les régimes de fonctionnement où il y a une vitesse de vent comprise entre 3 et 25 m/s, les pales qui ont un centre de gravité éloigné

de moins de 1 m de l'axe de rotation ont la quasi-certitude de ne pas être éjectées à une distance supérieure à 12 m. Cette distance est également la demi-largeur typique d'un bâtiment de grande hauteur. Autrement dit, une pale qui se rompt retomberait sur le toit du bâtiment. Le problème de sécurité lié à l'éjection de pale est donc fortement réduit dans le cas d'éoliennes à axe vertical.

I.8 Quelques turbines utilisées dans la génération d'énergie éolienne :

I.8.1 La turbine « AOC 15/50 50 HZ » :

C'est une Éolienne à axe vertical américaine de 60 kW présentée dans sa version 50 Hz (55 kW). Sa conception est proche de celle des éoliennes de grande puissance.

Plus de 8 exemplaires sont en fonctionnement à travers le monde (Etats-Unis, Europe, Afrique). La société fabricante a été en liquidation avant d'être rachetée récemment par des investisseurs canadiens.

<i>Rotor</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Type de rotor : Axe horizontal - Nombre de pales : 3 - Vitesse de rotation : 65 tr/min - Surface balayée : 177 m² - Vent de démarrage : 4,6 m/s - Vent extrême : 59,5 m/s - Type de régulation : Stall
<i>Pales</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 7,2 m - Matériau : Epoxy /Fibre de Verre - Poids : 150 kg
<i>Génératrice</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance nominale : 60 kw - Tension nominale : 400V - Type : 3 phases, 4 pôles asynchrones - Vitesse de rotation : 1800 tr/min à 60Hz - Poids : (rotor + génératrice) 2420 kg
<i>Tour / Support</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur 24 m - Poids 3210 kg
<i>Autres</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'exemplaires installés : Plus de 8 - Prix: catalogue : 70110 dollars (turbine et tour) - Maintenance : Semi annuelle
<i>Fabricant</i>	- <i>Atlantic Orient Corp</i>



Figure I -28: Photographie de « AOC 15/50 50 HZ » [5].

I.8.2 La turbine « FUHRLANDER - FL30 » :

Éolienne fiable commercialisée depuis 15 ans identique au niveau technologique des éoliennes de grande puissance.

<i>Rotor</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Type de rotor : Axe horizontal - Nombre de pales : 3 - Vitesse de rotation : 47/ 71 tr/min - Surface balayée :133 m² - Vent de démarrage : 2,5m/s - Vent extrême : 55m/s - Type de régulation : Stall - Poids : 640 kg
<i>Pales</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 6.5m
<i>Génératrice</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance nominale : 30 kw - Tension nominale : 400V (50/ 60 Hz) - Type : asynchrone - Vitesse de rotation : 1000/ 1500 tr/min - Poids : (rotor + génératrice) 1200 kg
<i>Tour / Support</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur : 18/ 27 m - Poids : 2100/ 3000 kg
<i>Autres</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Nombre d'exemplaires installés : Plus de 4 - Prix catalogue : 76000 dollars (turbine +t mat)
<i>Fabricant</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Fuhrlander –Allemagne</i>



Figure I-29: Photographie de « FUHRLANDER - FL30 » [5].

I.8.3 La turbine « GUAL - STATOEOLIEN GSE 4 » :

Éolienne à axe vertical s'intégrant sur tout types de bâtiments (privés, collectifs, commerciaux, administratifs, industriels, buildings, ...)

<i>Rotor</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Type de rotor : Axe vertical - Nombre de pales : Stator :12 Rotor :8 - Vitesse de rotation: de 0 a 120 tr/min - Surface balayée : 6 m² - Vent de démarrage : 2m/s - Vent extrême : 70m/s - Type de régulation : électronique - Poids : 500kg
<i>Pales</i>	<ul style="list-style-type: none"> Longueur : 1,5m Matériau : PVC ou acier ou inox Poids : Stator : 3 Kg , Rotor : 7 Kg
<i>Génératrice</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance nominale 13500w - Type Synchrones aimants permanents - Vitesse de rotation 1000/ 1500 tr/min - Poids (génératrice) 80kg
<i>Tour / Support</i>	- hauteur : Support urbain
<i>Fabricant</i>	<i>GUAL Industrie – France</i>



Figure I-30: Photographie de « GUAL - STATOEOLIEN GSE 4» [5].

I.8.4 La turbine « WINDSIDE - WS-4 » :

Éolienne verticale, résiste à des conditions extrêmes (températures, vent, humidité). Produit jusqu'à 60m/s. Connexion réseau et charge de batteries. Très peu bruyante.

<i>Rotor</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Type de rotor : Axe vertical - Nombre de pales : 2 - Surface balayée : 4 m² - Vent de démarrage : 1,5m/s - Vent extrême : 60m/s - Type de régulation : électronique - Poids : 660kg
<i>Pales</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Longueur : 4760/1020 mm - Matériau : Acier / composite. - Poids : 40 Kg
<i>Génératrice</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Puissance nominale : 1500w - Tension nominale : 1- 400 V/12, 24,48 V - Type : Synchrone aimants permanents - Poids : (total de l'éolienne) 700kg
<i>Tour / Support</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur Défini par le besoin
<i>Autres</i>	<ul style="list-style-type: none"> Nombre d'exemplaires installés : 15 dans 6 pays.
<i>Fabricant</i>	<i>Windside - Finlande</i>



Figure I-31: Photographie de « WINDSIDE - WS-4 » [12].

I.9 Recherches et développements en cours :

I.9.1 Eolienne turby :

L'université de Delft « Pays-Bas » a un département où plusieurs enseignants travaillent sur la problématique de l'éolien urbain. Après des études théoriques ayant montré que le productible généré par certaines formes d'éoliennes de type Darrieus était amplifié lorsque celle-ci est placée sur le toit d'un immeuble, le développement de ce type d'éolienne a été entrepris. Celui-ci est en cours (Figure I-32).



Figure I-32: Photographie d'une éolienne Turby [12].

Cette éolienne doit encore être testée en environnement réel. Ses caractéristiques techniques sont les suivantes :

- amplification du rendement énergétique par rapport au flux normal : entre 1,7 et 2,3 ;
- masse : rotor : 90 kg ; tour : 230 kg ;

- encombrement : tour de 5 m + rotor de 3 m de haut pour 1 m de rayon ;
- puissance 2,5 kW.

I.9.2 Le système WARP :

Le système WARP fait l'objet d'appels d'offres pour des licences de fabrication et de marketing. Le système se compose de modules empilables sous forme de tours dans lesquels le vent est amplifié avant de faire fonctionner des hélices éoliennes. Le système est même prévu pour pouvoir utiliser des cellules photovoltaïques comme matériau externe (Figure I-33) [12].



Figure I -33: Photographie d'un éolienne WARP [12].

I.9.3 Le système des éoliens multi rotors :

L'entreprise SELSAM, a conçu une éolienne comportant 7 rotors de 3 pales d'un diamètre de 2,1m fournissant une puissance de 6 kW. L'arbre (la tige sur laquelle sont placés les rotors) n'est pas parallèle au sol mais penchée, afin d'éviter les perturbations du flux d'air d'un rotor sur un autre (Figure I-34) [12].



Figure I-34: Photographie d'un éolien multirotor [12].

I.9.4 Le Système kitegen :

Des chercheurs italiens ont un projet de générateur électrique éolien mû par des cerfs volants ("kites" en anglais) qui montent jusqu'à 2000 m et qui par leurs mouvements rotatifs

font tourner un "moulin à vent" horizontal et pourrait générer beaucoup de courant. D'après ses concepteurs ce sera beaucoup plus rentable que les solutions actuelles (Figure I-35).



Figure I-35: Photographie de « AOC 15/50 50 HZ » [12].

I.10 Quelques chiffres prévisionnels :

➤ Rapport wind-force 12 (mai 2004)

En 2030: la puissance mondiale installée varie entre 2700 GW et 6620 TWh.

En 2038 : la puissance installée varie entre 3238 GW et 8510 TWh.

➤ Rapport retombées économiques et environnementales

En 2020 :

- le secteur éolien fournirait 12% de l'électricité mondiale.
- générerait 2,3 M emplois.
- éviterait 11 G tonnes de CO₂.

➤ Rapport European Wind Energy Association [EWEA]

En 2010 : Plus de 100 GW au monde (10 GW offshore Plus de 70GW en Europe).

Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:

Tous systèmes de production d'énergie à ses avantages et ses inconvénients, les avantages et les inconvénients de la conversion éolienne sont:

I.11.1 Avantages:

- non polluante.
- inépuisable (énergie du vent).
- peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés).
- peut être complémentaire des filières traditionnelles.

I.11.2 Inconvénients:

- aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent).
- bruit des pales.
- impact visuel.
- interférences électromagnétiques.

I.12 Conclusion:

Ce chapitre donne une idée générale sur de l'énergie éolienne et son intérêt.

Cette énergie renouvelable a suivi son chemin depuis plusieurs années avec une croissance annuelle d'utilisation très importante dans le monde. Au début du vingtième siècle, plusieurs hypothèses sont apparues dans le domaine de l'aérodynamique concernant les éoliennes.

Références bibliographiques

[1]: www.neal-dz.net, consulté le 01/03/2011.

[2]: S.M. Habali, I.A. Saleh Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics. Part I: Design of the blade and root. *Energy Conversion & Management* 41 (2000) 249-280.

[3]: Hernandez, J and Crespo, A., 1987, " Aerodynamics Calculation of the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines and Comparison with Experimental Results ", "Wind Eng.", 11(4), pp. 177–187.

[4]: PIERRE BOUCHER, Le Vent et ses caprices ([http://www.LeVent - Wind.com](http://www.LeVent-Wind.com)).

[5]: D. Seyoum, C. Grantham and F. Rahman Analysis of an isolated self-excited induction generator driven by a variable speed prim mover School of Electrical Engineering and Telecommunications The University of New South Wales March, 2003.

[6]: Machine asynchrone Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre.
http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone.

[7]: LATRECHE Mohammed Tahar «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » Mémoire de Magister à Département d'Electrotechnique Université Ferhat Abbas de Sétif -ALGERIE 24 juin 2012.

[8]: L'énergie éolienne <http://www.Domsworld.org>

[9]: EDD (espace – éolien - développement) <http://www.espace – eolien.fr>

[10]: J. DOS GHALI et J.-P. LUDWIG, ingénieurs EPFL, 1015 Lausanne « Générateurs et installations électriques (chap 5) » présentée par Programme d'action PACER – Energies renouvelables Office fédéral des questions conjoncturelles ISBN 3-905232-55-3 N° de commande 724.247.2 f 1995.

[11]: A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat à laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de L'ENSEEIH, Université de Toulouse 5 Avril 2005.

[12]: L'énergie éolienne <http://www.Domsworld.org>

Chapitre II

Modélisation de la pale éolienne

II.1 Introduction:

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement. Dans ce chapitre on va présenter le modèle mathématique utilisé pour simuler et optimiser le profil de la pale de l'éolienne étudié.

II.2 Description d'une aile ou d'une pale d'éolienne:

La (Figure II-1) décrit une pale d'éolienne et identifie les différentes zones avec la terminologie appropriée

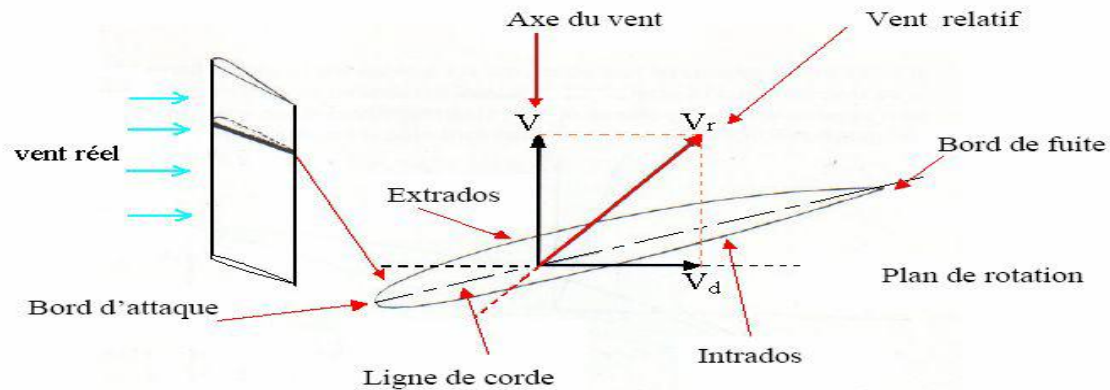


Figure II-5: Description d'une pale d'éolienne [1].

II.3 Triangle des vitesses sur une pale d'éolienne:

Supposons qu'il n'y ait pas de vent et que la pale tourne malgré tout. Lors de sa rotation, la pale « voit » du vent arriver parallèlement à son plan de rotation. C'est le même phénomène que si vous rouliez à vélo lorsqu'il n'y a pas de vent. Vous sentez le vent « créé » par votre déplacement. Ce vent souffle dans votre visage.

Supposons maintenant que la pale ne tourne pas et que le vent souffle : la pale « voit » le vent arriver selon la direction du vent. Pour reprendre l'image de notre cycliste, vous ne roulez pas et le vent souffle sur votre côté. Vous ressentez donc le vent selon sa direction.

Supposons enfin que le vent continue de souffler dans la même direction et que la pale tourne dans son plan de rotation. La pale « voit » maintenant un vent qui est une combinaison des deux vents précédent, à savoir le vent réel et le vent dû à la rotation. Dans le cas de notre cycliste, ceci revient à rouler vite avec un vent de côté. Vous ressentez une combinaison du vent de face et de celui de côté. Ce vent de combinaison est le vent relatif. La figure (II-2) illustre le concept du vent relatif « vu » par la pale.

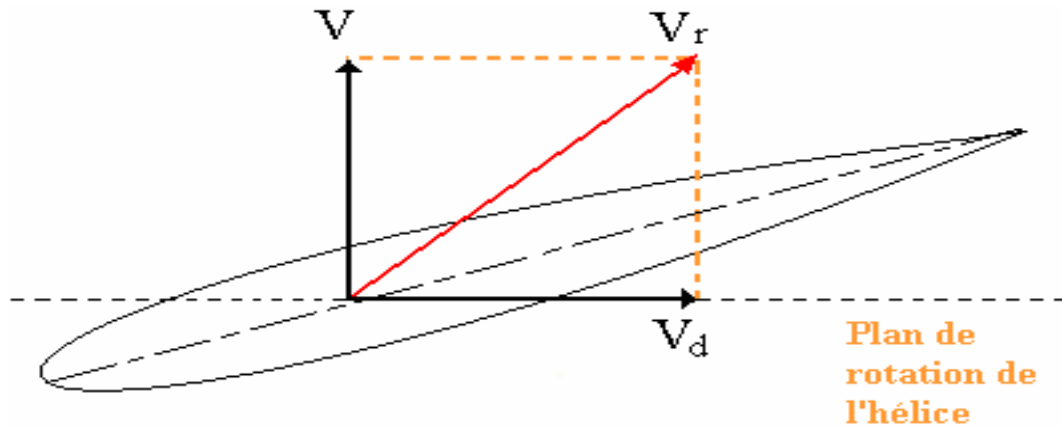


Figure II-6 : Triangle des vitesses et vent relatif [1].

Où:

V : vent qui souffle réellement.

V_d : vent dû à la rotation.

V_r : vent de combinaison ou vent relatif.

V_r est la résultante de V et V_d .

La construction de résultantes forme un triangle, d'où le nom de triangle des vitesses. Lors du mouvement de rotation des pales, chaque point appartenant aux pales se déplace sur un cercle. Le rayon r du cercle, correspond à la distance depuis le centre de rotation.

Plus le rayon du cercle sur lequel le point se trouve est grand, plus le point devra parcourir de distance à chaque tour, et donc, plus sa vitesse tangentielle, V_d sera élevée. On peut écrire que, pour un régime, ω , de rotation des pales la vitesse tangentielle V_d sera : $V_d = r \cdot \omega$

Tous les points d'une même pale n'ont donc pas la même vitesse tangentielle. Comme le vent relatif est une combinaison de la vitesse tangentielle et de la vitesse du vent, chaque section de la pale, selon sa distance du centre de rotation, ne « voit » pas le même vent relatif. Chaque section de la pale ayant un vent relatif différent, il faut que l'angle d'attaque soit lui aussi différent si l'on souhaite avoir la portance maximale dans chaque section. Afin de remplir cette condition, la pale est vrillée ou possède un gauchissement géométrique. Dans bien des cas, les pales des éoliennes de petite puissance, moins de 5 kW, ne possèdent pas de gauchissement géométrique. L'angle d'attaque est donc optimal pour une partie seulement de la pale. Des raisons de simplicité de fabrication et de coût peuvent expliquer ce choix.

II.4 Systèmes de régulation de vitesse d'une éolienne

II.4.1 Système à décrochage aérodynamique " Pitch "



Figure II-7: Système d'orientation des pales [2].

Ce système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment (Figure II-3). C'est à dire il faut que varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

II.4.2 Système à décrochage aérodynamique "Stall":

Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique (FigureII-4).

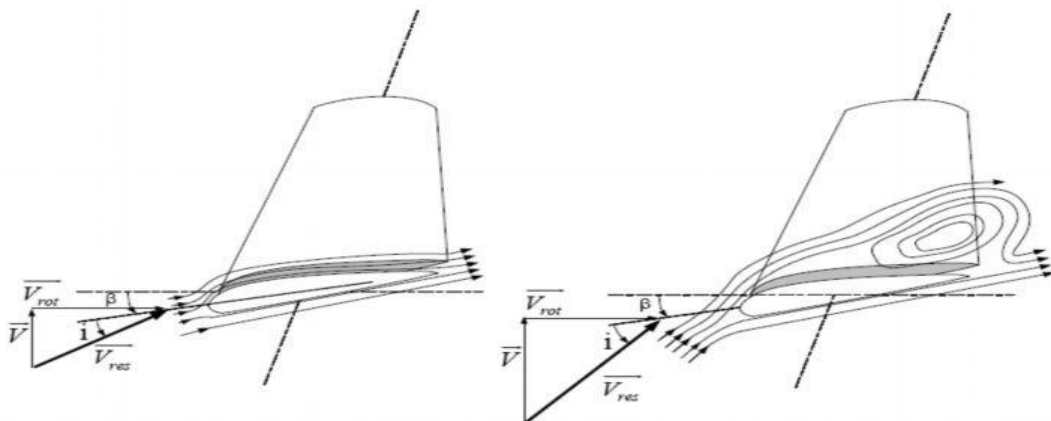


Figure II-8: Flux d'air sur un profil de pale "stall" [3].

II.4.3 Système à décrochage aérodynamique "Active Stall":

Ce dernier type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation « stall » et de la régulation « pitch » afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce

système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique. On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances.

II.5 Notions théoriques sur l'aérogénérateur :

II.5.1 Coefficient de Puissance C_p :

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface

($S = \pi R^2$ Où R =rayon de pale) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse V [m/s] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3$$

(II-1)

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance aérodynamique [3] :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3$$

(II-2)

Où:

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$: masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer. Le coefficient C_p caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme étant le rapport :

$$C_p = (\text{puissance disponible sur l'arbre}) / (\text{puissance disponible (récupérable)})$$

(II-3)

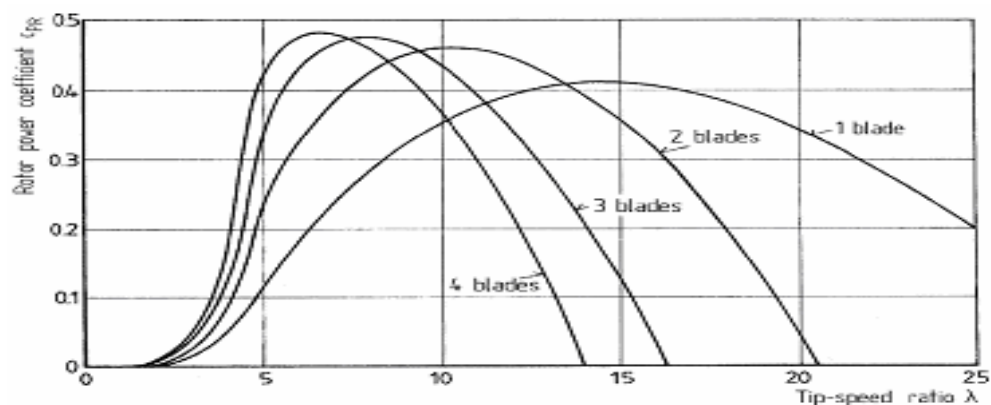


Figure II-9: Coefficient de puissance [4].

II.5.2 Couple produit par l'éolienne:

$$\Gamma = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{\frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3}{\Omega}$$

(II-4)

Avec :

Ω : La vitesse de rotation de l'éolienne en [rd/s]

II.5.3 Vitesse spécifique de l'éolienne:

Dit aussi paramètre de rapidité ou encore rapport de vitesse en bout de pale (tip-speed ratio), comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_{vent}}$$

(II-5)

II.5.4 Limite de Betz:

La totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc une partie de l'énergie cinétique du vent n'a pas été captée. Le théorème du physicien allemand Betz montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à $16 / 27$, soit environ 59 % de l'énergie totale du vent. La notion de coefficient de puissance C_p peut maintenant être présentée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique normalisée λ [7].

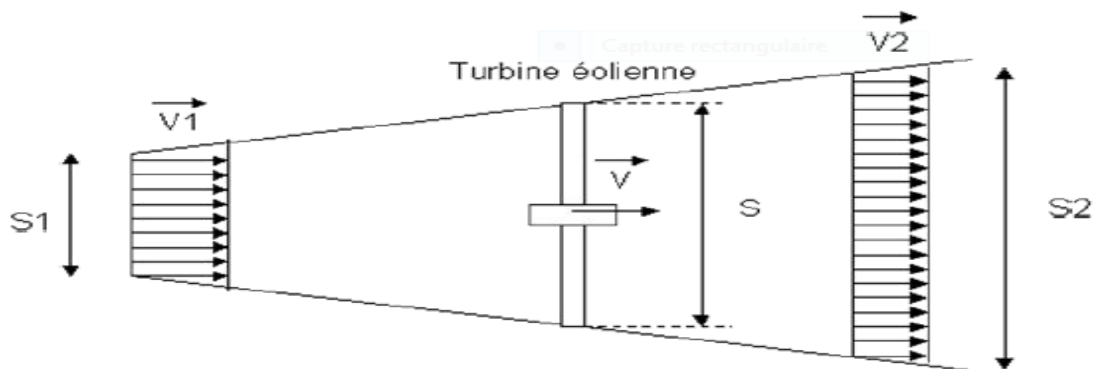


Figure II-10: Tube de courant autour d'une éolienne [2].

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant (Figure II-6).

Avec:

V_1 : La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.

V : la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne, de l'ordre de quelques m/s.

V_2 : La vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne

Où :

$V_1 > V > V_2$ Sont parallèles à l'axe du rotor.

La puissance récupérable du vent s'exprime par:

$$P = C_p \left(\frac{1}{2}\right) \rho S V^3$$

(II-6)

On peut retrouver le (C_p) max en faisant une étude des puissances, sachant que :

- la puissance récupérable sur l'éolienne est due à la variation d'énergie cinétique du vent

:

$$\Delta E_C = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2)$$

(II-7)

- d'autre part, l'effort qui s'exerce sur l'éolienne crée une puissance P_m ; le théorème de la quantité de mouvement donne :

$$F = \rho \cdot S \cdot V (V_1 - V_2)$$

(II-8)

Alors :

$$P_m = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) = \rho \cdot S \cdot V^2 (V_1 - V_2)$$

(II-9)

P_m : correspond à la puissance absorbée par le rotor, soit la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur.

On peut déterminer la vitesse V_2 pour laquelle la puissance est maximale :

$$P_m = \Delta E_C \text{ Soit :}$$

$$\rho \cdot S \cdot V^2 (V_1 - V_2) = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2)$$

(II-10)

Par simplification :

$$V \cdot (V_2 - V_1) = \left(\frac{1}{2}\right) (V_2 - V_1) \cdot (V_2 + V_1)$$

(II-11)

Alors:

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

(II-12)

En reportant l'expression de V (1-12) dans l'expression (1-9):

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

(II-13)

La puissance est maximale, pour V_2 telle que :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0$$

$$\text{Ce qui donne : } -3 \cdot V_2^2 - 2V_1 \cdot V_2 + V_1^2 = 0$$

On résout alors cette équation du second degré, d'inconnue V_2 on obtient deux solutions : l'une est négative donc impossible et l'autre correspondant à

$$V_2 = \frac{V_1}{3}$$

(II-14)

$$\text{La puissance est maximale pour: } V_2 = \frac{V_1}{3}$$

En reportant (1-12) et (1-14) dans l'expression (1-9) la puissance maximale P_{max} devient:

$$P_{max} = \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot \left(\frac{8}{27}\right)$$

(II-15)

On déduit le coefficient de puissance maximale C_{Pmax} pour une éolienne.

$$P_{max} = \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot \left(\frac{8}{27}\right) = \frac{1}{2} \cdot C_{Pmax} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3$$

On trouve alors :

$$C_{Pmax} = \frac{16}{27} \approx 0.59$$

(II-16)

Le coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent:

$$C_P = \frac{P_{rotor}}{P_{vent}}$$

En tenant compte de la limite de Betz C_{Pmax} vaut donc:

$$C_{Pmax} = \frac{P_{rotor}}{P_{vent}} = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3} = \frac{16}{27}$$

La puissance maximale du rotor sera égale à :

$$P_{\max Rotor} = \underbrace{\frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2}} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

(II-17)

$$C_{Pmax} \quad P_{vent}$$

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

$$P_{reell,rotor} = \frac{1}{2} \cdot \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

(II-18)

Pour conclure, dans bien des cas :

$$P_{reell,rotor} = 0.3 \cdot P_{vent}$$

(II-19)

Les courbes de λ (Figure. II-21) montrent l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal à 1, 2, 3 et 4 pales ; notons que sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0,59). Elles dépendent pratiquement du profil des pales. Si on considère la machine tripale, on peut dire que son coefficient de puissance est maximal pour $\lambda \cong 7$, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse normalisée que l'on maximise le rendement aérodynamique. A diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation plus élevée qu'une tripale. Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ .

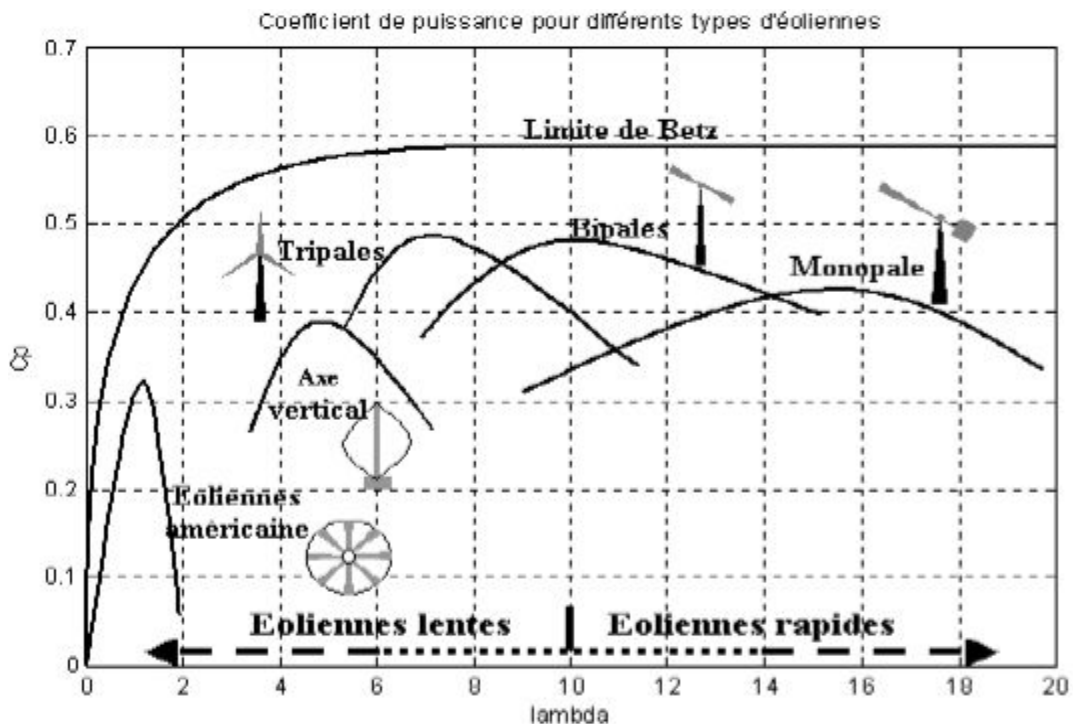


Figure II-11: Limite de Betz pour différentes turbines [3].

- D'après la (Figure II-7), les courbes donnant le coefficient de couple dans les systèmes à axe vertical indiquent qu'il évolue de manière identique.

- Ces courbes $C_p(\lambda)$ montrent clairement l'avantage des axes horizontaux en terme de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...).

- Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les axes horizontaux à faible nombre de pales (3, 2,1) par rapport aux axes verticaux ou aux multipales.

II.6 Distribution de Weibull :

On rappelle que la fonction de répartition $F(v)$ est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur v et que la densité de probabilité $f(v)$ est la dérivée de:

$$f(V) = \frac{dF(V)}{dV}$$

(II-20)

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent. La fonction de répartition Weibull à deux paramètres c et k s'écrit:

$$f(V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right]$$

(II-21)

En utilisant la relation donnée par l'équation (II-18), il résulte la fonction de la densité de probabilité

$$f(V) = \left(\frac{k}{V}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^k \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right)$$

(II-22)

Avec:

- k paramètre de forme caractérise la répartition du vent,
 - c paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses)

- V vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn).

L'étude statistique des données vent pour 3 sites donne le graphe suivant :

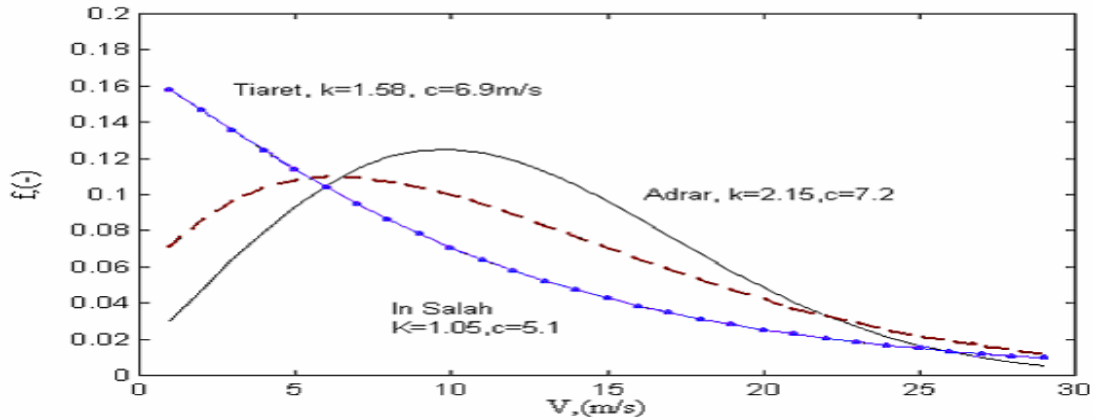


Figure II-12: Etude statistique des données du vent pour les sites de Tiaret, Adrar et InSalah [5].

II.7 Influence de la hauteur :

Pour définir les caractéristiques d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent V augmente selon la hauteur h . L'expression (II-20) donne la méthode de ce calcul et on précise que h est la hauteur du mat et h_{mes} la hauteur des appareils de mesure.

$$V_v (h) = V_v (h_{mes}) \cdot \frac{\text{Ln} (h/a)}{\text{Ln} (h_{mes}/a)}$$

(II-23)

Le Tableau (II-1) les valeurs de rugosité en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement.

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0.002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0.0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0.003
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0.055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum)	0.1

espacées d'environ 500 m.	
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0.2
Grandes villes avec bâtiments hauts	0.8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1.6

Le Tableau (II-1) les valeurs de rugosité a en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement.

Le tableau (II-2) donne un exemple de l'évolution du vent en fonction de la hauteur dans une région ventée par un « vent orographique » (vent existant au niveau d'une région indépendamment des effets de rugosité).

Hauteur	Vitesse moyenne estimée
90 m	6.8 m/s
80 m	6.5 m/s
70 m	6.3 m/s
60m	6.0 m/s
50m	5.7 m/s
40 m	5.3 m/s
30m	4.9 m/s
20 m	4.3 m/s
10 m	3.5 m/s

Table (II-2) : les vitesses de vent moyen en fonction de la hauteur [6].

II.8 Exemples de dimensionnements:

II.8.1 Longueur d'une pale et vitesse synchrone de la génératrice:

Pour obtenir une énergie électrique de puissance $P_{ele}=18$ kW à l'aide d'une éolienne, avec les données :

- Le vent qui circulant dans cette région est d'une vitesse $V= 6.5$ m/s.
- La machine est tripale et fonctionne à vitesse fixe.

- La turbine de l'éolienne entraîne une génératrice asynchrone (avec un rendement de $\eta_g = 0.8$) et un multiplicateur de vitesse (avec un rendement de $\eta_m = 0.9$ et un coefficient de multiplication $K=30$).

Dimensionnement des différents éléments :

II.8.2 Dimensions de l'aéromoteur:

II.8.2.1 La puissance mécanique nécessaire:

$$P_{ele} = P_m \cdot \eta_m \cdot \eta_g \Rightarrow P_m = \frac{P_e}{\eta_m \cdot \eta_g}$$

Avec :

$$\eta_m = 0.9$$

$$\eta_g = 0.8$$

$$P_{ele} = 18 \text{ KW}$$

II.8.2.2 Coefficient de puissance Cp :

Pour déterminer les valeurs de Cp et λ on peut utiliser les courbes ci-dessous

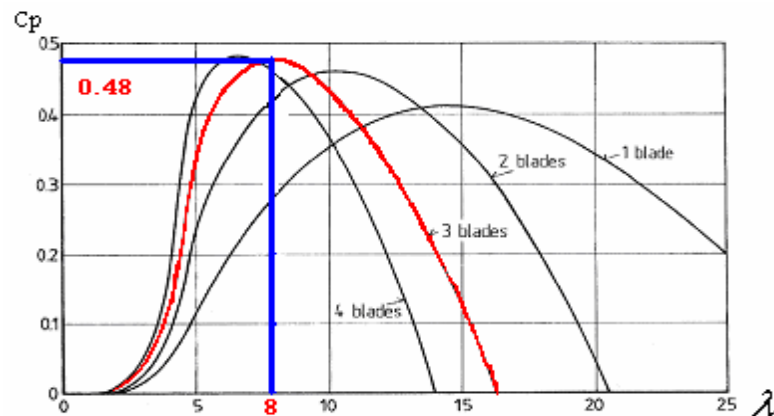


Figure II-13: les courbes de détermination de Cp et λ

II.8.2.3 La Longueur de pale:

- pour capter une puissance maximale il s'agit de choisir la valeur maximale du coefficient de puissance $C_{p_{max}} = 0.48$

- la puissance mécanique s'exprime par:

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2} \right) \rho \cdot S \cdot V^3 \Rightarrow S = \frac{2P_m}{C_p \cdot \rho \cdot V^3}$$

Avec:

$$P_m = 25 \text{ KW}$$

$$\rho = 1.25 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = 6.5 \text{ m/s}$$

$$C_p = 0.48$$

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

II.8.3 Dimensions de la génératrice:

II.8.3.1 La vitesse de l'arbre primaire de l'éolienne Ω_L en rad/s et N_L en tr/min:

D'après la figure précédente ($C_p = 0.48$ et $l = 8$) et à partir de la formule :

$$\lambda = \frac{R\Omega_L}{V} \Rightarrow \Omega_L = \frac{\lambda.V}{R}$$

Avec :

$$\lambda = 8, V = 6.5 \text{ m/s}, R = 10 \text{ m}$$

II.8.3.2 La vitesse du rotor de la génératrice Ω en rad/s, et N en tr/min:

D'après la formule : $\Omega = K.\Omega_L$

Avec:

$$K = 30$$

$$\Omega_L = 5.23 \text{ rad/s}$$

Finalement, pour installer une éolienne qui donne une puissance électrique $P_{ele} = 150 \text{ Kw}$, il faudrait choisir les dimensions suivantes :

➤ Dimensions de l'aéromoteur :

- La vitesse du vent dans cette région est supérieure à la vitesse $V = 6,5 \text{ m/s}$.
- L'éolienne est tripale.
- La longueur des pales est égale à 10 m .

➤ Dimensions du multiplicateur :

- le rapport de multiplication de ce multiplicateur est de $K = 30$.
- Le multiplicateur est fonctionné avec un rendement de $\eta_m = 0.9$

➤ Dimensions de la génératrice :

La Génératrice fonctionne à une vitesse fixe supérieure à la vitesse synchrone $N_s = 1500$ tr/min (glissement négatif $g = -1\%$) avec un rendement de $\eta_{(g)} = 0.8$.

II.9 Relation entre la vitesse du vent nécessaire et la hauteur de la tour:

Pour placer une éolienne dans une zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m et une vitesse du vent mesurée à la hauteur de $h_{mes} = 1 \text{ m}$ égale à $V_{mes} = 8 \text{ m/s}$ il est nécessaire de choisir la hauteur de la tour qui donne la vitesse nécessaire.

Pour obtenir une puissance électrique $P = 101 \text{ Kw}$ dans cette zone avec les données suivantes :

- L'éolienne utilisée est tripale avec un diamètre du rotor $D = 2R = 20\text{m}$
- La génératrice fonctionne avec un rendement $n_g = 0.8$ et une vitesse de synchronisme $N_s = 1500\text{tr/min}$.
- Le multiplicateur caractérisé par un rapport de multiplication $K=20$ et en rendement $\eta_m = 0.9$.

Références Bibliographiques

- [1]: PHILIPPE TERRIER avec la collaboration de CLAUD THÉORÊT, ING « TCH-090-095 projet technologique étude d'un éolien » MONTRÉAL, 14 août 2006 révision juillet 2007.
- [2]: Bernard MULTON, Xavier ROBOAM, Brayima DAKYO, Cristian NICHITA, Olivier GERGAUD et Hamid BEN AHMED. Aérogénérateurs électriques
- [3]: Bernard MULTON « Aérogénérateurs électriques » Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.
- [4]: Hernandez, J and Crespo, A., 1987, "Aerodynamics Calculation of the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines and Comparison with Experimental Results," Wind Eng., 11(4), pp. 177–187.
- [5]: PIERRE BOUCHER, Le Vent et ses caprices (<http://www.Le Vent - Wind.com>).
- [6]: N. KASBADJI MERZOUK et M. MERZOUK « Perspectives du pompage éolien en ALGERIE », Projet National de recherche, domicilié au CDER Alger 2008.

Chapitre III

Gisement éolien sur site d'Adrar

III-1 Introduction:

Une station météorologique enregistre et fournit des mesures physiques liées aux variations du climat. Chaque mesure est obtenue à l'aide d'un capteur. Certains sont exposés aux éléments, comme l'**anémomètre** (tout simplement pour mesurer la vitesse du vent), la **girouette** (qui est mesuré la direction du vent) et la jauge pluviométrique. Alors que d'autres sont groupés dans un abri pour mesurer les caractéristiques intrinsèques de la masse d'air comme le thermomètre et l'hygromètre. Ainsi, dans les services météorologiques nationaux, les observations sont prises toutes les heures par différents capteurs pour les différentes mesures [1].

Le présent chapitre étant basé sur l'étude de la vitesse du vent mensuelle du vent d'Adrar.

III-2 Vitesse du vent mensuelle dans le site d'Adrar [1] :

III-2-1 Pour l'année 2013 :

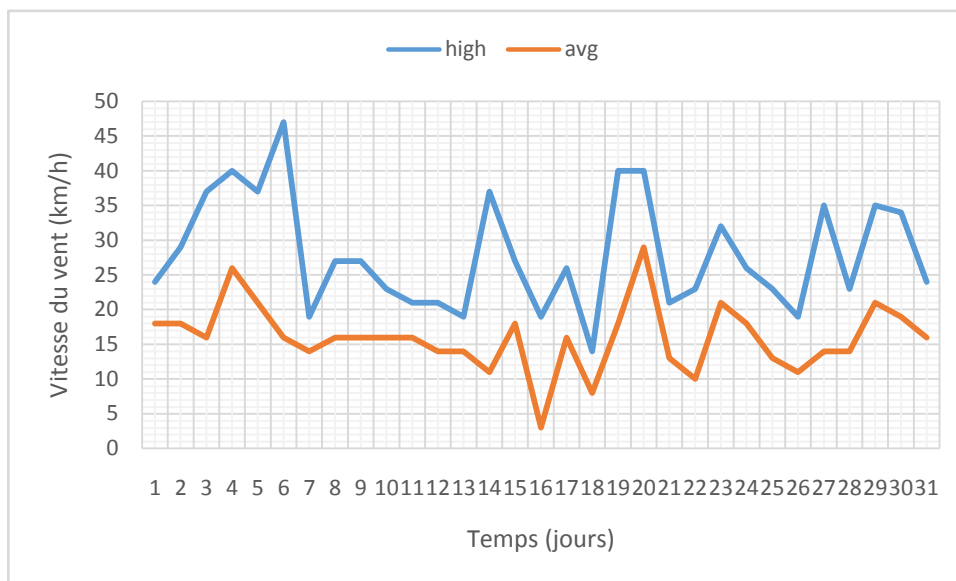


Figure III-1 :Variation journalière de la Vitesse du vent (Janvier 2013).

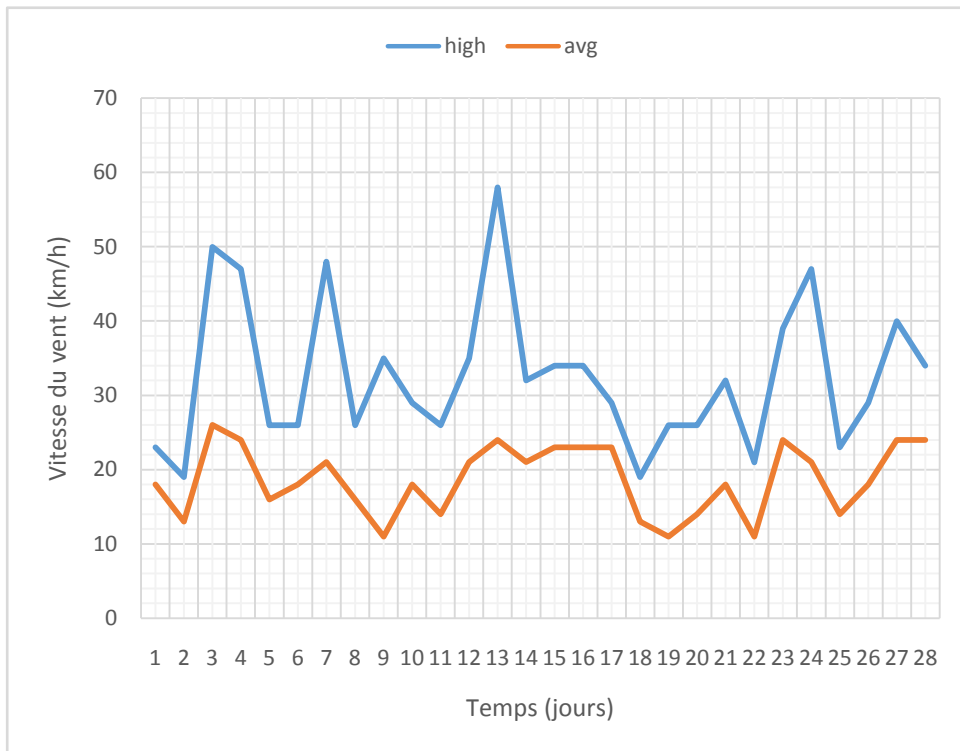


Figure III-2: Variation journalière de la vitesse du vent (Février 2013).

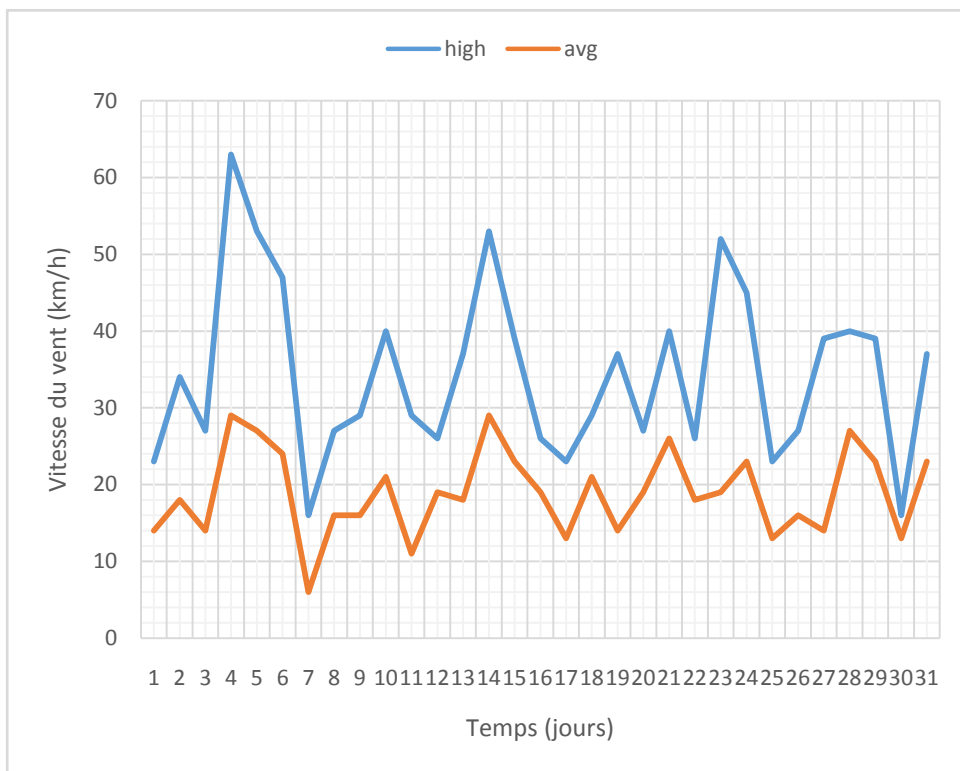


Figure III-3: Variation journalière de la vitesse du vent (Mars 2013).

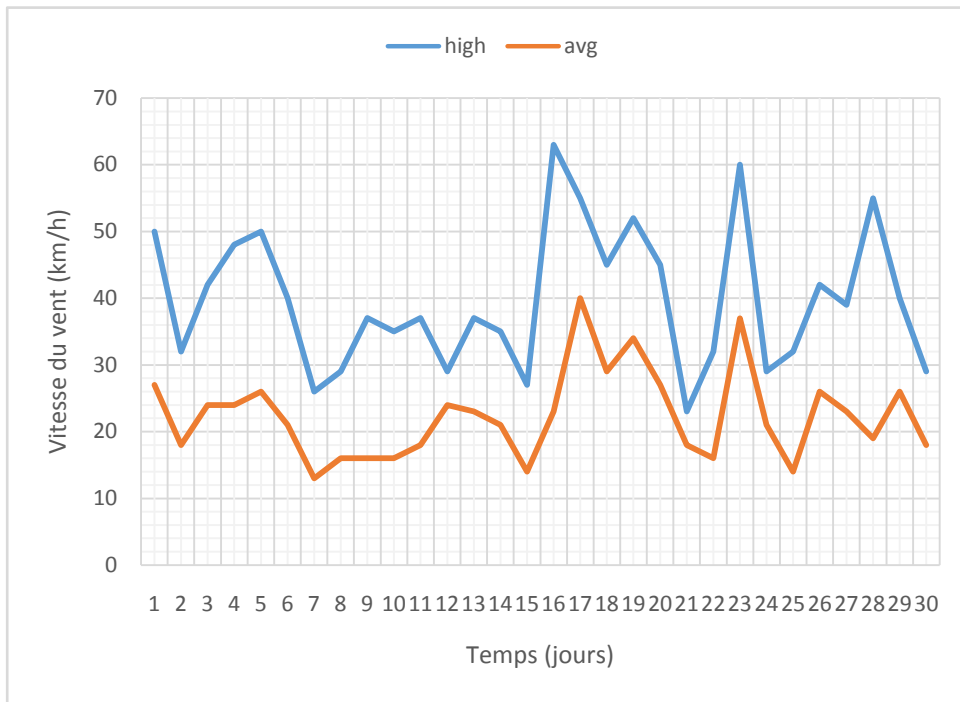


Figure III-4: Variation journalière de la vitesse du vent (Avril 2013).

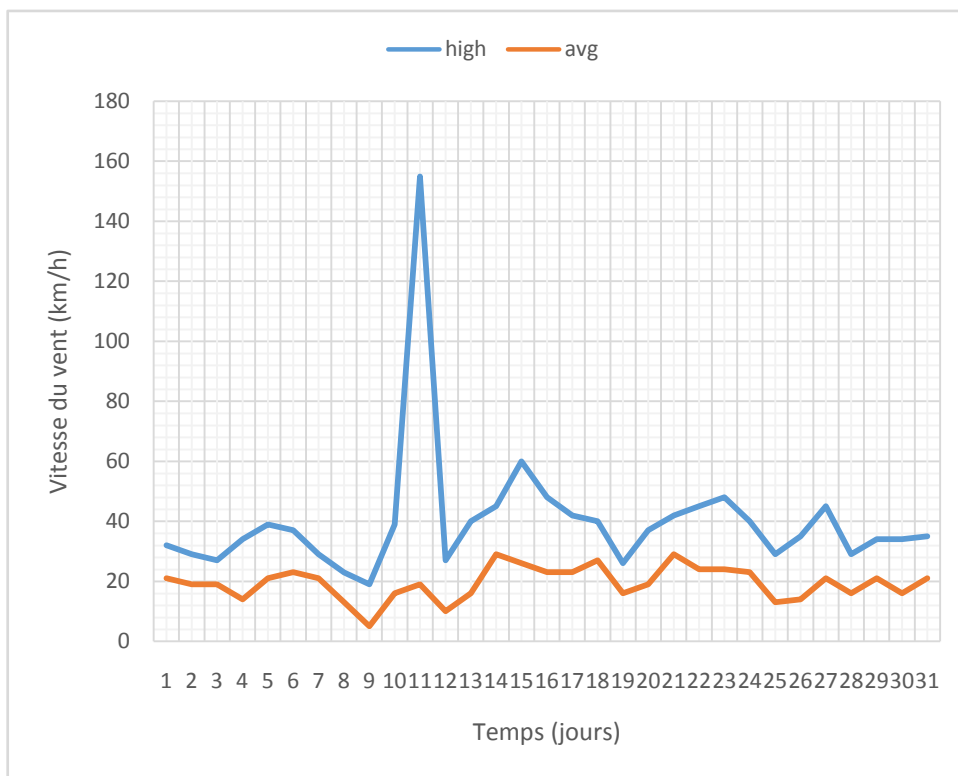


Figure III-5: Variation journalière de la vitesse du vent (Mai 2013).

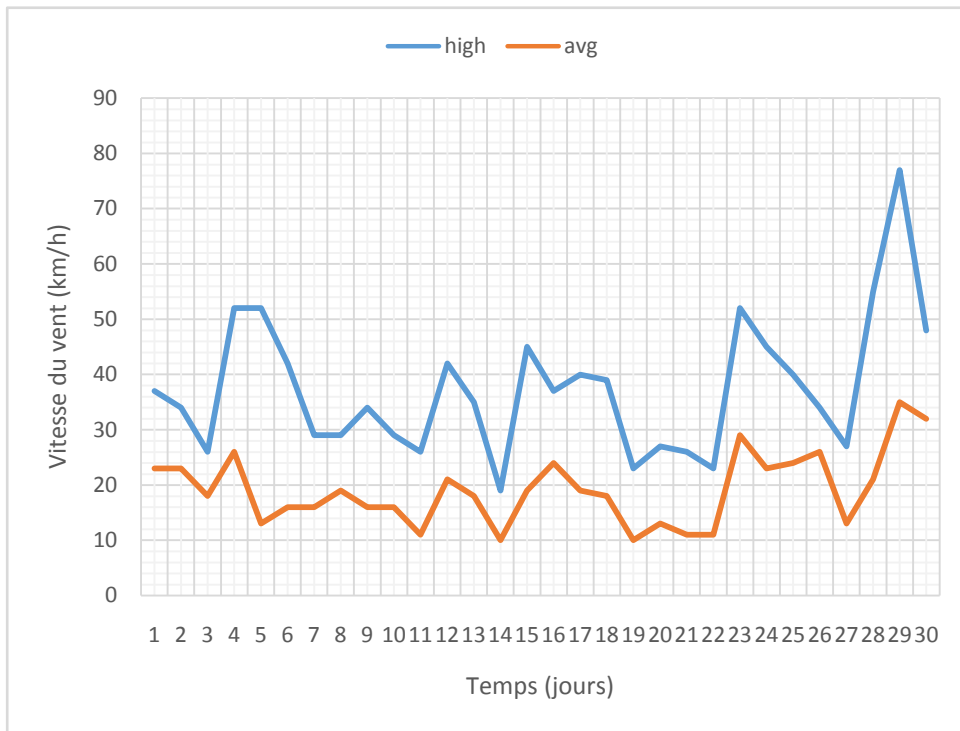


Figure III-6: Variation journalière de la vitesse du vent (Juin 2013).

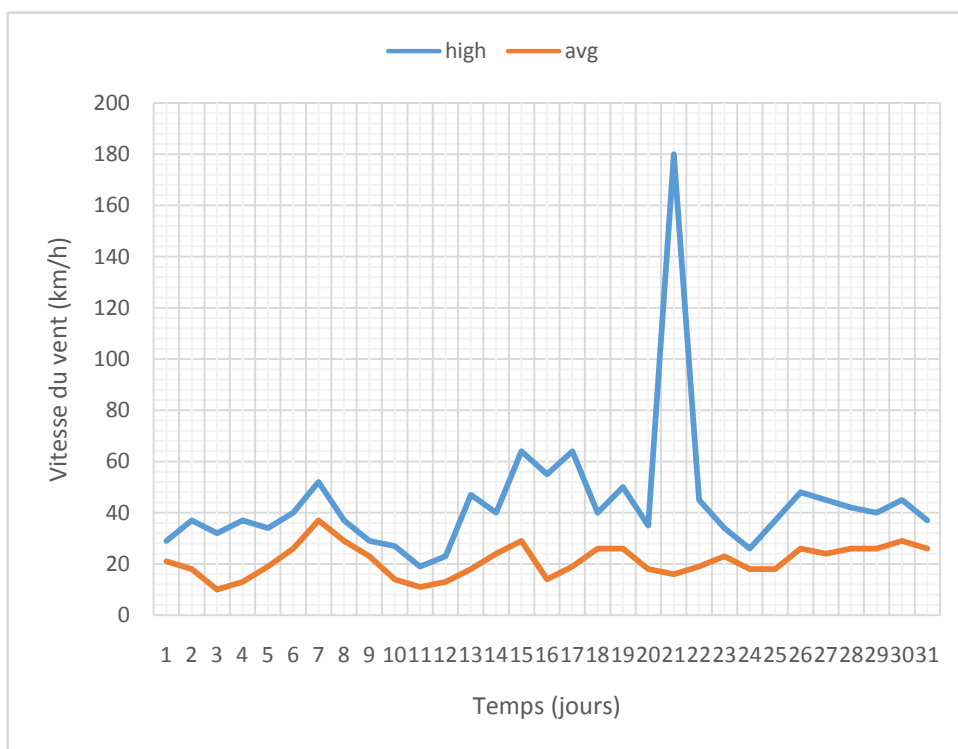


Figure III-7: Variation journalière de la vitesse du vent (Juillet 2013).

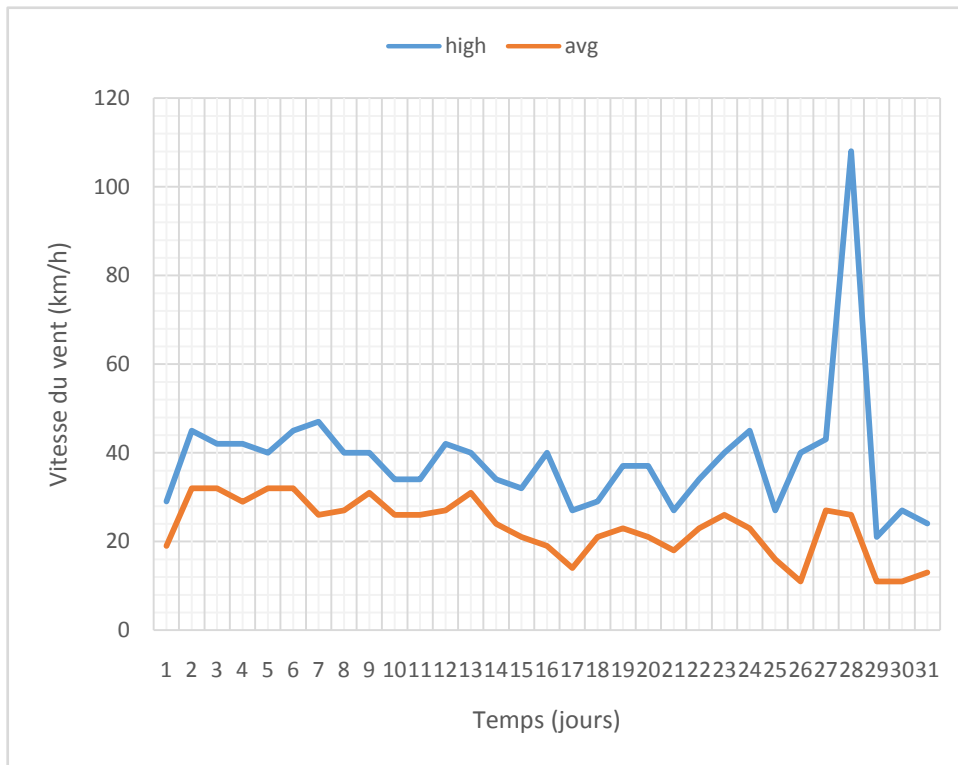


Figure III-8: Variation journalière de la vitesse du vent (Aout 2013).

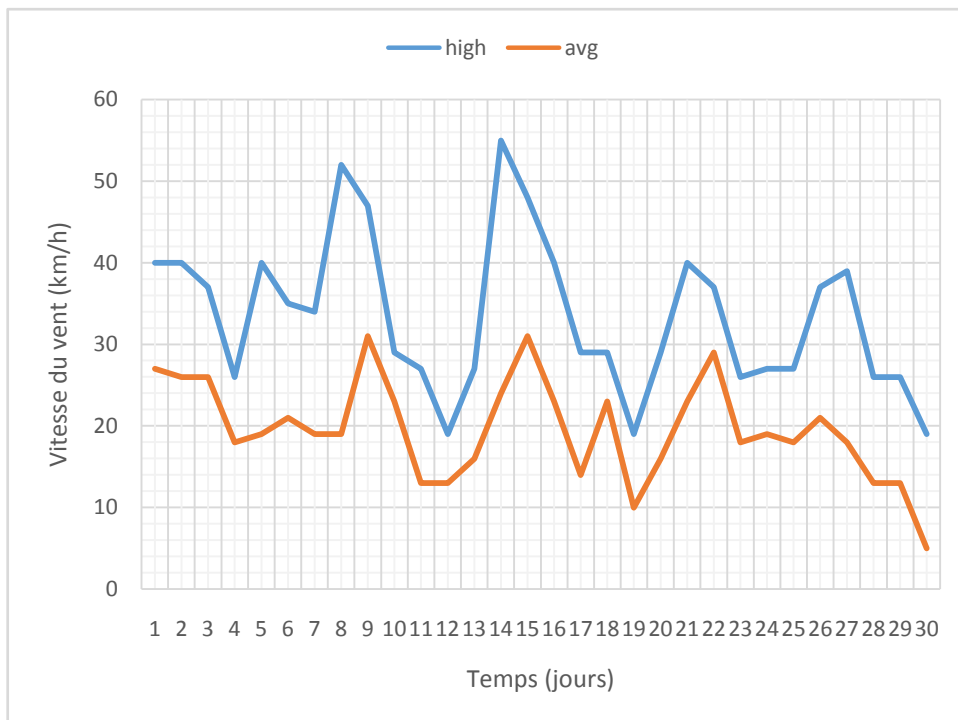


Figure III-9: Variation journalière de la vitesse du vent (September 2013).

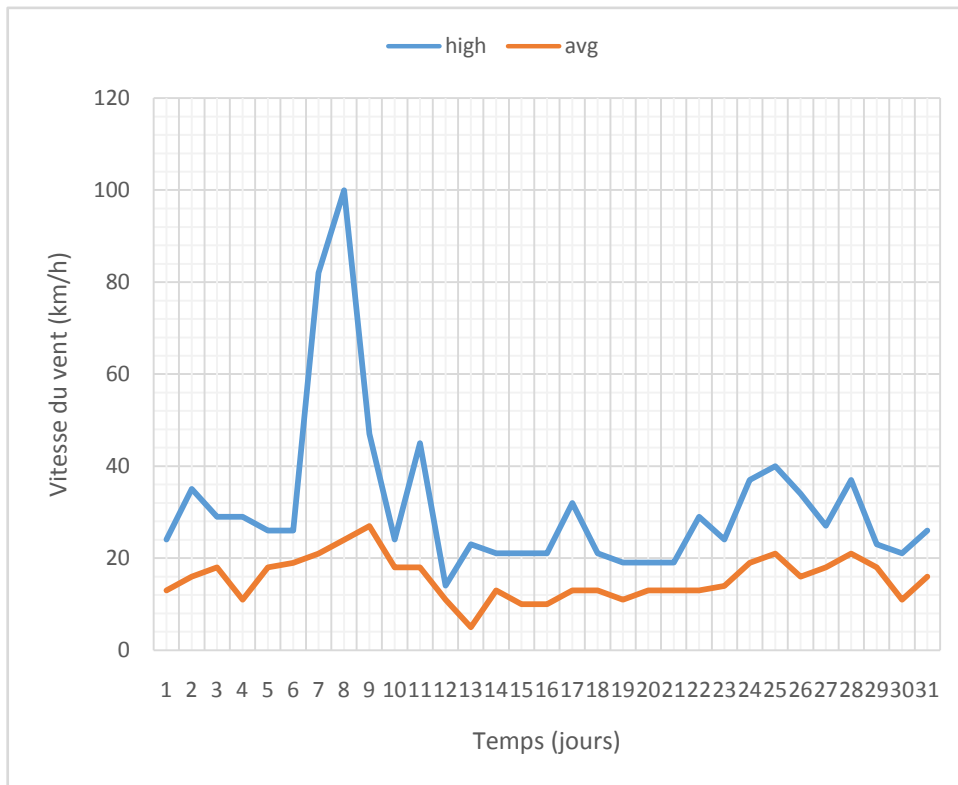


Figure III-10: Variation journalière de la vitesse du vent (October 2013).

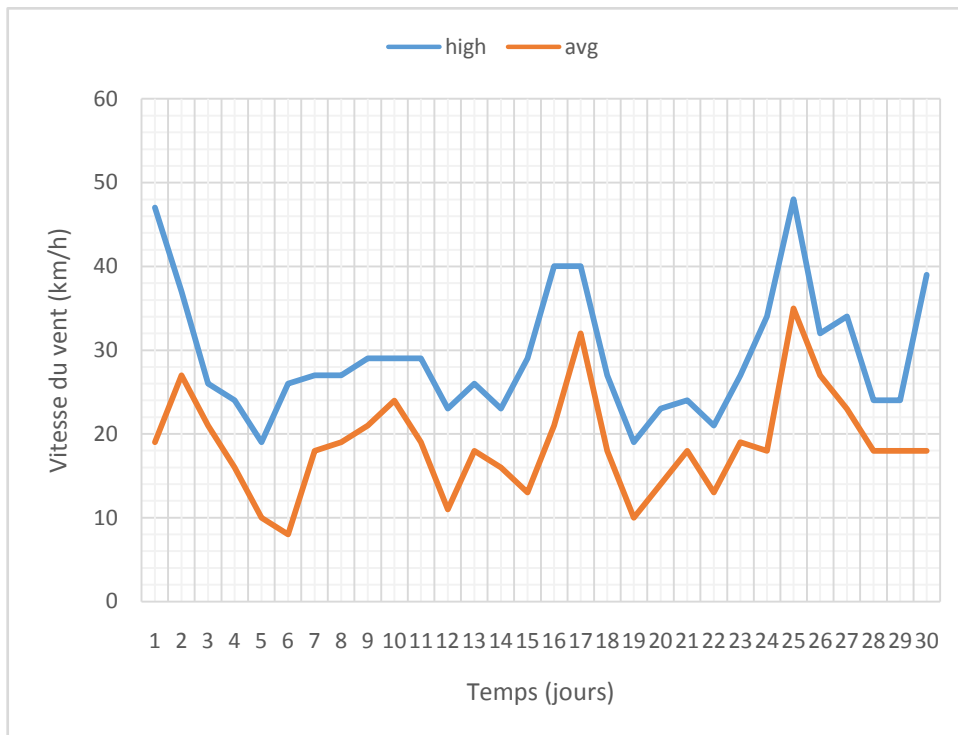


Figure III-11: Variation journalière de la vitesse du vent (November 2013).

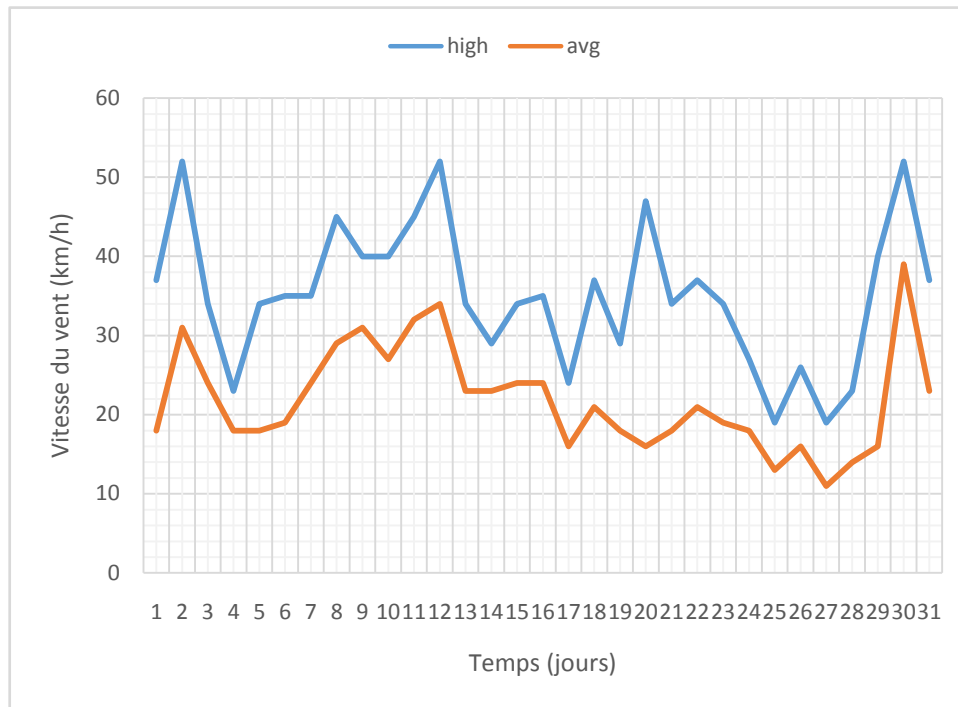


Figure III-12: Variation journalière de la vitesse du vent (Décembre 2013).

III-3 Conclusion :

Le site d'Adrar est caractérisé par un gisement éolien très important et presque stable au cours de l'année qui oscille entre des vitesses de vent allant de 20km/h jusqu'à 60 km/h. Ce qui montre que ce site est très favorable à implanter des parcs éoliens en terme de vitesse de vents sans tenir comptes des autres paramètres météorologiques et en particulier la température hivernale.

Références bibliographiques :

[1] : O. Akrabou & B. Aichaoui " Etude des paramètres météorologiques intervenant dans la simulation d'un parc éolien – Cas du site d'Adrar" Mémoire Master Physique Energétique 2017, Univ. Adrar.

Chapitre IV

Simulation d'une pale éolienne

IV-1 Introduction:

L'énergie éolienne est une énergie non polluante qui rencontre de plus en plus de succès dans le contexte écologique actuel. Cependant, pour assurer une meilleure utilisation et une plus large diffusion de cette énergie, il est nécessaire de bien maîtriser son coût d'exploitation et d'optimiser son rendement qui reste largement lié aux conditions climatiques. Une amélioration substantielle de notre compréhension des générateurs éoliens ainsi que notre capacité à prévoir leur comportement sont essentielles pour fournir de manière précise et fiable une prédiction de cette énergie. De plus, la détection précoce des dysfonctionnements ou des pannes est une caractéristique très importante des systèmes de suivi de fonctionnement des structures éoliennes soumises à des conditions climatiques variables et exigeant peu de maintenance.

Ce chapitre présente les résultats de simulation de notre système éolienne.

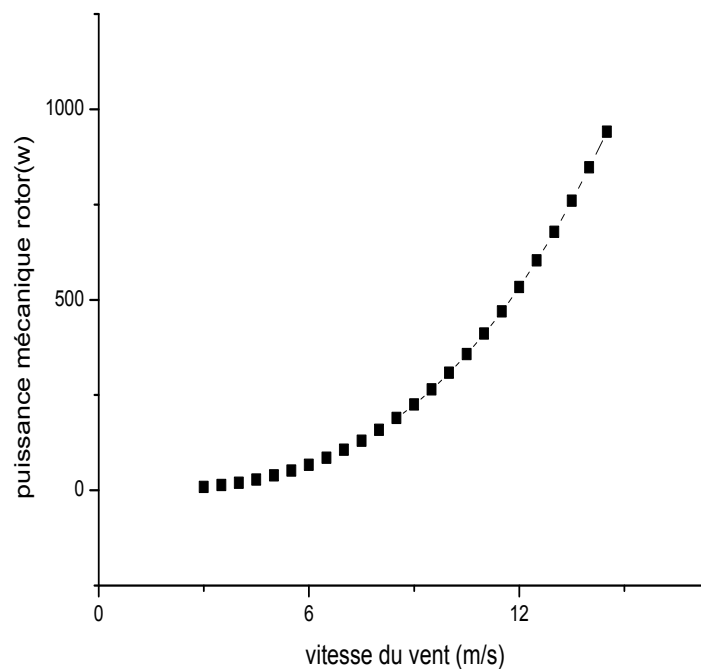


Figure VI-1 Variation de puissance en fonction de la vitesse du vent pour un diamètre de l'éolienne 1.35m

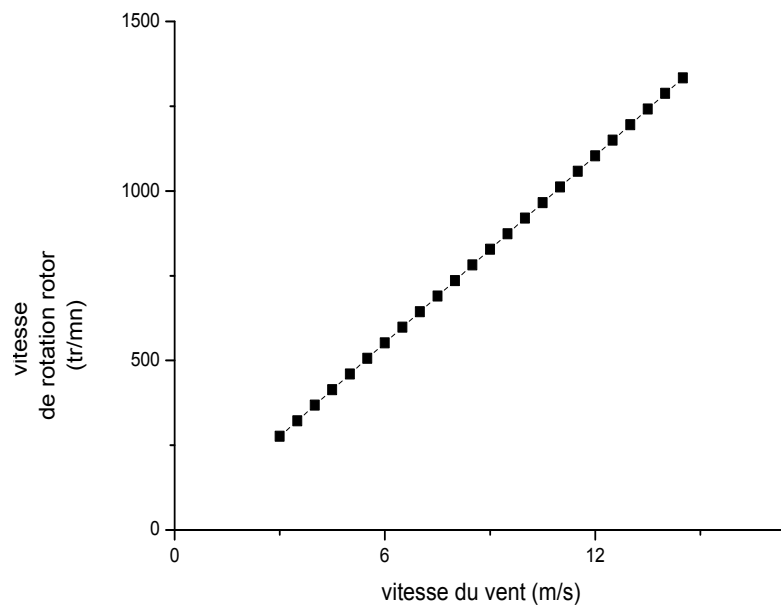


Figure VI-2 Variation de rotation rotor en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.35m

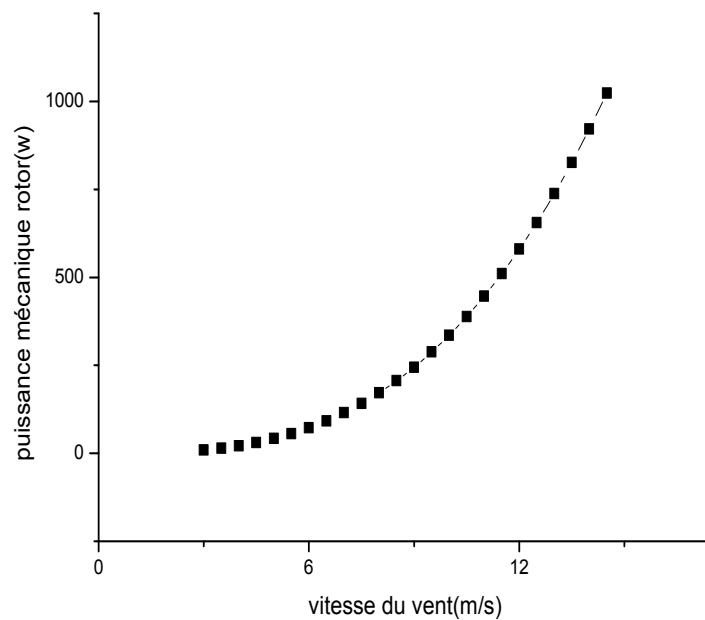


Figure VI-3 Variation de puissance en fonction de la vitesse du vent pour un diamètre de l'éolienne 1.40m

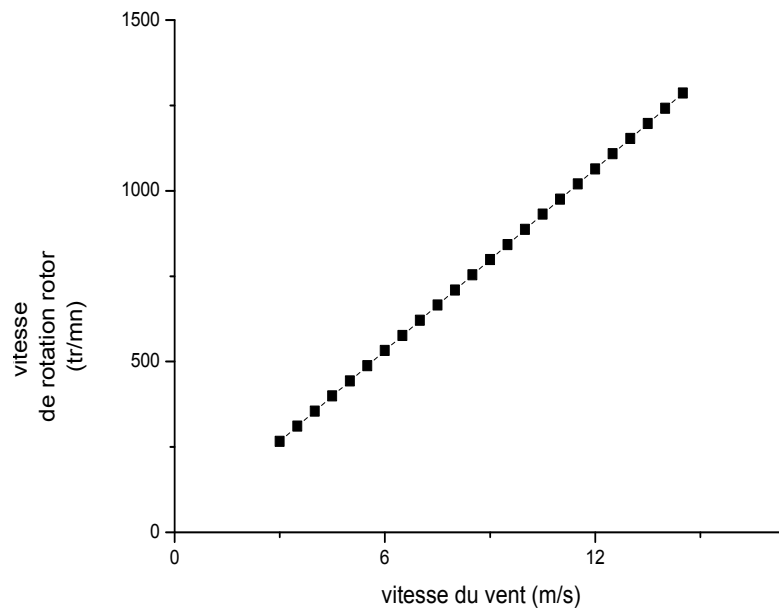


Figure VI-4 Variation de rotation rotor en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.40m

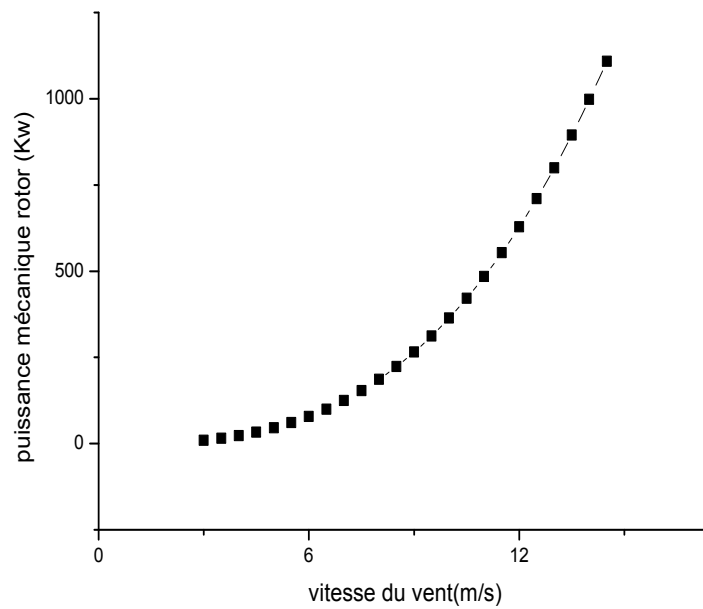


Figure VI-5 Variation de puissance en fonction de la vitesse du vent pour un diamètre de l'éolienne 1.45m

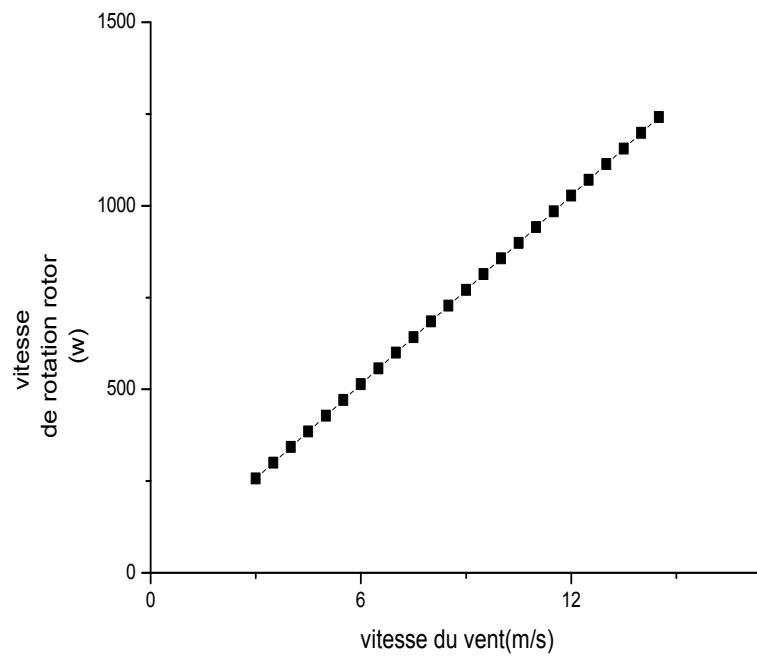


Figure VI-6 Variation de rotation rotor en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.45m

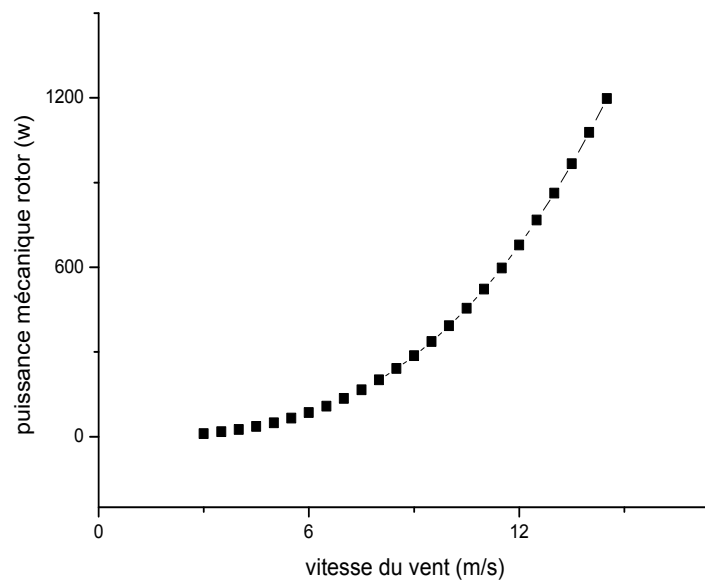


Figure VI-7 Variation de puissance en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.50m

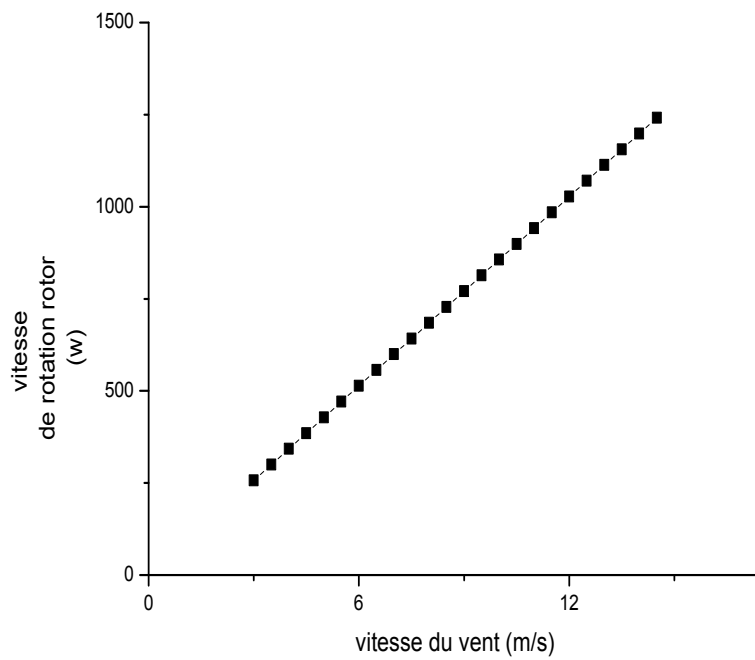
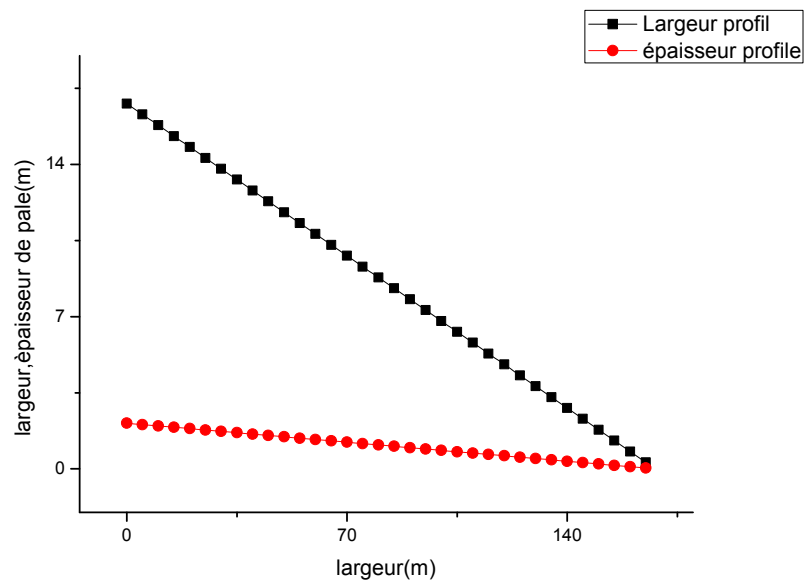
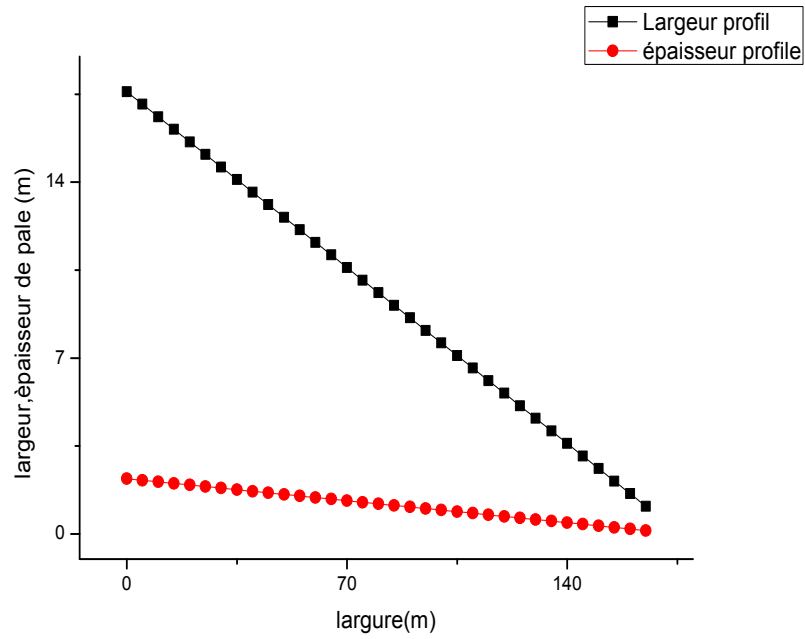


Figure VI-8 Variation de rotation rotor en fonction de la vitesse de vent pour un diamètre de l'éolienne 1.50m



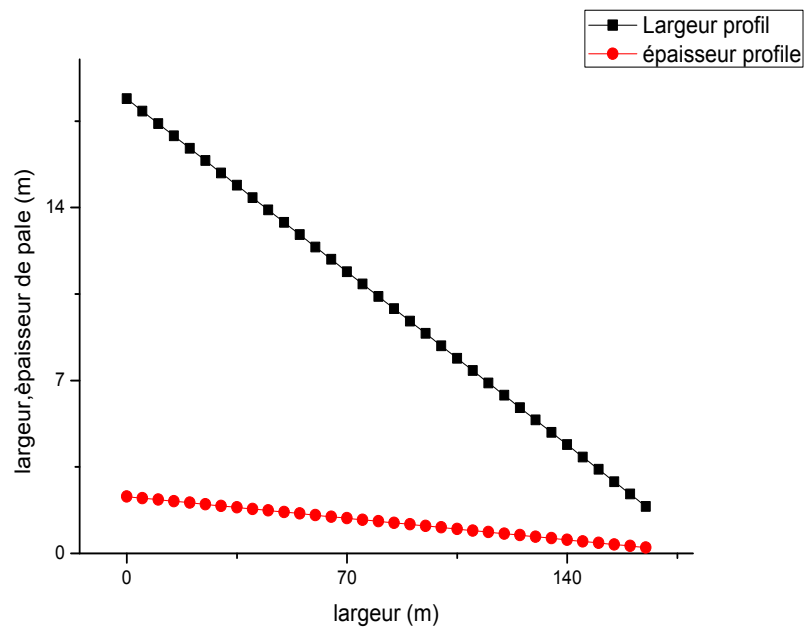
La largeur de couple d'une pale d'éolienne pour une longueur 105 cm Figure

VI-9



la largeur de couple d'une pale d'éolienne pour un longueur 110cm Figure

VI-10



la largeur de couple d'une pale d'éolienne pour un longueur 115cm Figure

VI-11

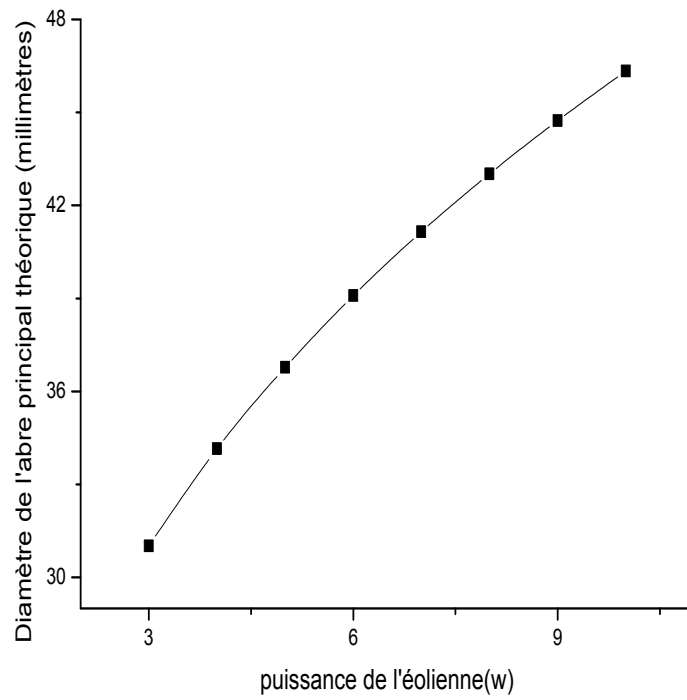


Figure VI-12 Diamètre de l'arbre principale théorique en fonction puissance de l'éolienne pour un vitesse de rotation 300 tr/mn

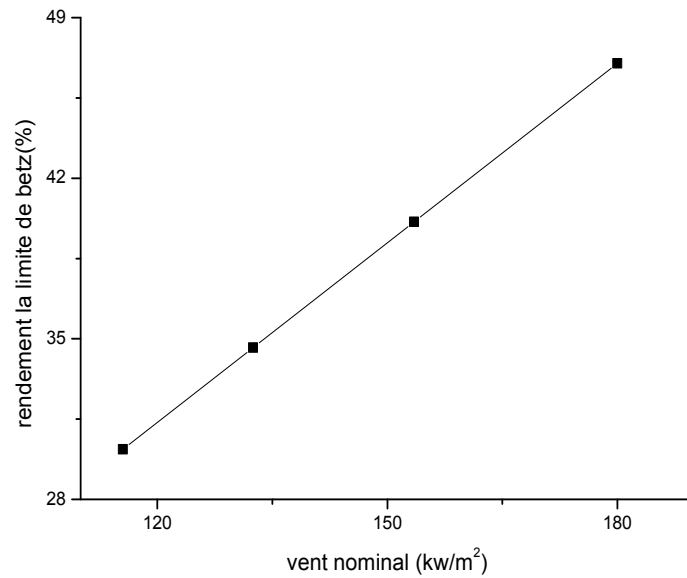


Figure VI-13 Rendement de la limite de Betz en fonction de vent nominal (pour différents diamètres de l'éolienne)

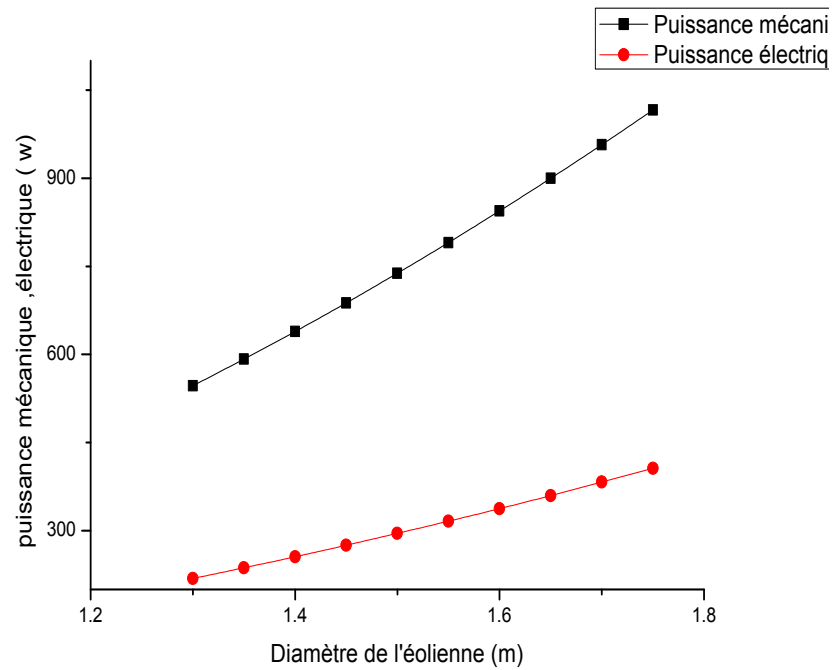


Figure VI-14 Courbe de puissance mécanique et électrique en fonction du diamètre de l'éolienne.

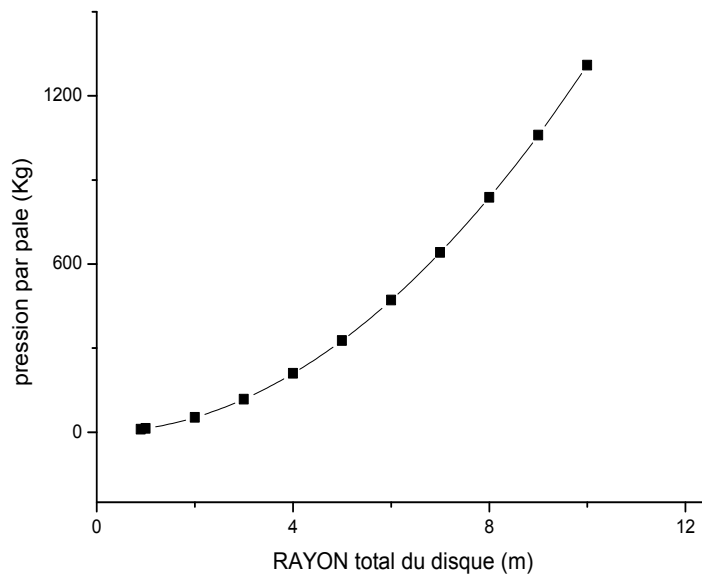


Figure VI-15: Courbe de pression de pale en fonction de rayon totale du disque.

IV-2 Discussion des résultats :

D'après les courbes de simulation on peut tirer les remarques suivantes :

- 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.

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 :

$$P = 0,37 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot \vartheta^3$$

$$P = 0,29 \cdot D^2 \cdot \vartheta^3$$

La puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle :

- au **carré** des dimensions du rotor
 - au **cube** de la vitesse du vent
- on observe que la vitesse de rotation des pales diminuer de avec l'augmentation de diamètre.
 - on remarque que le rendement croit avec l'augmentation du diamètre.
 - on distingue clairement que la vitesse minimale de 10 m/s donne la plus grand rendement 6,59715, cette dernière va diminuer avec l'augmentation de la vitesse de vent jusqu'à la vitesse maximale de 20 m/s donne un petit rendement 3,298575.

La vitesse de rotation de l'éolienne, qui va donner un aperçu du bruit que va faire l'éolienne. Plus celle-ci tourne vite, plus elle est bruyante.

- on remarque aussi que la puissance mécanique rotor augment jusqu'à quant la vitesse de rotation rotor augmente.

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.

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

$$\text{Ou encore } P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \quad [\text{w}]$$

Où :

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

D'où on peut trouver la longueur L des pales avec : $S = \pi \cdot L^2 \quad [m^2]$

$$\text{D'où on trouve que : } L = \frac{\sqrt{(2 \cdot P_{\text{vent}})}}{\sqrt{(\pi \cdot \rho \cdot V^2)}} \quad [\text{m}]$$

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 »

IV-3 Conclusion :

En pratique, une éolienne sert à récupérer l'énergie du vent, en contrepartie celle-ci dévie le vent avant qu'il atteigne la surface balayée par le rotor. Une éolienne ne pourra donc jamais récupérer l'énergie totale fournie par le vent (limite de Betz). Lorsque l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par le rotor, le vent est freiné par celui-ci, la vitesse du vent en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval. Or la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortant. Il en résulte un élargissement de la veine d'air (tube de courant) à l'arrière du rotor. Ce freinage du vent est progressif, jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

Conclusion

générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude de la conception et la simulation 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.

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 la troisième 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 d'un site isolé et le 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 montrent bien que le site d'Adrar présente une région plus ventée 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, 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.

La vitesse de rotation de l'éolienne va donner un aperçu du bruit que va faire l'éolienne. Plus celle-ci tourne vite, plus elle est bruyante.

Conclusion générale

Un rotor tournant lentement va permettre au vent de s'écouler entre les pales sans être perturbé, par contre à une vitesse élevée, le rotor agira comme un "mur" par rapport au vent. Lors de la conception d'une éolienne il est important de prendre en compte la vitesse angulaire du rotor afin d'obtenir une efficacité optimale du rotor.

-si le rotor tourne trop lentement, le vent passera de façon non-répartie entre les pales, la puissance récupérée sera minimisée.

-si le rotor tourne trop rapidement, celui-ci ne permettra pas au vent de passer au travers, réduisant là aussi la puissance récupérée.

Comme il se montre dans les résultats pour tout vitesse de vent donnée, la puissance maximale est fournie quand la vitesse des extrémités des pales est égale à 2 fois celle du vent, pour une vitesse de 50 km/h un rotor produira 1245.678 w de puissance mécanique, et un rotor de 100 km/h pourra atteindre 9965,421 w de puissance mécanique.

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

Plusieurs éléments caractérisent ces pales : la longueur, la largeur, le profil, les matériaux, le nombre.

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat.

Les résultats obtenus permettent une fois encore de vérifier qu'en augmentant la largeur des pales, le couple de l'éolienne est plus grand au départ, mais chute après une certaine vitesse de rotation.

Résumé

Notre travail consiste à étudier et optimiser une des principales composantes des éoliennes, à savoir la pale éolienne, notamment sa conception aérodynamique.

Sur la base d'une étude énergétique et météorologique dans le site d'Adrar, notre travail sera consacré à la modélisation mathématique et la simulation numérique sur le profil de la pale d'une petite éolienne et de suivre l'influence sur son rendement énergétique. Cette étude va nous permettre de prévoir la conception des éoliennes adaptées aux conditions météorologiques du site d'installation.

Mots clés : éolien, paramètres météorologiques, pale éolienne, profil, modélisation, simulation.

Abstract

Our work consists of studying and optimizing one of the main components of wind turbines, namely the blade of wind turbine, in particular its aerodynamic design.

Based on an energy and weather study in the Adrar site, our work will be devoted to mathematical modeling and numerical simulation on the blade profile of a small wind turbine and to track the influence on its energy efficiency. This study will allow us to predict the design of wind turbines adapted to the weather conditions of the installation site.

Key words: wind, meteorological parameters, wind turbine, profile, modeling, simulation.

ملخص

مهمتنا هي دراسة وتحسين مكون رئيسي من توربينات الرياح، وهي شفرة توربينات الرياح، بما في ذلك تصميمه الهوائي.

وبناء على الدراسة الطاقوية و الأرصاد الجوية في منطقة أدرار، يتركز عملنا على النمذجة الرياضية والمحاكاة العددية على ملف شفرة التوربينات الريحية الصغيرة ومتابعة تأثيره على مردوديتها الطاقوية. وهذه الدراسة تسمح لنا بتقديم تصميم للتوربينات التي تتكيف مع الظروف المناخية لمنطقة التثبيت.

كلمات البحث: الرياح، اعدادات الأرصاد الجوية، شفرة توربينات الرياح، النمذجة، المحاكاة.